

Модели и методы передачи данных

Кафедра «Вычислительные системы и
информационная безопасность»

Учебно-методический
комплекс

Автор

Цветкова О.Л.



Аннотация

Учебно-методический комплекс по изучению дисциплины для студентов представляют собой комплекс рекомендаций и разъяснений, позволяющих студенту оптимальным образом организовать процесс изучения данной дисциплины. Методические рекомендации могут быть использованы для самостоятельной работы.

Автор

Цветкова Ольга Леонидовна –

КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ОГЛАВЛЕНИЕ

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА	5
ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС	26
Лекция № 1 Понятие «сигнал»	27
Лекция № 2 Классификация сигналов	40
Лекция № 3 Классификация систем передачи данных	50
Лекция № 4 Аппаратура и типы линий связи	56
Лекция № 5 Характеристики линий связи	66
Лекция № 6 Предварительная обработка данных.....	74
Лекция № 7 Пропускная способность каналов передачи данных	79
Лекция № 8 Модуляция	92
Лекция № 9 Цифровое и логическое кодирование	104
Лекция № 10 Помехоустойчивое и эффективное кодирование	111
Лекция № 11 Виды связи и режимы передачи данных	125
Лекция № 12 Обнаружение и коррекция ошибок. Компрессия (сжатие) данных	131
Лекция № 13 Коммутация каналов	137
Лекция № 14 Коммутация пакетов и сообщений	144
Лекция № 15 Телефонные сети	152
Лекция № 16 Модемы. Факсы.....	172
Лекции № 17 Телематические службы. Телевизионные системы. Сеть Internet	185
Лекция № 18 Системы радиосвязи.....	202
Лекция № 19 Системы радиосвязи с подвижными объектами	214
ВОПРОСЫ	228
Раздел 1. Теория сигналов и основные понятия теории передачи данных	229
Раздел 2. Методы передачи данных на физическом уровне и технологии передачи данных на канальном уровне	229
Раздел 3. Методы коммутации и современные системы передачи данных.....	230

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ	232
Лабораторная работа ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИСКАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ	233
Лабораторная работа СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ	241
Лабораторная работа ФИЛЬТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	249
Лабораторная работа ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ДИСКРЕТНЫХ И НЕПРЕРЫВНЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ.....	257
Лабораторная работа МЕТОДЫ АНАЛОГОВОЙ И ДИСКРЕТНОЙ МОДУЛЯЦИИ	265
Лабораторная работа МЕТОДЫ ЦИФРОВОГО И ЛОГИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ	281
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ	288
Цели и задачи дисциплины	289
Описание последовательности изучения УМК	289
Рекомендации изучения отдельных тем курса	290
Особенности самостоятельного изучения курса.	291
Рекомендации по работе с литературой	293

Рабочая программа

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ДГТУ)

Факультет Энергетика и системы коммуникаций

Кафедра Вычислительные системы и информационная безопасность

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по МР
Н.Н. Шумская
«18» 03 20 13 г.
Пер. № 998

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

По дисциплине Б3.В.ДВ.5.1 Модели и методы передачи данных

По направлению 230400 Информационные системы и технологии

Форма и срок освоения ООП очная нормативный, заочная нормативный, заочная сокращенный

Общая трудоемкость – 4 (з.е.)

Всего учебных часов – 144 час.

ФОРМЫ КОНТРОЛЯ	СЕМЕСТР			
	Нормативный срок		Сокращенный срок	
	очная	заочная	очная	заочная
Экзамен	6	8		6
Зачет				
КР				
КП				

Адреса электронной версии программы _____

Ростов-на-Дону
20 13

Лист согласования

Рабочая программа по дисциплине «Модели и методы передачи данных» составлена в соответствии с требованиями основной образовательной программы, сформированной на основе Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению подготовки 230400 Информационные системы и технологии, профиль «Информационные системы и технологии».

Дисциплина относится к дисциплинам по выбору вариативной части профессионального цикла дисциплин (БЗ).

Рабочая программа составлена к.т.н., доцентом Цветковой О.Л. и рассмотрена на заседании кафедры «Вычислительные системы и информационная безопасность».

Протокол № 9 от « 25 » марта 2013 г.

Зав. кафедрой «Вычислительные системы и информационная безопасность»



В.А.Фатхи

Одобрена секцией по профилю научно-методического совета направления «Информационные системы и технологии»

Руководитель секции



В.А. Фатхи

« 25 » 03 2013 г.

Руководитель ЦНМОиТОП



В.В. Юрьева

« 26 » 03 2013 г.



Структура и содержание дисциплины

Раздел 1. Общие положения

1.1 Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе.

Целью изучения дисциплины «Модели и методы передачи данных» является подготовка бакалавров к решению задач, связанных с выбором и оценкой качества систем передачи данных при проектировании и эксплуатации информационных систем различного назначения. При изучении данного курса у студентов формируются знания, и навыки, необходимые для решения профессиональных задач.

Задачи дисциплины:

- 1) изучение основных принципов передачи данных по каналам связи в информационных системах;
- 2) изучение методов оценки качества каналов передачи цифровой информации, построенных на различных физических принципах передачи;
- 3) привитие навыков анализировать предлагаемые методы передачи данных с целью выявления их возможностей применения в информационных системах с заданными качественными характеристиками;
- 4) выработка навыков составления моделей оценки информационных параметров систем передачи данных;
- 5) привитие навыков использования специальной литературы, содержащей справочные материалы, относящиеся к системам передачи данных.

1.2 Связь с предшествующими и последующими дисциплинами (модулями, практиками, научно-исследовательской работой (НИР)).

Для успешного усвоения данной дисциплины необходимо, чтобы студент владел знаниями, умениями и навыками, сформированными в процессе изучения дисциплин:

«Физика» — знать основы теории электричества, магнетизма, электромагнитных волн;

«Информатика» — уметь пользоваться компьютерными программами в среде Windows;

«Математика» — знать основы дифференциального и интегрального исчисления;

«Пакеты прикладных программ» — обладать навыками использования программных пакетов для проведения математических расчетов;

«Математические пакеты прикладных программ» — обладать навыками использования программных пакетов для проведения математических расчетов.

Дисциплина «Модели и методы передачи данных» является предшествующей для изучения следующих дисциплин: «Интерфейсы автоматизированных систем», «Корпоративные информационные системы».

Раздел 2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины и планируемые результаты обучения

Студенты, завершившие изучение дисциплины «Модели и методы передачи данных», должны обладать следующими вузовскими (обобщенными) компетенциями (ВК):

— профессиональными компетенциями (ВПК) — способность проводить предпроектное обследование объекта проектирования, системный анализ предметной области, их взаимосвязей, разрабатывать средства реализации информационных технологий (методические, информационные, математические, алгоритмические, технические и программные).

ВПК	Знать	Уметь	Владеть
Уровень 1	Основные принципы реализации технологии передачи данных по каналам связи	Проводить обследование процесса передачи данных с целью выявления недостатков системы передачи	Способностью проводить оценку технических средств реализации технологии передачи данных
Уровень 2	Основные принципы реализации технологии передачи данных по каналам связи, методы повышения качества передачи	Разрабатывать средства реализации технологии передачи данных по каналам связи, проводить обследование процесса передачи данных с целью выявления недостатков системы передачи	Способностью проводить анализ алгоритмических и технических средств реализации технологии передачи данных
Уровень 3	Основные принципы реализации технологии передачи данных по каналам связи в информационных системах, методы оценки качества каналов передачи, методы повышения качества передачи	Разрабатывать средства реализации технологии передачи данных по каналам связи, проводить обследование процесса передачи данных с целью выявления недостатков системы передачи и предлагать способы повышения достоверности информации	Способностью проводить анализ алгоритмических и технических средств реализации технологии передачи данных

Таблица соответствия ВК и компетенций по ФГОС

ВК	Код направления	Перечень компетенций направления (ОК или ПК)
ВПК	230400	Способность проводить предпроектное обследование объекта проектирования, системный анализ предметной области, их взаимосвязей (ПК-1). Способность разрабатывать средства реализации информационных технологий (методические, информационные, математические, алгоритмические, технические и программные) (ПК-12).

Раздел 3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Тематический план дисциплины.

Раздел (название)	Тема, литература	Содержание
1. Теория сигналов и основные понятия теории передачи данных	1.1 Понятие «сигнал» [6.3.5, 6.3.6]	Понятие «сигнал» Математическое описание и математические модели сигналов Шумы и помехи
	1.2 Классификация сигналов [6.3.5, 6.3.6]	Классификация сигналов Типы сигналов Преобразования типа сигналов
	1.3 Классификация систем передачи данных [6.1.1, 6.1.2, 6.1.3]	Локальные и глобальные вычислительные сети Модель открытых систем OSI Основные понятия теории передачи данных Классификация систем передачи данных
	1.4 Аппаратура и типы линий связи [6.1.1, 6.1.2, 6.1.3]	Аппаратура линий связи Типы линий связи и стандарты кабелей Проблема электромагнитной совместимости
	1.5 Характеристики линий связи [6.1.1, 6.1.2, 6.1.3]	Характеристики линий связи Требования, предъявляемые к системам

		передачи данных
	1.6 Предварительная обработка данных [6.3.6]	Восстановление искаженных сигналов Фильтрация изображений
	1.7 Пропускная способность каналов передачи данных [6.3.5]	Энтропия источника информации. Информационная емкость сигналов Модель дискретного канала Классификация дискретных каналов Пропускная способность дискретного канала передачи данных Пропускная способность непрерывного канала передачи данных
2. Методы передачи данных на физическом уровне и технологии передачи данных на канальном уровне	2.1 Модуляция [6.3.3, 6.3.6]	Модуляция Методы аналоговой модуляции Методы дискретной модуляции
	2.2 Цифровое и логическое кодирование [6.1.1, 6.1.3, 6.3.3]	Требования, предъявляемые к методам цифрового кодирования Методы цифрового кодирования Методы логического кодирования
	2.3 Помехоустойчивое и эффективное кодирование [6.1.1, 6.1.3, 6.3.3]	Принципы помехоустойчивого кодирования Модели ошибок Обнаружение ошибок Исправление ошибок Информационный предел избыточности Эффективное кодирование
	2.4 Виды связи и режимы передачи данных [6.1.1, 6.1.3, 6.3.3]	Виды связи и режимы передачи данных Передача с установлением логического соединения и без установления логического соединения
	2.5 Обнаружение и коррекция ошибок. Компрессия (сжатие) данных [6.1.1, 6.1.3, 6.3.3]	Методы обнаружения ошибок Методы восстановления искаженных и потерянных кадров Компрессия (сжатие) данных

3. Методы коммутации и современные системы передачи данных	3.1 Коммутация каналов [6.1.1, 6.1.3, 6.3.3, 6.3.4]	Принципы построения систем коммутации и структура коммутационного узла Передача данных в системах с коммутацией каналов
	3.2 Коммутация пакетов и сообщений [6.1.1, 6.1.3, 6.3.3, 6.3.4]	Передача данных в системах с коммутацией пакетов Передача данных в системах с коммутацией сообщений Обеспечение дальности связи
	3.3 Телефонные сети [6.1.4, 6.3.1, 6.3.2]	Нумерация абонентских линий на телефонных сетях Основы теории телефонного сообщения Аппаратура передачи речи Коммутационные приборы Управляющие устройства
	3.4 Модемы. Факсы [6.1.4, 6.3.1, 6.3.2]	Применение телефонных сетей для передачи данных Классификация модемов Режимы работы модема Устройство модемов Устойчивость работы модемов Факсимиле (факс). Принцип работы факсимильного аппарата
	3.5 Телематические службы. Телевизионные системы. Сеть Internet [6.1.4, 6.3.1, 6.3.2, 6.3.5]	Телематические службы Телевизионные системы Сеть Internet
	3.6 Системы радиосвязи [6.1.4, 6.3.1, 6.3.2]	Радиолинии и системы передачи сообщений с радиоканалами Радиопередающие устройства и радиоприемные устройства Антенны и фидеры Радиорелейные системы передачи Тропосферные радиорелейные системы передачи Радиосистемы передачи на декаметровых волнах

	3.7 Системы радиосвязи с подвижными объектами [6.1.4, 6.3.1, 6.3.2]	Профессиональные системы подвижной радиосвязи Системы персонального радиовызова Спутниковые системы связи Сотовые системы связи Стандарты сотовой связи Системы беспроводных телефонов
--	---	---

Распределение бюджета времени по видам занятий

3.2 Лекционные занятия.

№ рейтингового блока	№ темы	Объем времени, час			
		норм. срок обучения		сокращ. (ускорен.)	
		очная	заочная	очная	заочная
1	3	4	5	6	7
1	1.1	0,5	0,2		0,2
	1.2	0,5	0,2		0,2
	1.3	0,5	0,2		0,2
	1.4	0,5	0,2		0,2
	1.5	1	0,2		0,2
	1.6	1	0,2		0,2
	1.7	1	0,2		0,2
2	2.1	1	0,2		0,2
	2.2	1	0,2		0,2
	2.3	1	0,2		0,2
	2.4	1	0,2		0,2
	2.5	1	0,2		0,2
	3.1	1	0,2		0,2
	3.2	1	0,2		0,2
	3.3	1	0,2		0,2
	3.4	1	0,2		0,2
	3.5	1	0,2		0,2

	3.6	0,5	0,2		0,2
	3.7	0,5	0,4		0,4
Итого		16	4		4

3.3 Лабораторные занятия.

№ рейтин гового блока	Тема и содержание лабораторного занятия	№ темы из раздела 3	Объем времени, час			
			норм. срок обучения		сокращ. (ускорен.)	
			очная	заочная	очная	заочная
1	2	3	4	5	6	7
1	Восстановление искаженных сигналов	1.6	4			
	Фильтрация изображений	1.6	6			
	Пропускная способность дискретных и непрерывных каналов передачи данных	1.7	6			
2	Методы аналоговой и дискретной модуляции	2.1	6	6		4
	Методы цифрового и логического кодирования	2.2	6	4		4
	Деловая игра: Проектирование телекоммуникационных сетей предприятий	3.3—3.7	6			
Итого			34	10		8

3.4 Самостоятельная работа студентов.

№ п.п.	Вид самостоятельной работы	Объем времени, час				Рекомендуем ая литература
		норм. срок обучения		сокращ. (ускорен.)		
		очная	заочная	очная	заочная	
1	2	3	4	5	6	7
1	Усвоение текущего материала	10	10		12	[6.1.1—6.1.4, 6.3.1— 6.3.6]
2	Самостоятельное изучение теоретического материала	28	40		40	[6.1.1—6.1.4, 6.3.1— 6.3.6]
3	Выполнение курсовой работы					
4	Выполнение контрольной работы		44		44	[6.6.1]
5	Подготовка к практическим и лабораторным занятиям	20				[6.4.1, 6.4.2]
6	Подготовка к экзамену	36	36		36	[6.1.1—6.1.4, 6.3.1— 6.3.6]
Итого		94	130		132	

Контрольные работы для студентов заочной формы обучения.

Тема и содержание контрольной работы	№ темы из раздела 3
Часть № 1. Восстановление искаженных сигналов	1.6
Часть № 2. Фильтрация изображений	1.6
Часть № 3. Пропускная способность дискретных и непрерывных каналов передачи данных	1.7

3.5 Распределение баллов за текущую работу.

Вид текущей учебной работы	Количество баллов
Тестовый контроль	15
Выполнение лабораторных работ	35
Экзамен	50
Итого	100

Раздел 4. Образовательные технологии

Реализация программы предусматривает использование образовательных технологий, направленных на формирование элементов компетенций, в обеспечении которых участвует дисциплина «Модели и методы передачи данных». В процессе обучения реализуется лекционно-лабораторная система обучения, и используются следующие образовательные технологии:

— В ходе проведения лекционных занятий используется классическая методика с разбиением на 3 части: вводная, основная, заключительная. Во время лекций выделяется время для активных и интерактивных форм проведения занятий.

— В ходе проведения лабораторных занятий студенты проводят исследования на компьютерной технике по индивидуальному заданию. Используются активные и интерактивные технологии.

В процессе реализации указанных технологий выполняются следующие условия:

- Чтение лекций с использованием проекционной техники — 25 %.
- Проведение интерактивных занятий — 50 %.
- Занятия, проводимые в активных формах — 10 %.

Раздел 5. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации и самоконтроля по итогам освоения дисциплины

Рабочая программа дисциплины обеспечена фондом оценочных средств для проведения текущего контроля, промежуточного контроля, экзаменов. Фонд включает:

- задания для текущего контроля, в том числе в тестовой форме;
- вопросы к экзаменам, в соответствии с рейтинговыми блоками;
- критерии для оценки достижения результатов освоения дисциплины в целом по каждому виду работ.

5.1 Перечень вопросов для подготовки к промежуточным аттестациям и экзаменам.

6 семестр

1 рейтинг

Раздел 1. Теория сигналов и основные понятия теории передачи данных

Понятие «сигнал»

Математическое описание и математические модели сигналов

Шумы и помехи

Классификация сигналов

Типы сигналов

Преобразования типа сигналов

Локальные и глобальные вычислительные сети

Модель открытых систем OSI

Основные понятия теории передачи данных

Классификация систем передачи данных

Аппаратура линий связи

Типы линий связи и стандарты кабелей

Проблема электромагнитной совместимости

Характеристики линий связи

Требования, предъявляемые к системам передачи данных

Восстановление искаженных сигналов

Фильтрация изображений

Энтропия источника информации. Информационная емкость сигналов

Модель дискретного канала

Классификация дискретных каналов

Пропускная способность дискретного канала передачи данных

Пропускная способность непрерывного канала передачи данных

2 рейтинг

Раздел 2. Методы передачи данных на физическом уровне и технологии передачи данных на канальном уровне

Модуляция

Методы аналоговой модуляции

Методы дискретной модуляции

Требования, предъявляемые к методам цифрового кодирования

Методы цифрового кодирования

Методы логического кодирования

- Принципы помехоустойчивого кодирования
- Модели ошибок
- Обнаружение ошибок
- Исправление ошибок
- Информационный предел избыточности
- Эффективное кодирование
- Виды связи и режимы передачи данных
- Передача с установлением логического соединения и без установления логического соединения
- Методы обнаружения ошибок
- Методы восстановления искаженных и потерянных кадров
- Компрессия (сжатие) данных

Раздел 3. Методы коммутации и современные системы передачи данных

- Принципы построения систем коммутации и структура коммутационного узла
- Передача данных в системах с коммутацией каналов

- Передача данных в системах с коммутацией пакетов
- Передача данных в системах с коммутацией сообщений
- Обеспечение дальности связи
- Нумерация абонентских линий на телефонных сетях
- Основы теории телефонного сообщения
- Аппаратура передачи речи
- Коммутационные приборы
- Управляющие устройства автоматических телефонных станций
- Телефонная сигнализация
- Применение телефонных сетей для передачи данных
- Классификация модемов
- Режимы работы модема
- Устройство модемов
- Устойчивость работы модемов
- Факсимиле (факс). Принцип работы факсимильного аппарата
- Телематические службы
- Телевизионные системы
- Сеть Internet

- Радиопередачи и системы передачи сообщений с радиоканалами
- Радиопередающие устройства и радиоприемные устройства
- Антенны и фидеры
- Радиорелейные системы передачи
- Тропосферные радиорелейные системы передачи
- Радиосистемы передачи на дециметровых волнах
- Радиосистемы, использующие ионосферное рассеяние

Профессиональные системы подвижной радиосвязи
 Системы персонального радиовызова
 Спутниковые системы связи
 Сотовые системы связи
 Стандарты сотовой связи
 Системы беспроводных телефонов

5.2 Комплект тестовых заданий.

По дисциплине имеется комплект тестовых заданий.

5.3 Технические средства обучения и контроля, использование ЭВМ.

1. Компьютерные классы, оснащенные необходимым программным обеспечением.
2. Система тестирования «ЦДО-тест», разработка ДГТУ.
3. Сайт центра дистанционного обучения <http://de.dstu.edu.ru>

5.4 Уровни и критерии итоговой оценки результатов освоения дисциплины «Модели и методы передачи данных».

Уровни	Критерии выполнения заданий ОС	Итоговый семестровый балл	Итоговая оценка
Недостаточный	Имеет представление о содержании дисциплины, но не знает основные определения, не способен выполнить задание с очевидным решением.	Менее 41	Неудовлетворительно
Базовый	<p>Знает основные определения и понятия теории сигналов, классификацию сигналов и систем передачи данных, характеристики линий связи.</p> <p>Имеет представление о методах модуляции, цифрового и логического кодирования.</p> <p>Имеет представление о принципах построения систем передачи данных с коммутацией каналов, пакетов и сообщений.</p> <p>Имеет представление о принципах работы телефонных сетей, модемов,</p>	41-60	Удовлетворительно

		факсов, сети Internet, систем радиосвязи.		
Повышенный	ПУ 1	<p>Знает и понимает основные определения и понятия теории сигналов, классификацию сигналов и систем передачи данных, характеристики линий связи.</p> <p>Способен оценить методы предварительной обработки данных.</p> <p>Знает методы модуляции, цифрового и логического кодирования, обнаружения и коррекции ошибок, компрессии данных.</p> <p>Имеет представление о принципах построения систем передачи данных с коммутацией каналов, пакетов и сообщений.</p> <p>Имеет представление о принципах работы телефонных сетей, модемов, факсов, сети Internet, систем радиосвязи.</p>	61-80	Хорошо
	ПУ 2 (повышенный)	<p>Знает и понимает основные определения и понятия теории сигналов, классификацию сигналов и систем передачи данных, характеристики линий связи.</p> <p>Способен оценить методы предварительной обработки данных и выбрать эффективный алгоритм.</p> <p>Умеет провести расчет пропускной способности каналов передачи данных.</p> <p>Знает методы модуляции, цифрового и логического кодирования, помехоустойчивого и эффективного кодирования, обнаружения и коррекции ошибок, компрессии данных.</p> <p>Знает принципы построения систем передачи данных с коммутацией каналов, пакетов и сообщений.</p> <p>Имеет представление о принципах</p>	81-100	Отлично

		работы телефонных сетей, модемов, факсов, сети Internet, систем радиосвязи.		
--	--	---	--	--

Раздел 6. Литература

Карта методического обеспечения дисциплины

№	Автор	Название	Издательство	Гриф издания	Год издания	Кол-во в библиотеке	Ссылка на электронный ресурс	Доступность
1	2	3	4	5	6	7	8	9
6.1 Основная литература								
6.1.1	Чекмарев Ю.В.	Вычислительные системы, сети и телекоммуникации	М.: «ДМК Пресс»	Допущено УМО	2009		http://e.lanbook.com	С любой точки доступа для авторизированных пользователей
6.1.2	Хохлова Н.М.	Информационные технологии (конспект лекций)	М.: Приориздат		2007	10		
6.1.3	Пескова С.А.	Сети и телекоммуникации	М.: Академия		2006	5		
6.1.4	Кульгин М.	Технологии корпоративных сетей	СПб.: Питер		2005	32		
6.2 Периодическая литература								

6.3 Дополнительная литература							
6.3.1	Богданов-Катьков Н.В.	Интернет: Настольная книга пользователя	М.: Эком		200 5	2	
6.3.2	Браун М.	Методы поиска информации в Интернет	М.: Новый издат. дом		200 5	8	
6.3.3	В.Г. Олифер, Н.А. Олифер	Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы	СПб.: Питер		200 1	10	
6.3.4	Галкин В.А., Григорьев Ю.А.	Телекоммуникации и сети	М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана		200 3	8	
6.3.5	Б.Я. Советов, В.В. Цехановский	Информационные технологии	М.: Высш. шк		200 3	10	
6.3.6	Сергиенко Л.Б.	Цифровая обработка сигналов	СПб.: Питер		200 3	9	
6.4 Практические (семинарские) и (или) лабораторные занятия							
6.4.1	Сост.: О.Л. Цветкова	Исследование методов передачи данных: Метод. указания к лабораторным работам № 1—5 по	РГАСХ М ГОУ, Ростов н/Д		200 9	50	

		дисциплина м «Модели и методы передачи данных», «Передача данных в технических системах»						
--	--	--	--	--	--	--	--	--

6.4.2	Сост.: А.И. Зотов, О.Л. Цветкова	Проектирование телекоммуникационных сетей предприятий: метод. указания к деловой игре по дисциплине «Модели и методы передачи данных»	РГАСХМ ГОУ, Ростов н/Д		2005	40		
6.5 Курсовая работа								
6.6 Контрольные работы								
6.6.1	Сост.: О.Л. Цветкова	Исследование методов передачи данных: Метод. указания к лабораторным работам № 1—5 по дисциплинам «Модели и методы передачи данных», «Передача данных в технических системах»	РГАСХМ ГОУ, Ростов н/Д		2009	50		
6.7 Программно-информационное обеспечение дисциплины, Интернет-ресурсы								
6.7.1 Пакет прикладных программ MathCad								
6.7.2 Официальный сайт программного продукта: MathCad — www.ptc.com/product/mathcad								

Раздел 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины
(приборы, установки, стенды и т.д.)

7.1 Помещения для проведения лекционных и лабораторных занятий укомплектованы необходимой специализированной мебелью и техническими средствами для представления учебной информации студентам, включая проекционное оборудование. Кафедра располагает компьютерным классом с компьютерами, оснащенными операционной системой Windows XP и пакетом прикладных программ MathCad.



Экспертное заключение

Секции по профилю научно-методического Совета направления 230400 Информационные системы и технологии по рабочей программе дисциплины «Модели и методы передачи данных», предусмотренной учебным планом подготовки бакалавров по направлению 230400 «Информационные системы и технологии».

Рассмотрев структуру, содержание и качество оформления рабочей программы по дисциплине совет отмечает:

— рабочая программа соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования в части выполнения требований, предъявляемых к содержанию, уровню, профессиональной квалификации выпускников по соответствующему циклу дисциплин и по самой дисциплине, а так же требованиям «Положения об основной образовательной программе высшего профессионального образования»;

— соотношение объемов основных разделов выбрано логично в целесообразных пропорциях;

— бюджет времени, отводимый на различные виды аудиторных занятий согласуется с бюджетом времени, выделяемого для выполнения самостоятельной работы;

— объем и количество видов самостоятельной работы обоснованы, соответствуют фактическим трудозатратам на их выполнение;

— разработанные оценочные средства для контроля и самоконтроля позволяют оценить уровень освоения дисциплины.

Рекомендации Совета:

— подготовить заявку для регистрации конспекта лекций как электронного ресурса, издать учебное пособие.

На основании вышеизложенного секция по профилю научно-методического Совета направления 230400 Информационные системы и технологии предлагает утвердить рабочую программу по дисциплине «Модели и методы передачи данных», представленную на экспертизу.

Руководитель секции



В.А. Фатхи

Члены экспертной группы:



А.И. Зотов



А.Р. Айдинян

Лекционный курс



Лекция № 1 Понятие «сигнал»

1. Понятие «сигнал»
2. Математическое описание и математические модели сигналов
3. Шумы и помехи

1. Понятие «сигнал»

В XVIII веке в теорию математики вошло понятие функции, как определенной зависимости какой-либо величины y от другой величины — независимой переменной x , с математической записью такой зависимости в виде $y(x)$. Довольно скоро математика функций стала базовой основой теории всех естественных и технических наук. Особое значение функциональная математика приобрела в технике связи, где временные функции вида $s(t)$ и т. п., используемые для передачи информации, стали называть сигналами.

В технических отраслях знаний термин «сигнал» (signal от латинского signum — знак) очень часто используется в широком смысловом диапазоне, без соблюдения строгой терминологии. Под ним понимают и техническое средство для передачи, обращения и использования информации — электрический, магнитный, оптический сигнал; и физический процесс, представляющий собой материальное воплощение информационного сообщения — изменение какого-либо параметра носителя информации (напряжения, частоты, мощности электромагнитных колебаний, интенсивности светового потока и т. п.) во времени, в пространстве или в зависимости от изменения значений каких-либо других аргументов (независимых переменных); и смысловое содержание определенного физического состояния или процесса, как, например, сигналы светофора, звуковые предупреждающие сигналы и т. п. Все эти понятия объединяет конечное назначение сигналов. Это определенные сведения, сообщения, информация о каких-либо процессах, состояниях или физических величинах объектов материального мира, выраженные в форме, удобной для передачи, обработки, хранения и использования этих сведений.

Термин «сигнал» очень часто отождествляют с понятиями «данные» (data) и «информация» (information). Действительно, эти понятия взаимосвязаны и не существуют одно без другого, но относятся к разным категориям.

Понятие «информация» имеет много определений, от наиболее широкого (формализованное отражение реального мира) до практического (сведения и данные, являющиеся объектом хранения, передачи, преобразования, восприятия и управления). В настоящее время мировая наука все больше склоняется к точке зрения, что информация, наряду с материей и энергией, принадлежит к фундаментальным философским категориям естествознания и относится к одному из свойств объективного мира, хотя и несколько специфичному. Что касается «данных» (от латинского datum — факт), то это совокупность фактов, результатов наблюдений, измерения каких-либо физических свойств объектов, явлений или процессов материального мира, представленных в формализованном виде, количественном или качественном. Это не информация,

а только атрибут информации — сырье для получения информации путем соответствующей обработки и интерпретации (истолкования).

Термин «сигнал» в мировой практике является общепринятым для характеристики формы представления данных, при которой данные рассматриваются как результат некоторых измерений объекта исследований в виде последовательности значений скалярных величин (аналоговых, числовых, графических и пр.) в зависимости от изменения каких-либо переменных значений (времени, энергии, температуры, пространственных координат, и пр.).

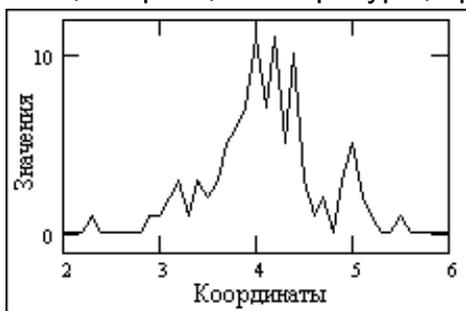


Рис. 1. Сигнал

С математической точки зрения сигнал представляет собой функцию, т. е. зависимость одной величины от другой, независимой переменной (рис. 1). По содержанию это информационная функция, несущая сообщение о физических свойствах, состоянии или поведении какой-либо физической системы, объекта или среды, а целью обработки сигналов можно считать извлечение определенных информационных сведений, которые отображены в этих сигналах (кратко — полезная или целевая информация) и преобразование этих сведений в форму, удобную для восприятия и дальнейшего использования.

Под «анализом сигналов» (analysis) имеется в виду не только их чисто математические преобразования, но и получение на основе этих преобразований выводов о специфических особенностях соответствующих процессов и объектов. Целями анализа сигналов обычно являются:

- определение или оценка числовых параметров сигналов (энергия, средняя мощность, среднее квадратическое значение и пр.);
- разложение сигналов на элементарные составляющие для сравнения свойств различных сигналов;
- сравнение степени близости, «похожести», «родственности» различных сигналов, в том числе с определенными количественными оценками.

С понятием сигнала неразрывно связан термин «регистрация сигналов», использование которого также широко и неоднозначно, как и самого термина «сигнал». В наиболее общем смысле под этим термином можно понимать операцию выделения сигнала и его преобразования в форму, удобную для дальнейшего использования. Так, при получении информации о физических свойствах каких-либо объектов, под регистрацией сигнала понимают процесс измерения физических свойств объекта и перенос результатов измерения на материальный носитель сигнала или непосредственное энергетическое преобразование каких-либо свойств объекта в информационные параметры материального носителя сигнала (как правило — электрического). Но так же широко термин «регистрация сигналов» используют и для процессов выделения

уже сформированных сигналов, несущих определенную информацию, из суммы других сигналов (радиосвязь, телеметрия и пр.), и для процессов фиксирования сигналов на носителях долговременной памяти, и для многих других процессов, связанных с обработкой сигналов.

Существует также термин «регистрация данных» (data logging). Этот термин используется для определения данных, которые проходят через систему и фиксируются на каком-либо материальном носителе или в памяти системы. Что касается процесса получения информации при помощи технических средств, обеспечивающих опытным путем нахождение соотношения измеряемой величины с принятой по определению образцовой единицей этой величины, и представление измеренного соотношения в какой-либо физической или числовой форме информационного сигнала, то для этого процесса применяют термин «детектирование».

2. Математическое описание и математические модели сигналов

Размерности сигналов. В общем случае сигналы являются многомерными функциями пространственных, временных и прочих независимых переменных. Все большее применение находят также многомерные сигналы, образованные некоторым множеством одномерных сигналов, как, например, комплексные

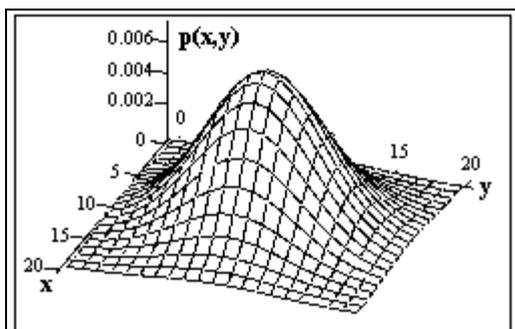


Рис. 2. Двумерный сигнал

измерения нескольких физических параметров одновременно (рис. 2).

С учетом этого при анализе и обработке сигналов многие принципы и практические методы обработки одномерных сигналов, математический аппарат которых развит достаточно глубоко, распространяются и на многомерные сигналы. Физическая природа сигналов для математического аппарата их обработки значения не имеет.

Вместе с тем обработка многомерных сигналов имеет свои особенности, и может существенно отличаться от одномерных сигналов в силу большего числа степеней свободы. Так, при дискретизации многомерных сигналов имеет значение не только частотный спектр сигналов, но и форма раstra дискретизации. Что касается порядка размерности многомерных сигналов, то ее увеличение выше двух практически не изменяет принципы и методы анализа данных, и сказывается, в основном, только на степени громоздкости формул и чисто техническом усложнении вычислений.

Математическое описание сигналов. Сигналы могут быть объектами теоретических исследований и практического анализа только в том случае, если указан способ их математического описания. Математическое описание позволяет абстрагироваться от физической природы сигнала и материальной формы его носителя, проводить классификацию сигналов, выполнять их сравнение, устанавливать степень тождества, моделировать системы обработки сигналов.

Большинство сигналов, встречающихся на практике, представлены во временной области функциями времени. При отображении сигналов на графике одной из координат (независимой) является ось времени, а другой координатой

(зависимой) — ось амплитуд. Тем самым мы получаем амплитудно-временное представление сигнала. В общем случае описание сигнала задается функциональной зависимостью определенного информационного параметра сигнала от независимой переменной (аргумента) — $s(t)$, $y(t)$ и т. п. Такая форма описания и графического представления сигналов называется динамической (сигнал в реальной динамике его поведения по аргументам). Функции математического описания сигналов могут быть как вещественными, так и комплексными. Выбор математического аппарата описания определяется простотой и удобством его использования при анализе и обработке сигналов.

Кроме динамического представления сигналов и функций в виде зависимости их значений от определенных аргументов (времени, линейной или пространственной координаты и т. п.) при анализе и обработке данных широко используется математическое описание сигналов по аргументам, обратным аргументам динамического представления. Так, например, для времени обратным аргументом является частота. Возможность такого описания определяется тем, что любой сколь угодно сложный по своей форме сигнал, не имеющий разрывов второго рода (бесконечных значений на интервале своего задания), можно представить в виде суммы более простых сигналов, и, в частности, в виде суммы простейших гармонических колебаний, что выполняется при помощи преобразования Фурье. Соответственно, математическое разложение сигнала на гармонические составляющие описывается функциями значений амплитуд и начальных фаз колебаний по непрерывному или дискретному аргументу — частоте изменения функций на определенных интервалах аргументов их динамического представления.

Каждая составляющая синусоида называется гармоникой, а набор всех гармоник называют спектральным разложением исходного сигнала.

Совокупность амплитуд гармонических колебаний разложения называют амплитудным спектром сигнала, а совокупность фаз — фазовым спектром. Оба спектра вместе образуют полный частотный спектр сигнала, который по точности математического представления тождественен динамической форме описания сигнала.

Линейные системы преобразования сигналов описываются дифференциальными уравнениями, причем для них верен принцип суперпозиции, согласно которому реакция систем на сложный сигнал, состоящий из суммы простых сигналов, равна сумме реакций от каждого составляющего сигнала в отдельности. Это позволяет при известной реакции системы на гармоническое колебание с определенной частотой определить реакцию системы на любой сложный сигнал, разложив его в ряд гармоник по частотному спектру сигнала. Широкое использование гармонических функций при анализе сигналов объясняется тем, что они являются достаточно простыми функциями и определены при всех значениях непрерывных переменных. Кроме того, они являются собственными функциями времени, сохраняющими свою форму при прохождении колебаний через любые линейные системы и системы обработки данных с постоянными параметрами (изменяются только амплитуда и фаза колебаний). Немаловажное значение имеет и то обстоятельство, что для

гармонических функций и их комплексного анализа разработан мощный математический аппарат.

Математические модели сигналов. С помощью математических моделей имеется возможность описывать свойства сигналов, которые являются главными, определяющими в изучаемых процессах, и игнорировать большое число второстепенных признаков.

Различают следующие параметры сигнала:

- структурные,
- идентифицирующие,
- информативные.

Структурные параметры определяют число степеней свободы сигнала.

Идентифицирующие параметры служат для выделения полезного сигнала среди других сигналов, не предназначенных для данного адресата.

Информативные параметры используют для кодирования передаваемой информации.

Пример. Пусть математическое описание сигнала задано выражением:

$$S = X \cdot \sin(2\pi ft + \varphi)$$

и возможные сообщения, выбираемые из множества C источником, преобразуются в передатчике в различные значения амплитуды X синусоидального колебания. В этом случае амплитуда сигнала X является *информативным параметром сигнала*.

По частоте f сигнала S обычно его выделяют среди других сигналов того же класса с другими значениями частоты. Таким образом, параметр f можно отнести к *идентифицирующим параметрам*.

Число степеней свободы по информативному параметру сигнала S в общем случае зависит от времени — параметра t , поэтому t следует рассматривать как *структурный параметр сигнала*.

Если информативный параметр X не зависит от структурного параметра t , то выбранное значение амплитуды остается неизменным на всем протяжении сигнала, т. е. каждое возможное сообщение сопоставляется с гармоническим колебанием определенной амплитуды. Таким образом, в этом случае сигнал S по информативному параметру X имеет всего лишь одну степень свободы.

Если X зависит от параметра t в выражении $S(t) = X(t) \cdot \sin(2\pi ft + \varphi)$, то сигнал $S(t)$ в принципе имеет бесконечное число степеней свободы.

По информативным параметрам (в данном примере амплитуда X) различают сигналы *дискретные* и *непрерывные*. Если множество возможных значений информативного параметра сигнала конечно, то сигнал называется *дискретным* по данному параметру. Если информативный параметр сигнала принимает бесконечное множество значений, то сигнал называется *непрерывным* по данному параметру.

Если информативный параметр не один, то сигнал может быть дискретным по одному параметру и непрерывным по другому. Поэтому используют понятие

«состояние сигнала», которое определяется тем, какие конкретные значения примут k информативных параметров по каждой степени свободы.

Число возможных состояний сигнала:

$$N = (m_1 m_2 \dots m_i \dots m_k)^n,$$

где m_i — число возможных значений i -го информативного параметра сигнала; n — число степеней свободы сигнала; k — число информативных параметров.

Из выражения ясно, что если число степеней свободы сигнала или, по крайней мере, один из сомножителей бесконечно большой, то и число состояний сигнала также будет бесконечно большим.

Для любой модели сигнала (дискретные значения или непрерывные процессы) *сущность процесса передачи информации* не меняется и состоит в следующем:

- в передатчике сообщения трансформируются в состояние сигнала;
- сигнал в канале искажается помехой, и состояние сигнала непредсказуемо изменяется;
- в приемнике по измененному состоянию сигнала принимается решение относительно переданного сообщения.

Отсюда ясно, что при восстановлении сообщения возможны ошибки, и очевидно, что вероятность возникновения ошибок будет тем меньше, чем существенней в некотором смысле различаются между собой состояния сигнала, кодирующие различные сообщения. Следовательно, для того чтобы с помощью математической модели сигнала исследовать помехоустойчивость, в ней должна быть определена степень различия между возможными состояниями сигнала.

Одним из приемов, позволяющим делать это, является представление возможных состояний сигнала в виде точек в некотором абстрактном пространстве, в котором тем или иным способом определено расстояние между любыми двумя точками.

На вход приемника поступает сигнал, искаженный помехой, которому соответствует точка x в пространстве сигнала X , отличная от той, которая была сопоставлена в передатчике передаваемому сообщению. Таким образом, в приемнике одному и тому же переданному сообщению могут соответствовать различные точки пространства сигнала.

Чтобы приемник мог принимать каждый раз решение относительно переданного сообщения, пространство сигнала должно быть классифицировано, т. е. множество X должно быть разбито на непересекающиеся подмножества (классы) C_1, C_2, \dots, C_m .

Один из способов такого разбиения, основан на выделении в пространстве сигнала *реперных точек* x_1, x_2, \dots, x_m , которые являются представителями соответствующих классов C_1, C_2, \dots, C_m (рис. 3).

В передатчике каждому передаваемому сообщению сопоставляется определенная реперная точка x_i пространства сигнала. В процессе передачи помеха переводит эту реперную точку в другую точку x пространства сигнала. В при-

емнике осуществляется процесс, который сводится к оценке расстояния между точкой x пространства сигнала X и всеми реперными точками x_1, x_2, \dots, x_m и выбору той реперной точки, до которой от точки x расстояние минимально, т. е. вычисляется:

$$\min d(x_i, x_j), \text{ для всех } i \text{ и } j \text{ от } 1 \text{ до } m.$$

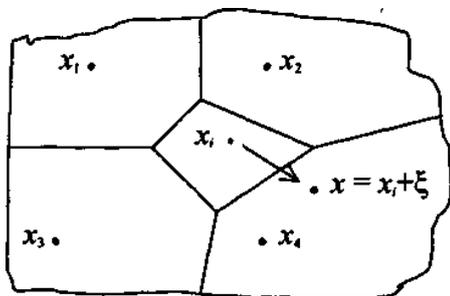


Рис. 3. Классификация пространства сигнала

Искажение сигнала в канале можно рассматривать как наложение на выбранную передатчиком реперную точку x_i некоторой помехи ξ . В результате становится доступной для анализа в приемнике точка $x = x_i + \xi$. Значения x_i и ξ неизвестны. Поэтому возникает задача так распределить реперные точки при заданном описании сообщений и помехи, чтобы выход точки $x = x_i + \xi$ за границы класса $C_i(x, x_i)$ происходил бы как можно реже (это будет означать, что переданная и полученная точки отличаются как можно меньше).

Одно из частных решений поставленной задачи.

Предположим, что в рассматриваемом пространстве сигнала необходимо разместить m реперных точек — x_1, x_2, \dots, x_m , расстояние между любой парой точек x_i и x_j :

$$d(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\| = \sqrt{(x_i - x_j, x_i - x_j)} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (\alpha_k - \beta_k)^2}, \quad (1)$$

где $\|x_i\| = \sqrt{(x_i, x_i)} = \sqrt{\sum_{k=1}^n \alpha_k^2}$ — норма вектора $x_i = \sum_{k=1}^n \alpha_k u_k$, заданного в

некотором базисе u_1, u_2, \dots, u_n ; (x_i, x_i) — скалярное произведение векторов.

Для уменьшения числа ошибок при восстановлении сообщений необходимо стремиться увеличивать расстояние между реперными точками (состояния сигнала, кодирующие различные сообщения отличаются как можно более значительно).

В теории связи квадрат нормы вектора x называют *энергией сигнала*:

$$E = \|x\|^2 = (x, x).$$

Пусть E_i — энергия сигнала x_i , а E_j — энергия сигнала x_j . Умножим левую и правую части равенства (1) на вещественное неотрицательное число λ :

$$\lambda d(x_i, x_j) = \|\lambda x_i - \lambda x_j\|.$$

Используя выражение для энергии, для сигналов λx_i и λx_j :

$$E_i^\lambda = \|\lambda x_i\|^2 = \lambda^2 \|x_i\|^2 = \lambda^2 E_i,$$

$$E_j^\lambda = \|\lambda x_j\|^2 = \lambda^2 \|x_j\|^2 = \lambda^2 E_j,$$

получим значения энергий $\lambda^2 E_i$ и $\lambda^2 E_j$ соответственно. Отсюда следует, что при пропорциональном увеличении энергии сигналов x_i и x_j расстояние между ними увеличивается. Реальная энергия сигнала всегда ограничена. Поэтому будем решать задачу оптимального распределения реперных точек в пространстве сигнала при условии равенства энергий сигналов x_1, x_2, \dots, x_m , выполняющих роль реперных точек.

Из определения расстояния в линейных пространствах со скалярным произведением векторов, имеем:

$$\begin{aligned} d^2(x_i, x_j) &= (x_i - x_j, x_i - x_j) = (x_i, x_i - x_j) - (x_j, x_i - x_j) = \\ &= (x_i, x_i) - (x_i, x_j) - (x_j, x_i) + (x_j, x_j). \end{aligned}$$

Учитывая, что $E_i = (x_i, x_i)$, а $E_j = (x_j, x_j)$, и по условию $E_i = E_j = E$ получим:

$$d^2(x_i, x_j) = 2E - 2(x_i, x_j).$$

Учитывая, что $-E \leq (x_i, x_j) \leq E$, представим скалярное произведение (x_i, x_j) в виде произведения: $\lambda_{ij} E$, где λ_{ij} — коэффициент различимости сигналов ($-1 \leq \lambda_{ij} \leq 1$):

$$d^2(x_i, x_j) = 2E(1 - \lambda_{ij}). \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что расстояние между сигналами минимально и равно нулю, когда $x_i = x_j$, при этом $(x_i, x_j) = E$, $\lambda_{ij} = 1$, $d(x_i, x_j) = 0$.

Расстояние между сигналами x_i и x_j равной энергии максимально, когда $x_i = -x_j$. В этом случае $\lambda_{ij} = -1$, а $d^2(x_i, x_j) = 4E$.

Если в пространстве сигнала необходимо разместить только две реперные точки, то вопрос об их оптимальном распределении решается весьма просто: нужно выбрать произвольный сигнал x_1 заданной энергии и в качестве второго сигнала x_2 взять сигнал $-x_1$.

Виды моделей сигналов. При анализе физических данных используются два основных подхода к созданию математических моделей сигналов.

Первый подход оперирует с детерминированными сигналами, значения которых в любой момент времени или в произвольной точке пространства являются априорно известными, могут быть достаточно точно определены (вычислены). Для описания неслучайных сигналов используются также квазидетерминированные модели, в которых значения одного или нескольких

параметров априорно неизвестны, и считаются случайными величинами с малой случайной компонентой, влиянием которой можно пренебречь.

Второй подход предполагает случайный характер сигналов, закон изменения которых во времени (или в пространстве) носит случайный характер, и которые принимают конкретные значения с некоторой вероятностью. Модель такого сигнала представляет собой описание характеристик случайного процесса путем задания законов распределения вероятностей, корреляционной функции, спектральной плотности энергии и др.

Строго говоря, детерминированных процессов и отвечающих им детерминированных сигналов в природе не существует. Даже сигналы, хорошо известные, при их регистрации всегда осложнены случайными помехами, влиянием дестабилизирующих факторов и априорно неизвестными параметрами и строением самой среды. С другой стороны, модель случайного поля часто аппроксимируется методом суперпозиции (сложения) сигналов известной формы. Детерминированные модели могут использоваться и для изучения чисто случайных процессов, если уровень полезного сигнала в этом процессе значительно выше уровня шумов.

3. Шумы и помехи

Виды шумов и помех. При детектировании сигналов, несущих целевую для данного вида измерений информацию, в сумме с основным сигналом одновременно регистрируются и мешающие сигналы — шумы и помехи самой различной природы (рис. 4). К помехам относят также искажения полезных сигналов при влиянии различных дестабилизирующих факторов на процессы измерений. Выделение полезных составляющих из общей суммы зарегистрированных сигналов или максимальное подавление шумов и помех в информационном сигнале при сохранении его полезных составляющих является одной из основных задач первичной обработки сигналов (результатов наблюдений).

В общей форме влияние помех на регистрируемый сигнал записывается в следующем виде:

$$y(t) = F(s(t), q(t)),$$

где $s(t)$ — информационная (полезная) часть сигнала; $q(t)$ — помеха.

Источники помех бывают внутренние и внешние.



Рис. 4. Сигнал с помехами

Внутренние шумы могут быть присущи физической природе источников сигналов, как, например, тепловые шумы электронных потоков в электрических цепях или дробовые эффекты в электронных приборах, или возникают в

измерительных устройствах и системах передачи и обработки сигналов от влияния различных дестабилизирующих факторов — температуры, повышенной влажности, нестабильности источников питания, влияния механических вибраций на гальванические соединения, и т. п.

Внешние источники шумов бывают искусственного и естественного происхождения. К искусственным источникам помех относятся промышленные помехи — двигатели, переключатели, генераторы сигналов различной формы и т. д. Естественными источниками помех являются молнии, флуктуации магнитных полей, всплески солнечной энергии, и т. д.

Помехи подразделяются на флуктуационные, импульсные и периодические.

Флуктуационные (шумовые) помехи представляют хаотический и беспорядочный во времени процесс в виде нерегулярных случайных всплесков различной амплитуды. Флуктуации — случайные отклонения физических величин от своих средних значений.

Импульсные помехи во многом похожи на шумовые помехи и проявляются как в виде отдельных импульсов, так и в виде последовательности импульсов, форма и параметры которых имеют случайный характер. Причинами импульсных помех являются резкие броски тока и напряжения в промышленных установках, транспортных средствах, а также природные электрические явления. Распределение импульсных помех, как правило, симметричное с произвольной плотностью распределения.

Периодические помехи вызываются периодическими низкочастотными или высокочастотными полями линий электропередач, силовых электроустановок и др. Если основная мощность помех сосредоточена на отдельных участках диапазона частот, например, на частоте напряжения промышленной сети или кратна этой частоте, то такие помехи называют сосредоточенными.

Белый шум подразумевает наличие сигнала на всех частотах, который к тому же меняется по амплитуде. Мощность в таком сигнале одинакова на всех частотах. Амплитуда на любой отдельно взятой частоте изменяется в широких пределах. Это изменение подчиняется закону распределения энергии в сигнале, известному как распределение Гаусса. На деле, это означает, что большую часть времени сигнал имеет «усреднённый» уровень, но может существенно изменяться как в большую, так и в меньшую сторону по случайному закону.

Высокочастотные помехи — это неопределенный по амплитуде и длительности сигнал в диапазоне от 100 Гц до 100 МГц, который искажает синусоиду напряжения в сети и, таким образом, негативно влияет на работу любого электрооборудования. Источниками высокочастотных помех являются различные электрические устройства: электродвигатели, генераторы, сварочные аппараты и т. п. Помехи такого рода подавляются путем установки режекторного (заградительного) фильтра.

В зависимости от характера воздействия на сигнал помехи разделяют на аддитивные и мультипликативные.

Аддитивные (налагающиеся) помехи суммируются с сигналом, не зависят от его значений и формы и не изменяют информативной составляющей самого сигнала. Как правило, аддитивные помехи порождаются флуктуациями. Природа

флуктуаций обычно определяется природой физических процессов. Многие физические величины представляют собой результаты усреднения определенных параметров физических процессов, дискретных и случайных по своей природе. Так, например, тепловой шум регистрируемого напряжения на резисторах электрических цепей обуславливается флуктуациями теплового движения носителей зарядов — случайностью процесса дрейфа отдельных электронов по резистору, по суммарной интенсивности движения которых и формируется падение напряжения на резисторе. Дискретной является природа электромагнитных видов излучения — дискретный квант энергии излучения (фотон) определен значением $h\nu$, где h — постоянная Планка; ν — частота. Флуктуации физических величин, дискретных и случайных по своей природе, принципиально неустранимы, и речь может идти только о том, чтобы уменьшать их относительную величину имеющимися в распоряжении средствами.

Действие аддитивной помехи на сигнал описывается выражением:

$$y(t) = s(t) + q(t)$$

Мультипликативные (деформирующие) помехи могут изменять форму информационной части сигнала, иметь зависимость от его значений и от определенных особенностей в сигнале и т. п. При известном характере мультипликативных помех возможна коррекция сигнала на их влияние. Природа мультипликативных помех обычно связана с изменениями условий измерений, параметров каналов передачи данных и систем их обработки, т. е. когда случайные помехи накладываются не на сам сигнал непосредственно, а на системы, в которых этот сигнал формируется и обращается, вызывая опосредствованные искажения сигнала, как линейные, так и нелинейные.

Действие мультипликативной помехи на сигнал описывается выражением:

$$y(t) = v(t)s(t)$$

где $v(t)$ — мультипликативная помеха.

В общем случае в сигнале могут присутствовать оба вида помех:

$$y(t) = v(t)s(t) + q(t)$$

Математическое описание шумов и помех. В математическом описании помехи представляются случайными функциями времени. Как правило, помехи относятся к классу стационарных случайных процессов, и характеризуются своими распределениями и моментами распределений, как их числовыми параметрами. Основное распределение большинства шумовых сигналов — нормальное (гауссов процесс). Это объясняется тем, что распределение сумм независимых случайных величин, из которых складываются случайные помехи, сходится к нормальному, вне зависимости от характера распределения слагаемых (теорема Ляпунова).

Момент распределения первого порядка выражает среднее значение (постоянную составляющую) случайного процесса:

$$M\{q\} = \bar{q} = \int_{-\infty}^{+\infty} q \cdot p(q) dq, \quad (1)$$

где $p(q)$ — плотность вероятностей значений q .

Центральный момент второго порядка определяет дисперсию процесса:

$$D\{q\} = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (q - \bar{q})^2 \cdot p(q) dq \quad . (2)$$

Дисперсия выражает мощность переменной составляющей процесса. Корень квадратный из значения дисперсии, т. е. значение σ , является средним квадратическим значением разброса случайных значений q относительно среднего значения \bar{q} .

Смешанный момент второго порядка называется функцией автокорреляции случайного процесса $q(t)$:

$$M\{q(t)q(t + \tau)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_1 \cdot x_2 \cdot p(x_1, x_2) dx_1 dx_2 = B(\tau) \quad . (3)$$

Величина $B(\tau)$ при $\tau = 0$ равна общей мощности случайного процесса $q(t)$.

На практике большинство случайных процессов обладают свойством эргодичности. Оно заключается в том, что средние значения по множеству реализаций (математические ожидания, вычисляемые по плотностям распределений (1)—(3)) совпадают со средними значениями по времени T одной реализации процесса при $T \rightarrow \infty$. Это позволяет производить оценку числовых значений параметров помех непосредственно по произвольным интервалам $[a, b]$ задания сигналов:

$$\bar{q} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt \approx \frac{1}{b-a} \int_a^b q(t) dt ,$$

$$\sigma^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (q(t) - \bar{q})^2 dt \approx \frac{1}{b-a} \int_a^b (q(t) - \bar{q})^2 dt ,$$

$$B(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T q(t)q(t + \tau) dt \approx \frac{1}{b-a} \int_a^b q(t)q(t + \tau) dt .$$

Спектральная плотность мощности случайного процесса (распределение мощности помех и шумов по частоте) связана с функцией автокорреляции преобразованием Фурье. В одностороннем (физическом) представлении спектра:

$$B(f) = 4 \int_0^{\infty} B(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau ,$$

$$B(\tau) = \int_0^{\infty} B(f) \cos 2\pi f \tau df .$$

Аддитивную помеху с равномерным спектром $B(f) = B_0 = const$ называют белым шумом. Мощность белого шума в полосе частот 0—F пропорциональна ширине полосы:

$$P_F = \int_0^F B(f) df = B_0 F$$

При белом шуме полоса частот всегда полагается конечной, т.к. в противном случае мы получим бесконечную мощность шумов.

Сигнал с аддитивной помехой обычно характеризуют не абсолютной мощностью помехи, а отношением средних мощностей сигнала и помехи, которое кратко называют отношением сигнал-помеха:

$$S/N = \left(\frac{P_S}{P_N} \right),$$

где P_S — мощность полученного сигнала; P_N — мощность уровня шумов.

Значения случайных процессов являются некоррелированными только при неограниченной полосе частот. Любое ограничение частотной полосы вносит определенную корреляцию в процесс и независимыми друг от друга можно считать только значения процесса, отстоящие друг от друга как минимум на интервал корреляции τ_0 :

$$\tau_0 = \frac{2}{P_F} \int_0^{\infty} B(t) dt = \frac{F}{2}$$

Лекция № 2 Классификация сигналов

- 1) Классификация сигналов
- 2) Типы сигналов
- 3) Преобразования типа сигналов

1. Классификация сигналов

Классификация сигналов приведена на рис. 1.



Рис. 1. Классификация сигналов

С математических позиций группы сигналов обычно называют множествами, в которые объединяют сигналы по какому-либо общему свойству.

Принадлежность сигнала s к множеству L_p записывается в виде $L_p = \{s, P\}$, где P — определенное свойство данного множества сигналов.

Классификация детерминированных сигналов. Обычно выделяют два класса детерминированных сигналов: периодические и непериодические.

К множеству периодических относят гармонические и полигармонические сигналы. Для периодических сигналов выполняется общее условие $s(t) = y(t + kT)$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ — любое целое число (из множества целых чисел от $-\infty$ до $+\infty$); T — период, являющийся конечным отрезком независимой переменной.

Гармонические сигналы (синусоидальные), описываются следующими формулами (рис. 2):

$$s(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad s(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где $A_0, f_0, \omega_0, \varphi_0$ — постоянные величины, которые могут исполнять роль

информационных параметров сигнала: A_0 — амплитуда сигнала; $f_0 = \frac{1}{T}$ —

циклическая частота в герцах; $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T}$ — угловая частота в радианах; T — период одного колебания.

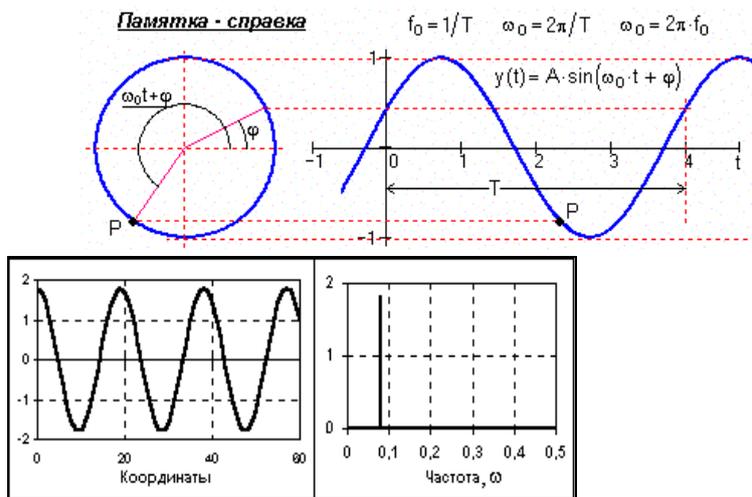


Рис. 2. Гармонический сигнал и спектр его амплитуд

Полигармонические сигналы составляют наиболее широко распространенную группу периодических сигналов и описываются суммой гармонических колебаний:

$$s(t) = \sum_{i=0}^N A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i)$$

где T_p — период одного полного колебания сигнала. Значение $f_p = \frac{1}{T_p}$ называют фундаментальной частотой колебаний. На периоде фундаментальной частоты f_p , которая равна или кратно меньше минимальной частоты гармоник, укладывается кратное число периодов всех гармоник, что и создает периодичность повторения сигнала.

Информационными параметрами полигармонического сигнала могут быть как определенные особенности формы сигнала (размах от минимума до максимума, отклонение от среднего значения, и т. п.), так и параметры определенных гармоник в этом сигнале. Так, например, для прямоугольных импульсов информационными параметрами могут быть период повторения импульсов, длительность импульсов, скважность импульсов (отношение периода к длительности).

К непериодическим сигналам относят почти периодические и аperiodические сигналы.

Почти периодические сигналы близки по своей форме к полигармоническим (рис. 3). Они также представляют собой сумму двух и более гармонических сигналов, но не с кратными, а с произвольными частотами, вследствие чего

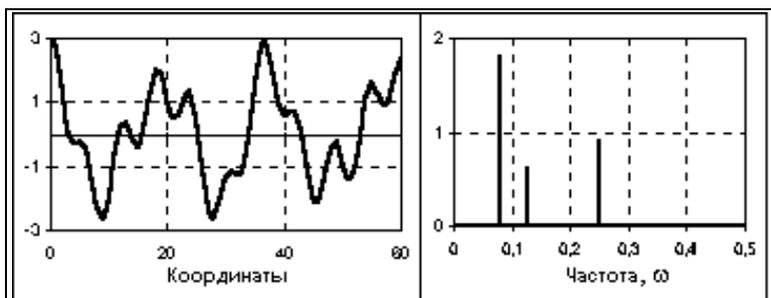


Рис. 3. Почти периодический сигнал и спектр его амплитуд

фундаментальный период суммарных колебаний бесконечно велик.

Апериодические сигналы задаются произвольными функциями времени. На рис. 4 показан пример апериодического сигнала, заданного формулой на интервале $(0, \infty)$:

$$s(t) = \exp(-at) - \exp(-bt),$$

где a, b — константы, в

данном случае $a = 0,15, b = 0,17$.

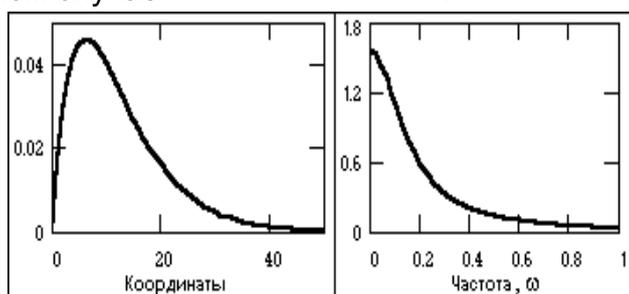


Рис. 4. Апериодический сигнал и модуль спектра

К апериодическим относятся также импульсные сигналы, которые представляют собой сигналы определенной и достаточно простой формы, существующие в пределах конечных временных интервалов (рис. 5).

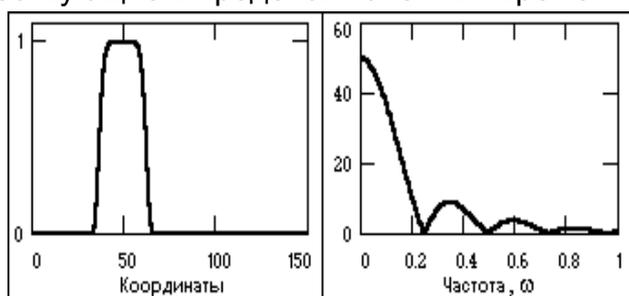


Рис. 5. Импульсный сигнал и модуль спектра

Частотный спектр апериодических сигналов непрерывен и может содержать любые гармоники в частотном интервале $(0, \infty)$.

В классе импульсных сигналов выделяют подкласс радиоимпульсов. Пример радиоимпульса приведен на рис. 6.

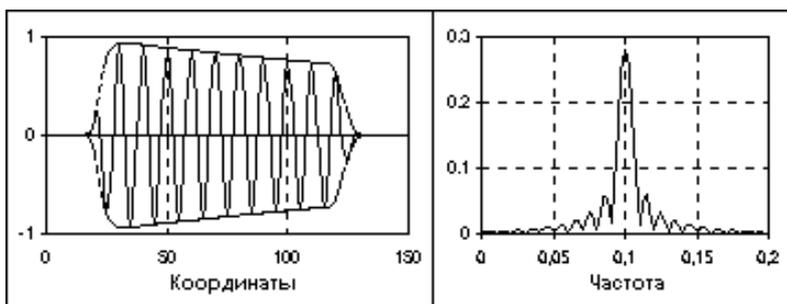


Рис. 6. Радиоимпульс и модуль его спектра

Уравнение радиоимпульса имеет вид:

$$s(t) = u(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0),$$

где $\cos(2\pi f_0 t + \varphi_0)$ — гармоническое колебание заполнения радиоимпульса; $u(t)$ — огибающая радиоимпульса. Положение главного пика спектра радиоимпульса на частотной шкале соответствует частоте заполнения f_0 , а его ширина определяется длительностью радиоимпульса. Чем больше длительность радиоимпульса, тем меньше ширина главного частотного пика.

Классификация случайных сигналов. Случайным сигналом называют функцию времени, значения которой заранее неизвестны, и могут быть предсказаны лишь с некоторой вероятностью. Случайный сигнал отображает случайное физическое явление или физический процесс, причем, зарегистрированный в единичном наблюдении, сигнал не воспроизводится при повторных наблюдениях и не может быть описан явной математической зависимостью. При регистрации случайного сигнала реализуется только один из возможных вариантов (исходов) случайного процесса, а достаточно полное и точное описание процесса в целом можно произвести только после многократного повторения наблюдений и вычисления определенных характеристик ансамбля реализаций сигнала. В качестве основной характеристики случайных сигналов принимают закон распределения вероятности нахождения величины сигнала в определенном интервале значений.

2. Типы сигналов

Выделяют следующие типы сигналов, которым соответствуют определенные формы их математического описания.

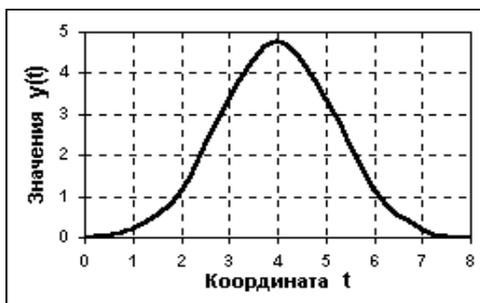


Рис. 7. Аналоговый сигнал

Аналоговый сигнал (analog signal) является непрерывной функцией непрерывного аргумента, т. е. определен для любого значения аргументов. Источниками аналоговых сигналов, как правило, являются физические процессы и

явления, непрерывные в динамике своего развития во времени, в пространстве или по любой другой независимой переменной, при этом регистрируемый сигнал подобен («аналогичен») порождающему его процессу. Пример математической

$$y(t) = 4,8 \exp\left(-\frac{(t-4)^2}{2,8}\right)$$

записи сигнала: . Пример графического отображения данного сигнала приведен на рис. 7. Множество возможных значений сигнала образует континуум — непрерывное пространство, в котором любая точка может быть определена с точностью до бесконечности. Примеры сигналов, аналоговых по своей природе: изменение напряженности электрического, магнитного, электромагнитного поля во времени и в пространстве.

Дискретный сигнал (discrete signal) по своим значениям также является непрерывной функцией, но определенной только по дискретным значениям аргумента. По множеству своих значений он является конечным (счетным) и описывается дискретной последовательностью отсчетов (samples) $y[n\Delta t]$, где Δt — интервал между отсчетами (шаг дискретизации, sample time); $n = 0, 1, 2, \dots, N$.

$$f = \frac{1}{\Delta t}$$

Величина, обратная шагу дискретизации: $f = \frac{1}{\Delta t}$, называется частотой дискретизации (sampling frequency). Пример дискретизации аналогового сигнала, приведенного на рис. 7, представлен на рис. 8. При $\Delta t = const$ реализуется равномерная дискретизация, иначе — неравномерная дискретизация сигнала.

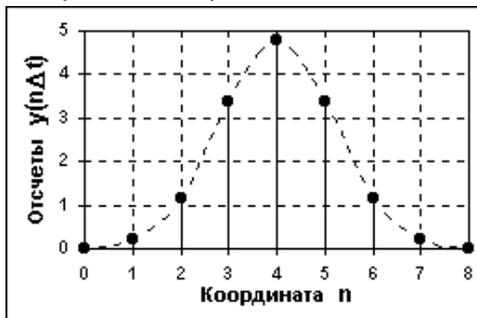


Рис. 8. Дискретный сигнал

Цифровой сигнал (digital signal) квантован по своим значениям и дискретен по аргументу. Он описывается функцией $y_n = Q_k(y[n\Delta t])$, где Q_k — функция квантования с числом уровней квантования k , при этом интервалы квантования могут быть как с равномерным распределением, так и с неравномерным, например — логарифмическим.



Рис. 9. Цифровой сигнал

По существу, цифровой сигнал по своим значениям (отсчетам) является разновидностью дискретного сигнала при округлении отсчетов последнего до определенного количества цифр, как это показано на рис 9. Цифровой сигнал конечен по множеству своих значений.

В системах цифровой обработки данных и в ЭВМ сигнал всегда представлен с точностью до определенного количества разрядов, а, следовательно, всегда является цифровым. С учетом этих факторов при описании цифровых сигналов функция квантования обычно опускается (подразумевается равномерной по умолчанию), а для описания сигналов используются правила описания дискретных сигналов.

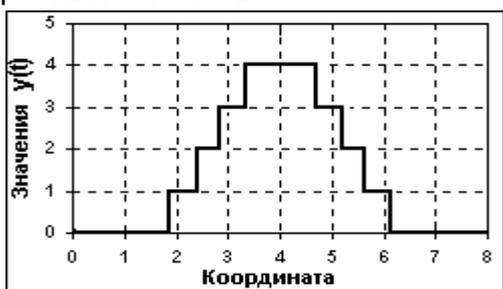


Рис. 10. Дискретно-аналоговый сигнал

В принципе, квантованными по своим значениям могут быть и аналоговые сигналы, зарегистрированные соответствующей аппаратурой (рис. 10), которые принято называть дискретно-аналоговыми. Но выделять эти сигналы в отдельный тип не имеет смысла — они остаются аналоговыми кусочно-непрерывными сигналами с шагом квантования, который определяется допустимой погрешностью измерений.

3. Преобразования типа сигналов

На разных этапах процессов получения и обработки информации материальное представление сигналов в устройствах регистрации и обработки и формы их математического описания при анализе данных могут изменяться путем соответствующих операций преобразования типа сигналов.

Операция дискретизации (discretization) осуществляет преобразование аналоговых сигналов (функций), непрерывных по аргументу, в функции мгновенных значений сигналов по дискретному аргументу. Дискретизация обычно производится с постоянным шагом по аргументу (равномерная дискретизация), при этом $y(t) \rightarrow y[n\Delta t]$, где значения $y[n\Delta t]$ представляют собой отсчеты функции $y(t)$ в моменты времени $t = n\Delta t$, $n = 0, 1, 2, \dots, N$. Частота, с которой выполняются замеры аналогового сигнала, называется частотой дискретизации. В общем случае, сетка отсчетов по аргументу может быть произвольной или задаваться по определенному закону. В результате дискретизации непрерывный (аналоговый) сигнал переводится в последовательность чисел.

Операция восстановления аналогового сигнала из его дискретного представления обратна операции дискретизации и представляет, по существу, интерполяцию данных.

Дискретизация сигналов может приводить к определенной потере информации о поведении сигналов в промежутках между отсчетами. Однако

существуют условия, определенные теоремой Котельникова, согласно которым аналоговый сигнал с ограниченным частотным спектром может быть без потерь информации преобразован в дискретный сигнал, и затем абсолютно точно восстановлен по значениям своих дискретных отсчетов.

Как известно, любая непрерывная функция может быть разложена на конечном отрезке в ряд Фурье, т. е. представлена в спектральной форме — в виде суммы ряда синусоид. Говорят, что сигнал имеет ограниченный спектр, если после определенной частоты F все коэффициенты спектра равны нулю, т. е. сигнал представляется в виде конечной суммы ряда Фурье.

Теоремой Котельникова устанавливается, что если спектр сигнала ограничен частотой F_m , то после дискретизации сигнала с частотой дискретизации $f_k \geq 2F_m$ можно восстановить исходный непрерывный сигнал по полученному цифровому сигналу абсолютно точно. Тогда шаг дискретизации должен удовлетворять

$$\Delta t \leq \frac{1}{2F_m} = \frac{1}{f_k}.$$

следующему неравенству:

На практике эта теорема имеет огромное значение. Например, известно, что диапазон звуковых сигналов, воспринимаемых человеком, не превышает 20 кГц. Следовательно, при дискретизации записанных звуковых сигналов с частотой не менее 40 кГц мы можем точно восстановить исходный аналоговый сигнал по его цифровым отсчетам, что и выполняется в проигрывателях компакт-дисков для восстановления звука. Частота дискретизации звукового сигнала при записи на компакт-диск составляет 44100 Гц.

Пример 1. Для качественной передачи голоса по дискретному каналу используют частоту дискретизации амплитуды звуковых колебаний $f_k = 8000$ Гц. Это связано с тем, что в аналоговой телефонии для передачи голоса был выбран диапазон от 300 до 3400 Гц, который достаточно качественно передает все основные гармоники голосов. В соответствии с теоремой Котельникова для качественной передачи голоса достаточно выбрать частоту дискретизации, в два раза превышающую самую высокую гармонику непрерывного сигнала, т. е.:

$$f_k = 2F_m = 2 \cdot 3400 = 6800 \text{ Гц.}$$

Выбранная в действительности частота дискретизации 8000 Гц обеспечивает некоторый запас качества.

Операция квантования по уровню или аналого-цифрового преобразования (АЦП; Analog-to-Digital Converter, ADC) заключается в преобразовании дискретного сигнала (последовательности отчетов аналогового сигнала) в конечное число цифровых значений — в цифровой сигнал. Устройство, которое выполняет подобную функцию, называется аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

Квантование представляет собой округление значения амплитуды, т. е. замену этого значения одним из разрешенных значений, отстоящих друг от друга на конечные интервалы. Шкала разрешенных значений называется шкалой квантования, а интервал между значениями — шагом квантования. Чем меньше шаг квантования, тем выше качество преобразования. Шкала квантования

определяется разрядностью АЦП. Следовательно, по линии передаются не сами значения амплитуды сигнала, а номера уровней.

Возникающие при квантовании ошибки округления отсчетов называются шумами (noise) или ошибками (error) квантования (quantization).

Пример 2. Необходимо передать сигнал со значениями амплитуды в диапазоне от 0 до X_{\max} . Если используется 8 разрядное АЦП, то уровней квантования будет 256 (от 0 до 255), если 7 разрядное, то уровней квантования будет 128 (от 0 до 127) ($2^8=256$, $2^7=128$).

Тогда квантованное значение амплитуды каждого замера определяется из пропорции:

$$\frac{X_{\text{квант}}^i}{255} = \frac{X_{\text{замер}}^i}{X_{\max}}, \quad X_{\text{квант}}^i = \frac{X_{\text{замер}}^i \cdot 255}{X_{\max}},$$

или

$$\frac{X_{\text{квант}}^i}{127} = \frac{X_{\text{замер}}^i}{X_{\max}}, \quad X_{\text{квант}}^i = \frac{X_{\text{замер}}^i \cdot 127}{X_{\max}},$$

где $X_{\text{квант}}^i$ — квантованное значение амплитуды i -го замера; $X_{\text{замер}}^i$ — амплитуда i -го замера; X_{\max} — максимальное значение амплитуды сигнала.

При этом точность квантования будет равна $\delta = \frac{X_{\max}}{2^8} = \frac{X_{\max}}{256}$, поскольку

число уровней квантования равно 256 (от 0 до 255) или $\delta = \frac{X_{\max}}{2^7} = \frac{X_{\max}}{128}$ при числе уровней квантования 128 (от 0 до 127). Таким образом, точность квантования равна высоте сетки квантования.

(Операция цифро-аналогового преобразования ЦАП; Digital-to-Analog Converter, DAC) обратна операции квантования, при этом на выходе регистрируется либо дискретно-аналоговый сигнал, который имеет ступенчатую форму (рис. 10), либо непосредственно аналоговый сигнал.

Так как квантование сигналов всегда выполняется с определенной и неустранимой погрешностью (не более половины интервала квантования), то операции АЦП и ЦАП не являются взаимно обратными с абсолютной точностью.

Пример 3. Передача непрерывного сигнала в дискретном виде требует от сетей жесткого соблюдения временного интервала в 125 мкс (соответствующего

$$\Delta t = \frac{1}{f_k} = \frac{1}{8000} = 125 \cdot 10^{-6}$$

частоте дискретизации 8000 Гц: с) между соседними замерами, т. е. синхронной передачи данных между узлами сети. При несоблюдении синхронности прибывающих замеров исходный сигнал восстанавливается неверно, что приводит к искажению голоса, изображения или другой мультимедийной информации, передаваемой по цифровым сетям. Так, искажение синхронизации в 10 мс может привести к эффекту «эха», а сдвиги

между замерами в 200 мс приводят к потере распознаваемости произносимых слов.

В то же время потеря одного замера при соблюдении синхронности между остальными замерами практически не сказывается на воспроизводимом звуке после цифро-аналогового преобразования на приемной стороне. Это происходит за счет сглаживающих устройств в цифро-аналоговых преобразователях, основанных на свойстве инерционности любого физического процесса — амплитуда звуковых колебаний не может мгновенно измениться на большую величину.

На качество сигнала на выходе ЦАП влияет не только синхронность поступления на его вход замеров, но и погрешность дискретизации амплитуд этих замеров. Воспроизводимый в приемнике сигнал не совпадает в точности с оригинальным сигналом. Дело в том, что из-за конечного числа уровней квантования вершина дискрета (значение функции в каждый момент времени) может занимать произвольное положение внутри интервала квантования. В приемнике же значение восстановленного сигнала располагается в середине интервала квантования.

Алиасинг (aliasing). А что произойдет, если спектр аналогового сигнала был неограниченным или имел частоту, выше частоты дискретизации?



Рис. 11. Появление кажущейся частоты при дискретизации

Предположим, что при записи акустического сигнала оркестра в помещении от какого-то устройства присутствует ультразвуковой сигнал с частотой 30 кГц. Запись выполняется с дискретизацией сигнала на выходе микрофона с типовой частотой 44,1 кГц. При прослушивании такой записи с использованием ЦАП мы

услышим шумовой сигнал на частоте $30 - \frac{44,1}{2} \approx 8$ кГц. То есть частоты, лежащие

выше половины частоты дискретизации $\frac{44,1}{2} = 22,05$, отразились в нижнюю часть спектра и сложились с присутствующими там гармониками. Это так называемый эффект появления ложных (кажущихся) частот. Эффект аналогичен всем известному эффекту обратного вращения колес автомобиля на экранах кино и телевизоров, когда скорость их вращения начинает превышать частоту смены кадров. Природу эффекта можно наглядно видеть на рис. 11. Аналогично в главный частотный диапазон дискретных сигналов «отражаются» от частоты дискретизации и все высокочастотные шумы, присутствующие в исходном аналоговом сигнале.

Для предотвращения алиасинга следует повышать частоту дискретизации или ограничить спектр сигнала перед оцифровкой фильтрами низких частот (НЧ-

фильтры, low-pass filters), которые пропускают без изменения все частоты, ниже заданной, и подавляют в сигнале частоты, выше заданной. Эта граничная частота называется частотой среза (cutoff frequency) фильтра. Частота среза анти-алиасинговых фильтров устанавливается равной половине частоты дискретизации. В реальные АЦП почти всегда встраивается анти-алиасинговый фильтр.

Лекция № 3 Классификация систем передачи данных

- 1) Локальные и глобальные вычислительные сети
- 2) Модель открытых систем OSI
- 3) Основные понятия теории передачи данных
- 4) Классификация систем передачи данных

1. Локальные и глобальные вычислительные сети

Телекоммуникационные системы и системы сетевой связи начали широко развиваться в процессе информационно-технологической революции и компьютеризации всех сфер хозяйственной деятельности человечества. Их основная задача — объединение компьютеров и других устройств в сетевые ассоциации для коллективного использования вычислительных, информационных и других ресурсов.

По территориальной принадлежности различают локальные сети (предприятий и организаций), региональные (районы и города) и глобальные. В глобальных сетях выделяют сети доступа (соединяющие близко расположенные друг к другу узлы) и магистральные сети (объединяющие узлы друг с другом).

Общепринятое название обменной информации — сообщение.

Характерные понятия сети.

Протокол — набор правил взаимодействия, определяющих способ кодирования информации и передачи служебных данных.

Интерфейс — устройство для приема-передачи информации и набор методов взаимодействия приемо-передающих устройств, в том числе между программными компонентами.

Маршрутизация — определение маршрута передачи сообщения в сложных сетях.

Кодирование — изменение формы представления информации с целью ее передачи, хранения или обработки.

Мультиплексирование — использование одного канала связи для передачи данных нескольких абонентов.

Основное отличие локальной сети от территориально распределенных сетей заключается в использовании оборудования, не требующего специальных мер коррекции ошибок и сжатия информации.

Локальные вычислительные сети организуют в виде сети Intranet, то есть внутренней сети, построенной на основе тех же протоколов, программного обеспечения, средств доступа и защиты информации, что и глобальная сеть Internet.

Управление различными службами в локальной сети осуществляется с использованием серверов. Сервер — это один из включенных в сеть компьютеров, располагающий программными и аппаратными мощностями достаточными для выполнения какого-либо обслуживания.

Пропускная способность локальных сетей зависит от количества включенных в них активно действующих объектов — серверов, рабочих станций, интеллектуальных устройств. При увеличении информационных потоков может

резко возрасти время доставки сообщений. Для устранения этого используется специализированное программное обеспечение серверов.

В качестве аппаратных мер по предотвращению заторов с помощью специального коммуникационного оборудования разделяют сеть на части, в которые входят наиболее активно взаимодействующие между собой объекты. Такое деление называют сегментацией.

Глобальные телекоммуникационные сети — это сети, имеющие всемирный, международный характер и соединяющие неограниченное число пользователей независимо от их географического положения.

Развитие сетевых технологий происходит по следующим направлениям:

- повышение пропускной способности сетей и увеличение скорости передачи информации;
- интеллектуализация телекоммуникационных сетей;
- внедрение беспроводных сетевых технологий и построение локальных и глобальных мобильных мультимедийных сетей.

Повышение скорости передачи информации и пропускной способности сетей необходима для:

- высококачественной передачи изображений, в том числе телевизионных;
- передачи мультимедиа-информации;
- организации взаимосвязи сетей различных уровней.

Интеллектуализация сетей предусматривает:

- упрощение доступа к услугам связи;
- помощь в принятии решения по управлению ресурсами сети;
- преодоление языкового барьера.

2. Модель открытых систем OSI

Для совместимости сетей используются стандарты, объединенные в семиуровневую модель открытых систем, определяющую правила взаимодействия компонентов сети на уровне (протокол уровня) и правила взаимодействия компонентов различных уровней (межуровневый интерфейс). Такая модель названа OSI (Open System Interconnection — связь открытых систем).

Открытой системой называется система (компьютер, вычислительная сеть, ОС, программный пакет, другие аппаратные и программные продукты), которая построена в соответствии с открытыми спецификациями.

Спецификация (в вычислительной технике) — формализованное описание аппаратных (или программных) компонентов, способов их функционирования, взаимодействия с другими компонентами; условий эксплуатации, ограничений и особых характеристик.

Под открытыми спецификациями понимаются опубликованные, общедоступные спецификации.

Главная идея модели состоит в том, что вся процедура сетевого взаимодействия разбивается на некоторое количество стандартных шагов, последовательно выполняющихся программным и аппаратным обеспечением

компьютера для передачи и при приеме данных. Для описания действий, выполняемых на каждом таком шаге, вводится понятие уровня.

Модель OSI описывает функции семи иерархических уровней и интерфейсы взаимодействия между ними (рис. 1).

Чем ниже (ближе к физической среде передачи) уровень, тем больше доля аппаратной части в его реализации. Модель построена так, что объекты одного уровня двух взаимодействующих компьютеров сообщаются непосредственно друг с другом с помощью соответствующих протоколов. Задача объектов — предоставить определенный сервис вышестоящему уровню, используя сервис, который предоставляет нижележащий уровень.



Рис. 1. Модель открытых систем OSI

Протокол — набор правил взаимодействия, определяющих способ кодирования информации и передачи служебных данных.

Протоколы сетевого взаимодействия можно классифицировать по степени близости к физической среде передачи данных:

- нижнего уровня, распространяемые на канальный и физический уровни модели OSI;
- среднего уровня, распространяемые на сетевой, транспортный и сеансовый уровни OSI;
- верхнего уровня, распространяемые на уровень представления и прикладной уровень модели OSI.

Физический уровень реализует физическое управление и относится к физической цепи, например телефонной, по которой передается информация. На этом уровне модель OSI определяет физические, электрические, функциональные и процедурные характеристики цепей связи, а также требования к сетевым адаптерам и модемам.

На канальном уровне осуществляется управление каналом и реализуется пересылка блоков (совокупности битов) информации. Осуществляет такие процедуры управления, как определение начала и конца блока, обнаружение ошибок передачи, адресация сообщений и др. Канальный уровень определяет правила совместного использования аппаратных средств компьютерами сети.

Сетевой уровень относится к виртуальной цепи. Программные средства данного уровня обеспечивают определение маршрута передачи пакетов в сети.

На сетевом уровне модели OSI функционируют маршрутизаторы, обеспечивающие поиск оптимального маршрута на основе анализа адресной информации.

Транспортный уровень. Первые три уровня образуют общую сеть, в которой коллективно могут работать многие пользователи. На транспортном уровне контролируется очередность пакетов сообщений и их принадлежность.

На сеансовом уровне координируются и стандартизируются процессы установления сеанса, управления передачей и приемом пакетов сообщений, завершения сеанса. Между компьютерами устанавливается и завершается виртуальная связь по такому же принципу, как при голосовой телефонной связи.

Уровень представления. Программные средства этого уровня выполняют преобразования данных из внутреннего формата передающего компьютера во внутренний формат компьютера-получателя, если эти форматы отличаются друг от друга. Данный уровень включает функции, относящиеся к набору символов, кодированию данных и способам представления данных на экранах дисплеев или печати. Также на данном уровне осуществляется сжатие передаваемых данных и их распаковка.

Прикладной уровень выполняет функции, которые обеспечивают поддержку пользователю, например:

- организация доступа к общим сетевым ресурсам: информации, памяти, программным приложениям, внешним устройствам (принтерам и др.);
- общее управление сетью (управление конфигурацией, разграничение доступа, восстановление работоспособности после сбоев и отказов, управление производительностью);
- передача электронных сообщений;
- организация электронных конференций.

При продвижении пакета с данными по уровням сверху вниз каждый новый уровень добавляет к пакету свою служебную информацию в виде заголовка и, возможно, окончания (трейлера). Эта операция называется инкапсуляцией данных верхнего уровня в пакет нижнего уровня.

При получении пакета от нижнего уровня он разделяется на заголовок, трейлер и данные. Служебная информация из заголовка и трейлера анализируется, и в соответствии с ней принимается решение, что делать с данными, содержащимися в полученном пакете.

3. Основные понятия теории передачи данных

Для передачи информации используют материальный носитель — сигнал. Различают статические и динамические сигналы.

Статические сигналы предназначены для передачи информации во времени, т. е. для хранения информации с последующим ее использованием.

Динамические сигналы — для передачи информации в пространстве.

Любой сигнал неразрывно связан с определенной материальной системой, называемой системой связи или системой передачи информации (рис. 2).



Рис. 2. Обобщенная схема системы передачи информации

С источником информации связано определенное множество сообщений. Генерация некоторого сообщения заключается в случайном выборе одного сообщения из множества возможных. Какое это конкретно будет сообщение, заранее неизвестно для получателя. Известно лишь, что сообщение принадлежит определенному множеству.

Сообщение, принадлежащее конечному множеству возможных значений, называется дискретным, а сообщение, выбираемое из бесконечного множества — непрерывным.

Передатчик преобразует сообщение в передаваемый сигнал. В передатчике каждое из сообщений на входе преобразуется в значение сигнала на выходе по строго определенному правилу, в зависимости от типов сообщений и сигналов (модуляция, кодирование).

Линия связи — собственно физическая среда (medium), по которой передаются сигналы. Одна и та же линия связи может служить одновременно для реализации одного или нескольких каналов связи (многоканальная связь).

Канал связи — средство односторонней передачи данных. Примером канала может служить полоса частот, выделенная одному передатчику при радиосвязи. В некоторой линии можно образовать несколько каналов связи, по каждому из которых передается своя информация. При этом говорят, что линия разделяется между несколькими каналами. Существует два метода разделения линии передачи данных:

- частотное мультиплексирование (FDM Frequency Division Method), при котором каждому каналу выделяется некоторая полоса частот;

- временное мультиплексирование (разделение по времени или TDM Time Division Method), при котором каждому каналу выделяется некоторый квант времени.

Принимаемый сигнал на выходе канала связи отличается от входного передаваемого сигнала из-за наложения помехи на полезный сигнал. Приемник осуществляет восстановление переданного источником информации сообщения по принятому сигналу. Данная операция возможна, если известно правило преобразования сообщения в сигнал. На его основании вырабатывается правило обратного преобразования сигнала в сообщение (демодуляция, декодирование). Вследствие искажения принятого сигнала возможна ошибка при восстановлении сообщения.

Получатель в системах передачи информации — это либо непосредственно человек, либо технические средства, связанные с человеком.

Выделяют три основных разновидности каналов связи:

— симплексный — при связи приемника с передатчиком по одному каналу, с однонаправленной передачей информации (например, в телевизионной и радиовещательной сетях);

— полудуплексный — когда два узла связи соединены одним каналом, по которому информация передается попеременно то в одном направлении, то в противоположном (в информационно-справочных системах);

— дуплексный — позволяет передавать данные одновременно в двух направлениях за счет использования четырехпроводной линии связи (два провода для передачи, два других – для приема данных), или двух полос частот.

Для повышения достоверности передачи данных основной канал может снабжаться дополнительным (обратным) каналом небольшой пропускной способности (на 1—2 порядка меньше основного, с неширокой подполосой), который используется для передачи служебной информации. По этому каналу передаются, например, сигналы подтверждения приема блоков данных и запросы на повторную передачу блоков при обнаружении ошибок.

Различают также выделенные и коммутируемые на время передачи информации каналы связи. При использовании выделенных каналов связи приемопередающая аппаратура узлов связи постоянно соединена между собой. Этим обеспечивается высокая степень готовности системы к передаче информации, более высокое качество связи. Для коммутируемых каналов связи, создаваемых только на время передачи фиксированного объема информации, характерна сравнительно небольшая стоимость (при малом объеме трафика), однако при этом имеют место потери времени на коммутацию (на установление связи между абонентами) и блокировки при занятых участках линий связи.

4. Классификация систем передачи данных

Системы передачи данных			
По организации передачи данных	По использованию физической среды	По обеспечению приоритетов	По обеспечению качества
1. С коммутацией каналов	1. Электрическая	1. С абсолютным приоритетом	1. С системным обеспечением качества
2. С коммутацией сообщений	2. Электромагнитная	2. С относительным приоритетом	2. Без системного обеспечения качества
3. С коммутацией пакетов	3. Оптическая	3. С динамическим приоритетом	
	4. Акустическая	4. Без приоритета	

Лекция № 4 Аппаратура и типы линий связи

- 1) Аппаратура линий связи
- 2) Типы линий связи и стандарты кабелей
- 3) Проблема электромагнитной совместимости

1. Аппаратура линий связи

Аппаратура пользователя линии связи, вырабатывающая данные для передачи по линии связи и подключаемая непосредственно к аппаратуре передачи данных, обобщенно носит название оконечное оборудование данных (ООД или DTE). Примером DTE могут служить компьютеры. Эту аппаратуру не включают в состав линии связи.

Аппаратура передачи данных (АПД или DCE) непосредственно связывает компьютеры с линией связи и является пограничным оборудованием (рис. 1). Аппаратуру передачи данных включают в состав линии связи. Примерами DCE являются модемы. Обычно DCE работает на физическом уровне, отвечая за передачу и прием сигнала нужной формы и мощности в физическую среду.



Рис. 1. Состав линии связи

Промежуточная аппаратура обычно используется на линиях связи большой протяженности. Промежуточная аппаратура решает две основные задачи:

- улучшение качества сигнала;
- создание постоянного составного канала связи между двумя абонентами сети.

В локальных сетях промежуточная аппаратура может совсем не использоваться, если протяженность физической среды (кабелей) позволяет одному сетевому адаптеру принимать сигналы непосредственно от другого сетевого адаптера, без промежуточного усиления.

В глобальных сетях необходимо обеспечить качественную передачу сигналов на расстояния в сотни и тысячи километров, поэтому необходимо использовать усилители сигналов.

В глобальной сети необходима также и промежуточная аппаратура другого рода — мультиплексоры, демultipлексоры и коммутаторы (позволяют увеличить полосу пропускания и уменьшить время задержки обработки информации, с его помощью можно сегментировать локальную сеть). Эта аппаратура решает вторую указанную задачу, то есть создает между двумя абонентами сети составной канал из некоммутируемых отрезков физической среды — кабелей с усилителями.

В зависимости от типа промежуточной аппаратуры все линии связи делятся на аналоговые и цифровые. В аналоговых линиях промежуточная аппаратура предназначена для усиления аналоговых сигналов, то есть сигналов, которые имеют непрерывный диапазон значений. Такие линии связи традиционно применялись в телефонных сетях.

В цифровых линиях связи передаваемые сигналы имеют конечное число состояний. Сигнал, передаваемый за один такт работы передающей аппаратуры, имеет 2 или 3 состояния, которые передаются в линиях связи импульсами прямоугольной формы. С помощью таких сигналов передаются как компьютерные данные, так и оцифрованные речь и изображение.

В цифровых каналах связи используется промежуточная аппаратура, которая улучшает форму импульсов и восстанавливает период их следования.

2. Типы линий связи и стандарты кабелей

В зависимости от среды передачи данных различают следующие линии связи:

- проводные (воздушные);
- кабельные;
- радиоканалы наземной и спутниковой связи.

При выборе типа кабеля учитываются следующие показатели:

- стоимость монтажа и обслуживания;
- ограничение на длину коммуникаций без дополнительных усилителей;
- безопасность передачи данных.

Проводные (воздушные) линии связи представляют собой провода без изолирующих или экранирующих оплеток (роль изолятора играет слой воздуха) проложенные между столбами и висящие в воздухе. Проводники выполняются, в основном, из биметаллической сталемедной (сталеалюминовой) проволоки. Внутренний диаметр стальной проволоки обычно составляет 1,2—4 мм, толщина внешнего слоя меди (алюминия) — 0,04—0,2 мм. Проволока подвешивается на деревянных или железобетонных опорах с помощью фарфоровых изоляторов. Используемый частотный диапазон воздушных линий связи не превышает 150 кГц. По таким линиям связи традиционно передают телефонные или телеграфные сигналы, но используют и для передачи компьютерных данных. Скоростные качества и помехозащищенность этих линий не высокие.

Кабельные линии. Кабель состоит из проводников, заключенных в несколько слоев изоляции. В системах телекоммуникации и компьютерных сетях применяют три основных типа кабеля:

- симметричные кабели (витая пара);
- коаксиальные кабели;
- оптоволоконные кабели (волоконно-оптические кабели).

Кабели должны удовлетворять определенным стандартам, что позволяет строить кабельную систему сети из кабелей и соединительных устройств разных производителей. Современные стандарты определяют характеристики не отдельного кабеля, а полного набора элементов, необходимого для создания кабельного соединения. Сегодня наиболее распространенными стандартами

являются: американский стандарт EIA/TIA—568A, международный стандарт ISO/IEC 11801, европейский стандарт EN 50173, а также фирменный стандарт компании IBM.

Симметричный кабель («витая пара», TP — twisted pair) состоит из двух одинаковых в электрическом и конструктивном отношении изолированных медных проводников (рис. 2, а). Скручивание проводов снижает влияние внешних помех на полезные сигналы. Витая пара изготавливается в двух вариантах:

— в экранированном (STP — Shielded Twister Pair) — когда пара медных проводов обертывается в изоляционный экран;

— неэкранированном (UTP — Unshielded Twister Pair) — когда изоляционная обертка каждой пары отсутствует.

Кабель на основе неэкранированной витой пары в зависимости от электрических и механических характеристик разделяется на 5 категорий. Кабели категории 1 применяются там, где требования к скорости передачи минимальны. Главная особенность кабелей категории 2 — способность передавать сигналы со спектром до 1 МГц. Кабели категории 3, 4 широко распространены и предназначены как для передачи данных, так и для передачи голоса. Кабели категории 5 были специально разработаны для поддержки высокоскоростных протоколов.

Кабель на основе экранированной витой пары хорошо защищает передаваемые сигналы от внешних помех, а пользователей сетей — от вредного для здоровья излучения. Экранированный кабель применяется только для передачи данных. Основным стандартом, определяющим параметры экранированной витой пары, является фирменный стандарт IBM. В этом стандарте кабели делятся на типы: Type1, Type2,..., Type9, из которых основным является кабель Type1.

Коаксиальный кабель (coaxial) представляет собой два цилиндра с совмещенной осью, причем один цилиндр — сплошной внутренний проводник, концентрически расположен внутри другого полого цилиндра (внешнего проводника). Проводники изолированы друг от друга диэлектрическим материалом (рис. 2, б). Коаксиальные кабели существуют в большом количестве вариантов: «толстый» коаксиальный кабель, различные разновидности «тонкого» коаксиального кабеля, которые обладают худшими механическими и электрическими характеристиками по сравнению с «толстым» коаксиальным кабелем, зато за счет своей гибкости более удобны при монтаже.

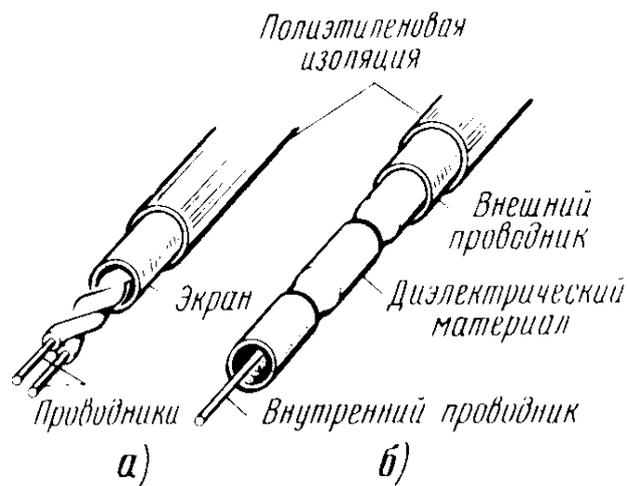


Рис. 2. Типичный вид симметричного (витая пара) (а) и коаксиального (б) кабелей

Основные параметры кабелей с металлическими проводниками.

Коэффициент затухания α , дБ/км зависит от свойств материалов проводников и изоляционного материала. Наилучшими свойствами (малым сопротивлением) обладают медь и серебро. Коэффициент затухания зависит также от геометрических размеров проводников.

Симметричный кабель (витая пара) с большими диаметрами проводников обладают меньшим коэффициентом затухания.

Коэффициент затухания коаксиального кабеля зависит от соотношения диаметров внешнего и внутреннего проводников (рис. 3). Оптимальными соотношениями являются (материал внешнего проводника): для меди — 3,6, для алюминия — 3,9, для свинца — 5,2.

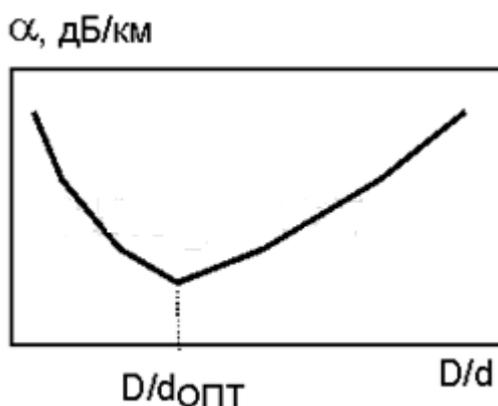


Рис. 3. Зависимость коэффициента затухания коаксиального кабеля от соотношения диаметров проводников

Очень важной характеристикой, фактически определяющей широкополосность системы связи, является зависимость коэффициента затухания от частоты (рис. 4). Если определен граничный коэффициент затухания $\alpha_{ГР}$ (обычно он определяется возможностями усилителей), то данному коэффициенту соответствует граничная частота пропускания системы $f_{ГР}$. Полоса пропускания системы не превышает граничной частоты пропускания.

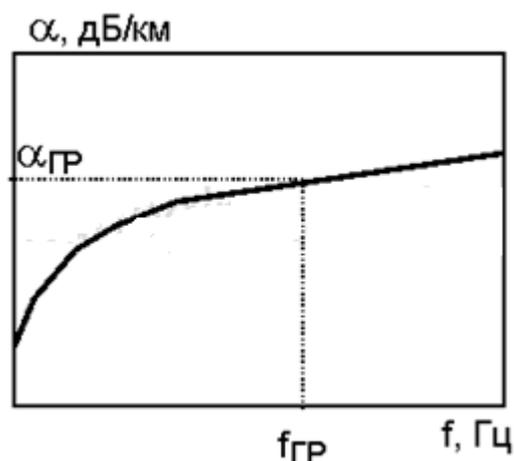


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента затухания металлического кабеля

Скорость распространения v , км/мс. Частотная зависимость скорости распространения показана на рис. 5. С ростом частоты скорость распространения увеличивается, приближаясь к скорости света в вакууме $v_c \approx 300$ км/мс. Данный параметр зависит также от свойств диэлектрика, применяемого в кабеле.

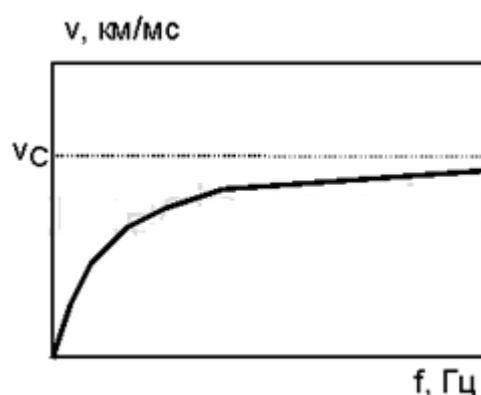


Рис. 5. Частотная зависимость скорости распространения электромагнитной волны

Волоконно-оптические линии связи имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с линиями связи на основе металлических кабелей. К ним относятся: большая пропускная способность (до 10 Гбит/с и выше), малое затухание, малые масса и габариты, высокая помехозащищенность, практически отсутствующие взаимные влияния, малая стоимость из-за отсутствия в конструкции цветных металлов.

В волоконно-оптических линиях в качестве носителя информационного сигнала используют электромагнитное излучение оптического диапазона, а в качестве направляющих систем — волоконно-оптические кабели. Видимое оптическое излучение лежит в диапазоне длин волн 380—760 нм. Практическое применение в волоконно-оптических линиях получил инфракрасный диапазон, т. е. излучение с длиной волны более 760 нм.

В основе волоконно-оптической связи лежит явление полного внутреннего отражения электромагнитных волн на границе раздела диэлектриков с разными показателями преломления. Оптическое волокно состоит из двух элементов — сердцевины, являющейся непосредственным световодом, и оболочки. Показатель

преломления сердцевины несколько больше показателя преломления оболочки, благодаря чему луч света, испытывая многократные переотражения на границе сердцевина-оболочка, распространяется в сердцевине, не покидая ее (рис. 6).



Рис. 6. Принцип распространения оптического излучения

Затухание оптического волокна неоднородно для разных длин волн. Зависимость коэффициента затухания оптического волокна от рабочей длины волны приведена на рис. 7. Данная зависимость имеет три минимума, называемые окнами прозрачности. Исторически первым было освоено первое окно прозрачности на рабочей длине волны 0,85 мкм.

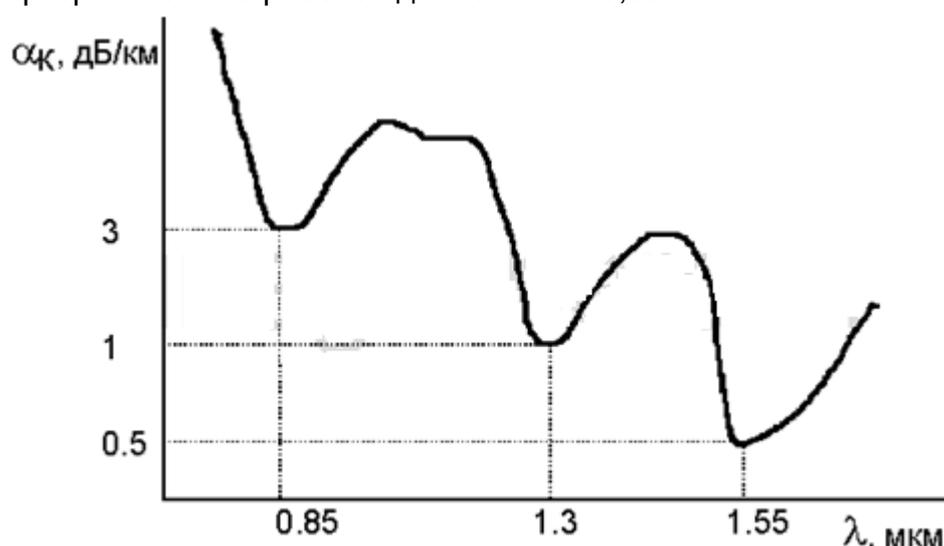


Рис. 7. Спектральная характеристика коэффициента затухания оптического волокна

Первые полупроводниковые излучатели (лазеры и светодиоды) и фотоприемники были разработаны именно для данной длины волны. Коэффициент затухания в первом окне значителен и составляет единицы дБ/км. Позднее были созданы излучатели и фотоприемники, способные работать на больших длинах волн (1,3 и 1,55 мкм). Современные системы связи обычно используют второе или третье окно с малыми коэффициентами затухания. Современная технология позволяет получить оптические волокна с коэффициентом затухания порядка сотых долей дБ/км.

В радиоканалах наземной и спутниковой связи средой распространения электромагнитных волн является атмосфера Земли (за исключением случая связи между космическими аппаратами). На рис. 8 приведено упрощенное строение атмосферы Земли.

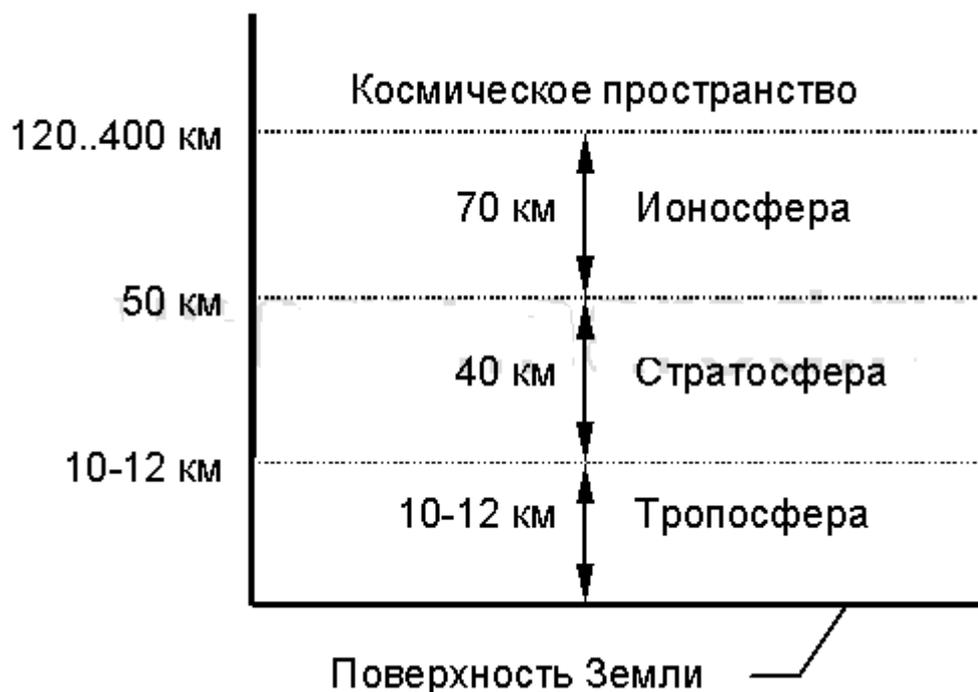


Рис. 8. Строение атмосферы Земли

Реально строение атмосферы более сложно и приведенное деление на тропосферу, стратосферу и ионосферу достаточно условно. Высота слоев приведена приблизительно и различна для разных географических точек Земли. В тропосфере сосредоточено около 80 % массы атмосферы и около 20 % — в стратосфере. Плотность атмосферы в ионосфере крайне мала, граница между ионосферой и космическим пространством является условным понятием, так как следы атмосферы встречаются даже на высотах более 400 км. Считается, что плотные слои атмосферы заканчиваются на высоте около 120 км.

Типичная радиопередача (например, сети передачи сообщений массового характера, такие как сети телевизионного и радиовещания) состоит из двух конечных станций и нескольких промежуточных переприемных станций.

Классификация и способы распространения радиоволн приведены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Вид радиоволн	Тип радиоволн	Диапазон радиоволн (длина волны)	Номер диапазона	Диапазон частот	Вид радиочастот
Мириаметровые	Сверхдлинные	10..100 км	4	3..30 кГц	Очень низкие (ОНЧ)
Километровые	Длинные	1..10 км	5	30..300 кГц	Низкие (НЧ)
Гектометровые	Средние	100..1000 м	6	300..3000 кГц	Средние (СЧ)
Декаметровые	Короткие	10..100 м	7	3..30 МГц	Высокие (ВЧ)
Метровые		1..10 м	8	30..300 МГц	Очень высокие (ОВЧ)
Дециметровые	Ультракороткие	10..100 см	9	300..3000 МГц	Ультравысокие (УВЧ)

Сантиметровые		1..10 см	10	3..30 ГГц	Сверхвысокие (СВЧ)
Миллиметровые		1..10 мм	11	30..300 ГГц	Крайневысокие (КВЧ)
Децимиллиметровые		0.1..1 мм	12	300..3000 ГГц	Гипервысокие (ГВЧ)

Таблица 2

Вид радиоволн	Основные способы распространения радиоволн	Дальность связи
Мириаметровые и километровые (сверхдлинные и длинные)	Дифракция Отражение от Земли и ионосферы	До тысячи км Тысячи км
Гектометровые (средние)	Дифракция Преломление в ионосфере	Сотни км Тысячи км
Декаметровые (короткие)	Преломление в ионосфере и отражение от Земли	Тысячи км
Метровые и более короткие	Свободное распространение и отражение от Земли Рассеяние в тропосфере	Десятки км Сотни км

На величину напряженности поля в точке приема оказывают влияние следующие факторы:

- длина волны;
- освещенность земной атмосферы Солнцем;
- отражение электромагнитных волн от поверхности Земли;
- преломление (отражение) в ионизированных слоях атмосферы (ионосфере);
- рассеяние на диэлектрических неоднородностях нижних слоев атмосферы (тропосфере);
- дифракция на сферической выпуклости Земли.

В компьютерных сетях в настоящее время применяют все описанные типы физических сред передачи данных, но наиболее перспективными являются оптоволоконные.

3. Проблема электромагнитной совместимости

Цепи линий связи постоянно находятся под воздействием сторонних электромагнитных полей различного происхождения. Различают две основные группы источников сторонних полей:

- внутренние — соседние цепи данной линии связи;
- внешние — энергетически и конструктивно не связанные с линией связи.

Внешние источники помех в свою очередь по своему происхождению делятся на:

- естественные — грозовые разряды, солнечная радиация и пр.;

— созданные человеком — высоковольтные линии передачи, радиостанции, линии электрифицированных железных дорог, электрические сети промышленных предприятий и отдельные энергоемкие устройства.

Сторонние электромагнитные поля индуцируют в цепях линий связи помехи, которые не только снижают качество передачи, но иногда возбуждают большие напряжения и токи, приводящие к разрушению линий связи и аппаратуры. Указанные воздействия называют электромагнитными влияниями или просто влияниями на цепи линий связи.

Данная проблема является общей для всех систем и устройств телекоммуникаций и называется проблемой электромагнитной совместимости. Сущность ее состоит в том, что в процессе проектирования, строительства и эксплуатации телекоммуникационных устройств и систем необходимо учитывать два противоречивых требования:

— необходимо обеспечить достаточную для нормальной работы телекоммуникационных систем защиту от воздействия на них сторонних электромагнитных полей;

— необходимо ограничить допустимыми значениями уровни влияния электромагнитных полей проектируемых устройств и систем на другие устройства.

При количественной оценке уровня взаимных влияний обычно рассматривают две цепи: влияющую (создающую электромагнитное поле) и подверженную влиянию (в которой индуцируются помехи) (рис. 9).

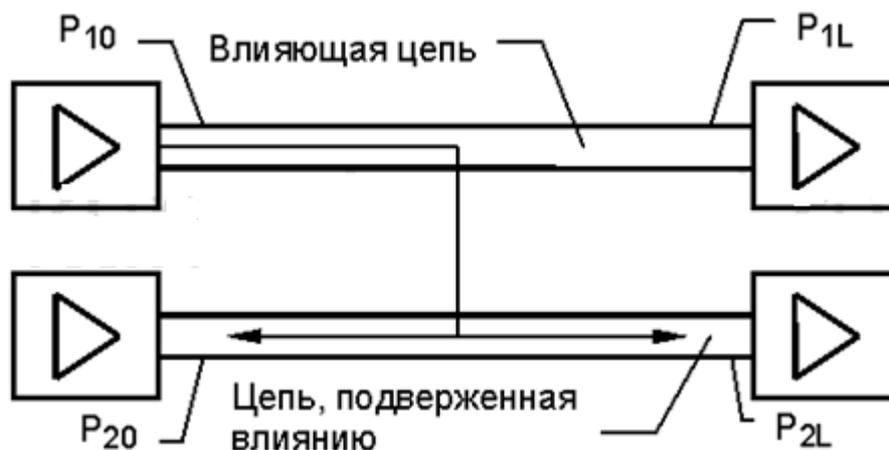


Рис. 9. Взаимное влияние цепей

Ближним концом линии называют тот, к которому подключен генератор, дальним концом — тот, к которому подключена нагрузка цепи. Соответственно рассматриваются мощности сигналов в цепях: P_{10} — на ближнем конце влияющей цепи; P_{1L} — на дальнем конце влияющей цепи; P_{20} — на ближнем конце цепи, подверженной влиянию; P_{2L} — на дальнем конце цепи, подверженной влиянию.

Количественно защищенность от переходных помех из-за взаимных электромагнитных влияний оценивается рядом показателей, в том числе переходным затуханием на ближнем конце линии (near end cross talk — NEXT):

$$A_0 = 10 \lg \left| \frac{P_{10}}{P_{20}} \right|,$$

переходным затуханием на дальнем конце линии (far end cross talk — FEXT):

$$A_L = 10 \lg \left| \frac{P_{1L}}{P_{2L}} \right|.$$

Лекция № 5 Характеристики линий связи

- 1) Характеристики линий связи
 - 1.1 Амплитудно-частотная характеристика
 - 1.2 Полоса пропускания
 - 1.3 Затухание
 - 1.4 Искажение сигнала из-за задержки
 - 1.5 Шумы
 - 1.6 Пропускная способность линии
 - 1.7 Связь между пропускной способностью линии и ее полосой пропускания
 - 1.8 Помехоустойчивость и достоверность

1. Требования, предъявляемые к системам передачи данных

1. Характеристики линий связи

Линии связи имеют следующие характеристики:

- амплитудно-частотная характеристика;
- полоса пропускания;
- затухание;
- пропускная способность;
- помехоустойчивость;
- достоверность передачи данных.

В первую очередь разработчика вычислительной сети интересуют пропускная способность и достоверность передачи данных, т. к. эти характеристики прямо влияют на производительность и надежность создаваемой сети.

Для определения характеристик линии связи часто используют анализ ее реакций на некоторые эталонные воздействия. Такой подход позволяет определять характеристики линий связи любой природы. Чаще всего в качестве эталонных сигналов для исследования реакций линий связи используются синусоидальные сигналы различных частот. Это связано с тем, что сигналы этого типа часто встречаются в технике и с их помощью можно представить любую функцию времени — как непрерывный процесс колебаний звука, так и прямоугольные импульсы, генерируемые компьютером.

Искажение передающим каналом синусоиды какой-либо частоты приводит, в конечном счете, к искажению передаваемого сигнала любой формы, особенно если синусоиды различных частот искажаются неодинаково. Если это аналоговый сигнал, передающий речь, то изменяется тембр голоса за счет искажения обертонов — боковых частот.

При передаче импульсных сигналов, характерных для компьютерных сетей, искажаются низкочастотные и высокочастотные гармоники, в результате фронты импульсов теряют свою прямоугольную форму. Вследствие этого на приемном конце линии сигналы могут плохо распознаваться.

Сигнал, передаваемый по любой среде передачи, подвергается воздействию затухания, ограниченности полосы пропускания, задержки передачи и шумов.

Линия связи искажает передаваемые сигналы из-за того, что ее физические параметры отличаются от идеальных. Если линия связи включает промежуточную аппаратуру, то она также может вносить дополнительные искажения, так как невозможно создать устройства, которые бы одинаково хорошо передавали весь спектр синусоид, от нуля до бесконечности.

Кроме искажений сигналов, вносимых внутренними физическими параметрами линии связи, существуют и внешние помехи. Эти помехи создают различные электрические двигатели, электронные устройства, атмосферные явления и т. д.

1.1 Амплитудно-частотная характеристика

Степень искажения синусоидальных сигналов линиями связи оценивается с помощью таких характеристик, как амплитудно-частотная характеристика, полоса пропускания и затухание на определенной частоте.

Амплитудно-частотная характеристика (рис. 1) показывает, как затухает амплитуда синусоиды на выходе линии связи по сравнению с амплитудой на ее входе для всех возможных частот передаваемого сигнала. Вместо амплитуды в этой характеристике часто используют также такой параметр, как мощность сигнала.



Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика

Знание амплитудно-частотной характеристики реальной линии позволяет определить форму выходного сигнала практически для любого входного сигнала. Для этого необходимо найти спектр входного сигнала, преобразовать амплитуду составляющих его гармоник в соответствии с амплитудно-частотной характеристикой, а затем найти форму выходного сигнала, сложив преобразованные гармоники.

Пример. Пусть известны амплитудно-частотная характеристика канала связи и спектр входного сигнала:

$$f_{\text{вх}}(t) = A_{1\text{вх}} \sin(\omega_1 \cdot t) + A_{2\text{вх}} \sin(\omega_2 \cdot t).$$

Преобразуем амплитуду составляющих его гармоник в соответствии с амплитудно-частотной характеристикой канала связи:

— пусть при частоте ω_1 отношение амплитуды выходного сигнала к

амплитуде входного равно $\frac{A_{\text{ВЫХ}}}{A_{\text{ВХ}}} = r_1$ (определяется из АЧХ канала);

$$\text{— при частоте } \omega_2 \text{ — } \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{A_{\text{ВХ}}} = r_2.$$

Тогда, умножив амплитуды соответствующих гармоник входного сигнала на значения r_1 , r_2 , определяем значение амплитуды выходного сигнала:

$$A_{1\text{ВЫХ}} = A_{1\text{ВХ}} \cdot r_1,$$

$$A_{2\text{ВЫХ}} = A_{2\text{ВХ}} \cdot r_2$$

Несмотря на полноту информации, предоставляемой амплитудно-частотной характеристикой о линии связи, ее использование осложняется тем обстоятельством, что получить ее весьма трудно. Ведь для этого нужно провести тестирование линии эталонными синусоидами по всему диапазону частот от нуля до некоторого максимального значения, которое может встретиться во входных сигналах. Причем менять частоту входных синусоид нужно с небольшим шагом, а значит, количество экспериментов должно быть очень большим. Поэтому на практике вместо амплитудно-частотной характеристики применяются другие, упрощенные характеристики — полоса пропускания и затухание.

1.2 Полоса пропускания

Полоса пропускания — это непрерывный диапазон частот, для которого отношение амплитуды выходного сигнала ко входному превышает некоторый заранее заданный предел, обычно 0,5. То есть полоса пропускания определяет диапазон частот синусоидального сигнала, при которых этот сигнал передается по линии связи без значительных искажений. Ширина полосы пропускания в наибольшей степени влияет на максимально возможную скорость передачи информации по линии связи.

Полоса пропускания зависит от типа линии и ее протяженности.

1.3 Затухание

Затухание определяется как относительное уменьшение амплитуды или мощности сигнала при передаче по линии сигнала определенной частоты. Таким образом, затухание представляет собой одну точку из амплитудно-частотной характеристики линии. Часто при эксплуатации линии заранее известна основная частота передаваемого сигнала, то есть та частота, гармоника которой имеет наибольшую амплитуду и мощность. Поэтому достаточно знать затухание на этой частоте, чтобы приблизительно оценить искажения передаваемых по линии сигналов.

Затухание A обычно измеряется в децибелах (дБ) и вычисляется по следующей формуле:

$$A = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} \right),$$

где $P_{\text{ВЫХ}}$ — мощность сигнала на выходе линии; $P_{\text{ВХ}}$ — мощность сигнала на входе линии.

Так как мощность выходного сигнала кабеля без промежуточных усилителей всегда меньше, чем мощность входного сигнала, затухание кабеля всегда является отрицательной величиной.

Таким образом, амплитудно-частотная характеристика, полоса пропускания и затухание являются универсальными характеристиками, и их знание позволяет сделать вывод о том, как через линию связи будут передаваться сигналы любой формы.

1.4 Искажение из-за задержки

Искажение из-за задержки определяется тем, что скорость распространения синусоидального сигнала по линии связи изменяется с изменением частоты. Следовательно, при передаче цифрового сигнала различные компоненты, из которых образован сигнал, достигают приемника с различными задержками.

Степень искажения растет с увеличением скорости передачи битов, что вызвано следующей причиной: по мере роста скорости битов некоторые частотные компоненты, связанные с передачей данного бита, задерживаются и начинают влиять на частотные компоненты следующего бита. Поэтому искажения из-за задержки называют также межсимвольными взаимными помехами.

1.5 Шумы

Шумы постоянно присутствуют в реальном канале. В отсутствие передаваемого сигнала в идеальной линии связи должен быть нулевой уровень электрического сигнала. Однако на практике в линии имеют место случайные всплески даже тогда, когда никакой сигнал не передается. Эти всплески называют *уровнем шумов в линии*.

Отношение S/N называют *отношением сигнал-шум* и обычно выражают в децибелах:

$$S/N = 10 \lg \left(\frac{P_S}{P_N} \right),$$

где P_S — мощность полученного сигнала; P_N — мощность уровня шумов.

Высокое значение отношения свидетельствует о высокой мощности сигнала по отношению к имеющемуся уровню шумов и поэтому характеризует сигнал хорошего качества. Наоборот, низкое значение отношения S/N свидетельствует о сигнале низкого качества.

1.6 Пропускная способность линии

Пропускная способность линии характеризует максимально возможную скорость передачи данных по линии связи. Пропускная способность измеряется в битах в секунду — бит/с, а также в производных единицах, таких как килобит в секунду (Кбит/с), мегабит в секунду (Мбит/с), гигабит в секунду (Гбит/с) и т. д.

Пропускная способность линии связи зависит не только от ее характеристик, таких как амплитудно-частотная характеристика, но и от спектра передаваемых сигналов.

Если значимые гармоники сигнала (то есть те гармоники, амплитуды которых вносят основной вклад в результирующий сигнал) попадают в полосу пропускания линии, то такой сигнал будет хорошо передаваться данной линией связи и приемник сможет правильно распознать информацию, отправленную по линии передатчиком (рис. 2).

Если же значимые гармоники выходят за границы полосы пропускания линии связи, то сигнал будет значительно искажаться, приемник будет ошибаться при распознавании информации, а значит, информация не сможет передаваться с заданной пропускной способностью.

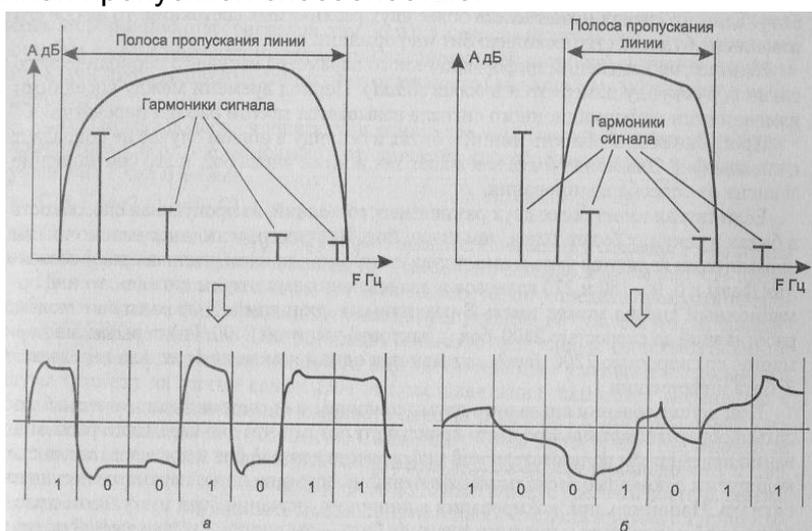


Рис. 2. Соответствие между полосой пропускания линии связи и спектром сигнала

Способ представления дискретной информации в виде сигналов, подаваемых на линию связи, называется *физическим кодированием*. От выбранного способа кодирования зависит спектр сигналов и, соответственно, пропускная способность линии. Таким образом, для одного способа кодирования линия может обладать одной пропускной способностью, а для другого — другой.

1.7 Связь между пропускной способностью линии и ее полосой пропускания

Чем выше частота несущего периодического сигнала, тем больше информации в единицу времени передается по линии и тем выше пропускная способность линии при фиксированном способе физического кодирования.

Однако, с другой стороны, с увеличением частоты периодического несущего сигнала увеличивается и ширина спектра этого сигнала, то есть разность между максимальной и минимальной частотами того набора синусоид, которые в сумме дадут выбранную для физического кодирования последовательность сигналов. Линия передает этот спектр синусоид с теми искажениями, которые определяются ее полосой пропускания. Чем больше несоответствие между полосой пропускания линии и шириной спектра передаваемых информационных сигналов, тем больше сигналы искажаются и тем вероятнее ошибки в распознавании информации принимающей стороной, а значит, скорость передачи информации на самом деле оказывается меньше, чем можно было предположить.

Связь между полосой пропускания линии и ее максимально возможной пропускной способностью, вне зависимости от принятого способа физического кодирования, установил Клод Шеннон:

$$C = F \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right),$$

где C — максимальная пропускная способность линии (бит/с); F — ширина полосы пропускания линии (Гц); P_S — мощность сигнала; P_N — мощность шума.

Из этого соотношения видно, что хотя теоретического предела пропускной способности линии с фиксированной полосой пропускания не существует, на практике такой предел имеется. Действительно, повысить пропускную способность линии можно за счет увеличения мощности передатчика или же уменьшения мощности шума (помех) на линии связи. Обе эти составляющие поддаются изменению с большим трудом. Повышение мощности передатчика ведет к значительному увеличению его габаритов и стоимости. Снижение уровня шума требует применения специальных кабелей с хорошими защитными экранами, что весьма дорого.

Найквист вывел формулу, определяющую зависимость максимальной скорости передачи информации (данных) C от ширины полосы пропускания F без учета шума в канале:

$$C = 2F \log_2 M,$$

где M — число различных состояний информативного параметра сигнала.

Если сигнал имеет 2 состояния, то пропускная способность равна удвоенному значению ширины полосы пропускания линии связи.

Если же передатчик использует более чем 2 устойчивых состояния сигнала для кодирования данных, то пропускная способность линии повышается, так как за один такт работы передатчик передает несколько бит исходных данных.

Пример. Модем в телефонной сети общего пользования применяет метод *квадратурной амплитудной модуляции* с 8-ю уровнями (4 значения фазы умножить на 2 значения амплитуды для каждой фазы) на каждый элемент. Если полоса пропускания телефонной сети равна 3100 Гц, то согласно формуле Найквиста максимальная скорость передачи данных будет равна:

$$C = 2F \log_2 M = 2 \cdot 3100 \cdot \log_2 8 = 18600 \text{ бит/с.}$$

Хотя формула Найквиста явно не учитывает наличие шума, косвенно его влияние отражается в выборе числа состояний информативного параметра сигнала. Для повышения пропускной способности канала хотелось бы увеличить это число до значительной величины, но на практике этого сделать нельзя из-за шума на линии. Поэтому число возможных состояний сигнала фактически ограничивается соотношением мощности сигнала и шума, а формула Найквиста определяет предельную скорость передачи данных в том случае, когда количество состояний уже выбрано с учетом возможностей устойчивого распознавания приемником.

1.8 Помехоустойчивость и достоверность

Помехоустойчивость передачи данных определяется, как способность противостоять воздействию помех, возникающих в канале связи и искажающих информацию:

$$p = \sum_{i=1}^n p(A_i) \cdot (1 - p(A_i / A_i))$$

где $p(A_i)$ — вероятность выбора для передачи сообщения A_i ; $p(A_i / A_i)$ — вероятность того, что при передаче сообщения A_i , будет принято сообщение A_i ; $(1 - p(A_i / A_i))$ — вероятность искажения сообщения A_i .

По теории вероятности сумма вероятностей определяет вероятность появления одного из нескольких событий, а произведение вероятностей — вероятность совместного появления событий.

Помехоустойчивость линии зависит от типа используемой физической среды, а также от экранирующих и подавляющих помехи средств самой линии. Наименее помехоустойчивыми являются радиолинии, хорошей устойчивостью обладают кабельные линии и отличной — волоконно-оптические линии, малочувствительные ко внешнему электромагнитному излучению.

Достоверность передачи данных характеризует вероятность искажения для каждого передаваемого бита данных. Иногда этот же показатель называют интенсивностью битовых ошибок. Эта величина для каналов связи без дополнительных средств защиты от ошибок составляет, как правило, 10⁻⁴—10⁻⁶, в оптоволоконных линиях связи — 10⁻⁹.

Искажения бит происходят как из-за наличия помех на линии, так и по причине искажений формы сигнала ограниченной полосой пропускания линии. Поэтому для повышения достоверности передаваемых данных нужно повышать степень помехозащищенности линии, а также использовать более широкополосные линии связи.

2. Требования, предъявляемые к системам передачи данных

Качество ИС оценивается обобщенными характеристиками, показывающими степень пригодности к выполнению заданной целевой функции в конкретных условиях работы.

При оценке качества определяют:

- максимальную или среднюю скорость передаваемой информации (объем/ед. времени);
 - достоверность передаваемых сообщений (вероятность совпадения полученной информации с переданной);
 - среднее количество сообщений потерянных при передаче в ИС;
 - время передачи сообщений различных категорий сложности;
 - надежность связи между абонентами;
 - устойчивость к случайным или преднамеренным нарушениям структуры ИС;
 - стоимость системы передачи данных.
- Также рассматриваются следующие показатели:
- эксплуатационные;
 - экономические;
 - технические;

— информационные.

Определим качественно технические характеристики:

1. Энергетические характеристики связаны с необходимостью обеспечения мощности сигнала, позволяющей передавать с необходимой достоверностью количество информации в секунду при заданном уровне помех в канале передач.

2. Временная эффективность характеризуется коэффициентом, который показывает, насколько близка скорость передачи информации к пропускной способности канала.

3. Частотная эффективность характеризуется затратами частоты полосы пропускания в Гц на передачу ед. информации в секунду.

К информационным характеристикам относятся:

— достоверность — степень соответствия полученной и отправленной информации;

— скрытность — конфиденциальность;

— безопасность — устойчивость к целенаправленному воздействию.

Лекция № 6 Предварительная обработка данных

- 1) Восстановление искаженных сигналов
- 2) Фильтрация изображений

1. Восстановление искаженных сигналов

В результате действия на передаваемые сигналы помех и шумов на этапе предварительной обработки полученной информации необходимо произвести восстановление искаженного исходного сигнала. Процедура восстановления, повышения достоверности данных, снижения уровня помех называется сглаживанием.

В качестве алгоритма предварительной обработки данных обычно используется процедура сглаживания по методу скользящего среднего. При проведении операции восстановления зашумленного сигнала по трем точкам значения сигнала в первой и последней точках интервала дискретизации приравниваются значениям искаженного сигнала в соответствующих точках:

$f_1^{(3)} = f_1, f_{last}^{(3)} = f_{last}$. Тогда значения восстановленного сигнала в остальных промежуточных точках определяется по следующей формуле:
 $f_i^{(3)} = (f_{i-1} + f_i + f_{i+1})/3$.

При сглаживании зашумленного сигнала по пяти точкам:

$$\begin{aligned} f_1^{(5)} &= f_1, f_2^{(5)} = f_2, \\ f_{last-1}^{(5)} &= f_{last-1}, f_{last}^{(5)} = f_{last}, \\ f_i^{(5)} &= (f_{i-2} + f_{i-1} + f_i + f_{i+1} + f_{i+2})/5. \end{aligned}$$

Также эффективного снижения уровня помех можно достичь применением метода наименьших квадратов с использованием степенных и тригонометрических функций.

Требуется найти коэффициенты C_0, C_1, \dots, C_m линейной комбинации:

$$L(t) = C_0 \varphi_0(t) + C_1 \varphi_1(t) + C_2 \varphi_2(t) + \dots + C_m \varphi_m(t),$$

таким образом, чтобы обеспечить близость кривой $L(t)$ и заданной функции. Коэффициенты определяются из следующего матричного уравнения:

$$C = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot f,$$

где f — заданная зашумленная функция; A — прямоугольная матрица размерностью $(n+1) \times (m+1)$; n — количество точек заданной функции f ; m — порядок функции, используемой для аппроксимации сигнала.

Матрица A имеет следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} \varphi_0(t_0) & \varphi_1(t_0) & \dots & \varphi_m(t_0) \\ \varphi_0(t_1) & \varphi_1(t_1) & \dots & \varphi_m(t_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_0(t_n) & \varphi_1(t_n) & \dots & \varphi_m(t_n) \end{bmatrix}$$

При использовании для аппроксимации степенных функций $L(t)$ будет иметь вид: $L(t) = C_0 t^0 + C_1 t^1 + C_2 t^2 + \dots + C_m t^m$, а матрица A :

$$A = \begin{bmatrix} t_0^0 & t_0^1 & \dots & t_0^m \\ t_1^0 & t_1^1 & \dots & t_1^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_n^0 & t_n^1 & \dots & t_n^m \end{bmatrix}$$

При использовании тригонометрических функций (параметр $T = 2$):

$$L(t) = C_0 + C_1 \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) + C_2 \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right) + C_3 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + C_4 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + \dots$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \sin\left(\frac{\pi t_0}{T}\right) & \cos\left(\frac{\pi t_0}{T}\right) & \sin\left(\frac{2\pi t_0}{T}\right) & \cos\left(\frac{2\pi t_0}{T}\right) & \dots & \sin\left(\frac{m\pi t_0}{T}\right) & \cos\left(\frac{m\pi t_0}{T}\right) \\ 1 & \sin\left(\frac{\pi t_1}{T}\right) & \cos\left(\frac{\pi t_1}{T}\right) & \sin\left(\frac{2\pi t_1}{T}\right) & \cos\left(\frac{2\pi t_1}{T}\right) & \dots & \sin\left(\frac{m\pi t_1}{T}\right) & \cos\left(\frac{m\pi t_1}{T}\right) \\ \dots & \dots \\ 1 & \sin\left(\frac{\pi t_n}{T}\right) & \cos\left(\frac{\pi t_n}{T}\right) & \sin\left(\frac{2\pi t_n}{T}\right) & \cos\left(\frac{2\pi t_n}{T}\right) & \dots & \sin\left(\frac{m\pi t_n}{T}\right) & \cos\left(\frac{m\pi t_n}{T}\right) \end{bmatrix}$$

2. Фильтрация изображений

Обычно изображения, сформированные различными информационными системами, искажаются действием помех. Это затрудняет как их визуальный анализ человеком-оператором, так и автоматическую обработку в ЭВМ. При решении некоторых задач обработки изображений в роли помех могут выступать те или иные компоненты самого изображения. Например, при анализе космического снимка земной поверхности может стоять задача определения границ между ее отдельными участками — лесом и полем, водой и сушей и т. п. С точки зрения этой задачи отдельные детали изображения внутри разделяемых областей являются помехой.

Ослабление действия помех на изображение при его дискретизации, квантовании, передаче или из-за воздействия возмущений внешней среды достигается фильтрацией. При фильтрации яркость каждой точки исходного изображения, искаженного помехой, заменяется некоторым другим значением яркости, которое признается в наименьшей степени искаженным помехой.

Изображение представляет собой двумерную функцию пространственных координат, которая изменяется по этим координатам медленнее (иногда

значительно медленнее), чем помеха, также являющаяся двумерной функцией. Это позволяет при оценке полезного сигнала в каждой точке кадра принять во внимание некоторое множество соседних точек, воспользовавшись определенной похожестью сигнала в этих точках. В других случаях, наоборот, признаком полезного сигнала являются резкие перепады яркости. Однако, как правило, частота этих перепадов относительно невелика, так что на значительных промежутках между ними сигнал либо постоянен, либо изменяется медленно. И в этом случае свойства сигнала проявляются при наблюдении его не только в локальной точке, но и при анализе ее окрестности.

Понятие окрестности является достаточно условным. Она может быть образована лишь ближайшими по кадру соседями, но могут быть окрестности, содержащие достаточно много и достаточно сильно удаленных точек кадра. В этом последнем случае, конечно, степень влияния далеких и близких точек на решения, принимаемые фильтром в данной точке кадра, будет совершенно различной.

Таким образом, идеология фильтрации основывается на рациональном использовании данных, как из рабочей точки, так и из ее окрестности. Задача заключается в том, чтобы найти такую вычислительную процедуру, которая позволяла бы достигать наилучших результатов. Общепринято при решении этой задачи опираться на использование вероятностных моделей изображения и помехи, а также на применение статистических критериев оптимальности. Причины этого понятны — это случайный характер, как информационного сигнала, так и помехи и это стремление получить минимальное в среднем отличие результата обработки от идеального сигнала. Многообразие методов и алгоритмов связано с большим разнообразием сюжетов, которые приходится описывать различными математическими моделями. Кроме того, применяются различные критерии оптимальности, что также ведет к разнообразию методов фильтрации. Наконец, даже при совпадении моделей и критериев очень часто из-за математических трудностей не удается найти оптимальную процедуру. Сложность нахождения точных решений порождает различные варианты приближенных методов и процедур.

Рассмотрим следующие методы фильтрации:

- с использованием сглаживающих фильтров;
- с использованием контрастоповышающих фильтров.

Сглаживающие фильтры. Для имеющегося изображения $f(x, y)$ процесс усреднения окрестности заключается в получении сглаженного изображения $g(x, y)$, интенсивность которого в каждой точке (x, y) равна усредненному значению интенсивности пикселей функции f , содержащихся в заданной окрестности точки (x, y) . Таким образом, сглаженное изображение получается при использовании соотношения:

$$g(x, y) = \frac{1}{P} \sum_{(n,m) \in S} f(n, m) \quad \text{для всех } x \text{ и } y \text{ функции } f(x, y),$$

где S — множество координат точек в окрестности точки (x, y) , включая саму эту точку; P — общее число точек в окрестности.

Основным подходом при определении окрестности точки (x, y) является использование квадратной или прямоугольной области части изображения (маска) с центром в точке (x, y) (рис. 1, а, б). Центр этой части изображения перемещается от пиксела к пикселу, начиная, например, от левого верхнего угла. Хотя иногда используются и другие формы окрестности (например, круг), квадратные формы масок являются более предпочтительными из-за простоты их реализации.

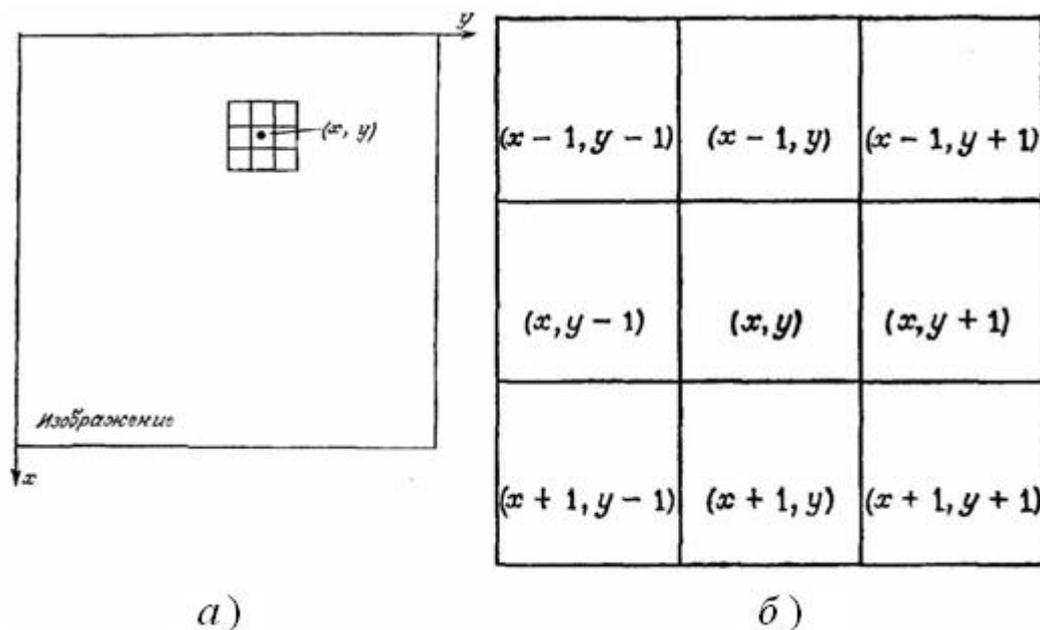


Рис. 1. Окрестность размерностью 3×3 точки (x, y) (а), маска размерностью 3×3 с координатами точек, находящихся в окрестности (б)

Шумоподавление при помощи усреднения окрестности имеет существенный недостаток: все пиксели в маске фильтра на любом расстоянии от обрабатываемого оказывают на результат одинаковый эффект. Несколько лучший результат получается при модификации фильтра с увеличением веса центральной точки:

$$g(x_0, y_0) = \frac{1}{10} \left(2f(x_0, y_0) + \sum_{(n,m) \in S} f(n, m) \right) \text{ для всех } x \text{ и } y \text{ в } f(x, y),$$

где S — множество координат точек в окрестности точки (x_0, y_0) .

Контрастоповышающие фильтры. Если сглаживающие фильтры снижают локальную контрастность изображения, размывая его, то контрастоповышающие фильтры производят обратный эффект. Такие фильтры подчеркивают границы объектов изображения, то есть обеспечивают увеличение детальности изображения.

Увеличения детальности изображения можно получить при использовании следующих соотношений:

$$g(x_0, y_0) = 5 \cdot f(x_0, y_0) - \sum_{(n,m) \in L} f(n, m) \quad \text{для всех } x \text{ и } y \text{ функции } f(x, y),$$

где L — множество координат точек слева, справа, сверху и снизу от точки (x_0, y_0) в заданной окрестности;

или

$$g(x_0, y_0) = 9 \cdot f(x_0, y_0) - \sum_{(n,m) \in S} f(n, m) \quad \text{для всех } x \text{ и } y \text{ функции } f(x, y),$$

где S — множество координат точек в окрестности точки (x_0, y_0) .

При необходимости получения только контура изображения можно использовать соотношения, приводящие к нулевой сумме весовых коэффициентов:

$$g(x_0, y_0) = 4 \cdot f(x_0, y_0) - \sum_{(n,m) \in L} f(n, m) \quad \text{для всех } x \text{ и } y \text{ в } f(x, y),$$

где L — множество координат точек слева, справа, сверху и снизу от точки (x_0, y_0) в заданной окрестности;

$$g(x_0, y_0) = 8 \cdot f(x_0, y_0) - \sum_{(n,m) \in S} f(n, m) \quad \text{для всех } x \text{ и } y \text{ в } f(x, y),$$

где S — множество координат точек в окрестности точки (x_0, y_0) .

Также можно провести выделение вертикальных, горизонтальных или наклонных (под углом 45°) контуров деталей изображения.

Лекция № 7 Пропускная способность каналов передачи данных

- 1) Энтропия источника информации. Информационная емкость сигналов
- 2) Модель дискретного канала
- 3) Классификация дискретных каналов
- 4) Пропускная способность дискретного канала передачи данных
- 5) Пропускная способность непрерывного канала передачи данных

1. Энтропия источника информации. Информационная емкость сигналов

Количественная мера информации. Информация проявляется, хранится и передается от одного объекта к другому в материально-энергетической форме в виде сигналов. Сигналом, как материальным носителем информации, может быть любой физический процесс (электрический, магнитный, оптический, акустический и пр.), определенные параметры которого (амплитуда, частота, энергия, интенсивность и др.) однозначно отображают информационные данные (сообщения).

Единицу количественной меры информации — БИТ (сокращение binary digit — двоичная цифра), впервые предложил Р. Хартли в 1928 году. 1 бит — это информация о двух возможных равновероятных состояниях объекта, неопределенность выбора из двух равновероятных событий. Математически это отображается состоянием 1 или 0 одного разряда двоичной системы счисления. Количество информации H (в битах), необходимое и достаточное для полного снятия неопределенности состояния объекта, который имеет N равновозможных состояний:

$$H = \log_2 N, \quad 2^H = N.$$

Пример. Необходимо поднять груз на определенный этаж 16-ти этажного здания (нумерация этажей 0—15, $N=16$). Сколько бит информации полностью определяют задание?

$$H = \log_2 N = \log_2 16 = 4.$$

Следовательно, 4 бита информации необходимы и достаточны для полного снятия неопределенности выбора. В этом можно убедиться применением логики исчисления с последовательным делением пополам интервалов состояний. Например, для 9-го этажа:

1. Выше 7-го этажа? Да = 1.
2. Выше 11-го этажа? Нет = 0.
3. Выше 9-го этажа? Нет = 0.
4. Выше 8-го этажа? Да = 1.

Итог: этаж номер 9 или 1001 в двоичном исчислении, четыре двоичных разряда.

Если в приведенном примере на этажах имеется по 4 квартиры с нумерацией на каждом этаже 0—3 ($M=4$), то при адресации груза в квартиру потребуются еще 2 бита информации. Такой же результат получим, если вместо независимой

нумерации этажей и квартир на этажах (два источника неопределенности) мы будем иметь только сквозную нумерацию квартир (один обобщенный источник):

$$H = \log_2 N + \log_2 M = \log_2 16 + \log_2 4 = 4 + 4 = 6 \equiv \\ \equiv \log_2 (NM) = \log_2 64 = 6,$$

т. е. количество информации отвечает требованию аддитивности: неопределенность объединенного источника равна сумме неопределенностей исходных источников, что соответствует интуитивному требованию к информации: она должна быть однозначной, а ее количество должно быть одним и тем же независимо от способа задания.

Двоичная мера информации получила общее признание в связи с простотой реализации информационной техники на элементах с двумя устойчивыми состояниями. В десятичном исчислении единицей информации является один десятичный разряд — ДИТ.

Энтропия источника информации. Степень неопределенности состояния объекта (источника информации) зависит не только от числа его возможных состояний, но и от вероятности этих состояний. При неравновероятных состояниях свобода выбора для источника ограничивается. Так, если из двух возможных состояний вероятность одного из них равна 0,999, то вероятность другого состояния соответственно равна $1 - 0,999 = 0,001$, и при взаимодействии с таким источником результат практически предreshен.

В соответствии с теорией вероятности источник информации однозначно и полно характеризуется ансамблем состояний $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ с вероятностями состояний соответственно P_1, P_2, \dots, P_m при условии, что сумма вероятностей всех состояний равна 1. Мера количества информации, как неопределенности выбора дискретным источником состояния из ансамбля X , предложена Клодом Шенноном в 1946 году и получила название энтропии дискретного источника информации или энтропии конечного ансамбля:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^m P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

Пример. Вычислить энтропию ансамбля 32 букв алфавита. Вероятности использования букв приведены в табл. 1.

Таблица 1

Вероятности использования букв алфавита

x_i	P_i								
а	0,064	з	0,015	о	0,096	х	0,009	э	0,003
б	0,015	и	0,064	п	0,024	ц	0,004	ю	0,007
в	0,039	й	0,010	р	0,041	ч	0,013	я	0,019

г	0,014	к	0,029	с	0,047	ш	0,006	—	0,124
д	0,026	л	0,036	т	0,056	щ	0,003		
е,ё	0,074	м	0,026	у	0,021	ъ,ь	0,015		
ж	0,008	н	0,056	ф	0,020	ы	0,016		

Сравнить энтропию с неопределенностью, которая была бы у алфавита при равновероятном их использовании.

Неопределенность на одну букву при равновероятности использования

$$p = \frac{1}{m} :$$

$$H(X) = -\sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i = -\sum_{i=1}^m \frac{1}{m} \log_2 \frac{1}{m} = -\sum_{i=1}^{32} \frac{1}{32} \log_2 \frac{1}{32} =$$

$$= -\frac{32}{32} \log_2 \frac{1}{32} = -(\log_2 1 - \log_2 32) = \log_2 32 = 5$$

при $m = 32$.

Энтропия алфавита по ансамблю таблицы:

$$H(X) = -0,064 \log_2 0,064 - \dots - 0,143 \log_2 0,143 \approx 4,42$$

Таким образом, неравновероятность состояний снижает энтропию источника.

Информационная емкость сигналов. Информационная емкость сигналов существенно зависит от типа сигналов и определяет требования к каналам передачи данных, равно как и технические характеристики каналов связи ограничивают информационную емкость сигналов, передаваемых по этим каналам.

Для дискретных каналов передачи используют понятия технической и информационной скорости передачи данных.

Под технической скоростью передачи подразумевают число элементарных сигналов (символов), передаваемых по каналу в единицу времени. Простейший элементарный символ — однополярный электрический импульс длительностью τ на тактовом интервале T . В дискретных каналах используют, как правило, двуполярные импульсы, положительные на первой половине интервала T и отрицательные на второй половине. Это позволяет поддерживать нулевой потенциал кабеля и выполнять тактовую синхронизацию приемо-передачи сигналов.

Единицей измерения технической скорости $V_t = \frac{1}{T}$ служит БОД — один символ в секунду. Полоса пропускания канала связи ограничивается предельной частотой $F_{\text{пред}}$ выше, которой сигнал имеет мощность меньше чем мощность

помех. При этом значение технической скорости передачи данных не может быть выше $F_{\text{пред}}$ без специальных устройств выделения информационных сигналов.

При известной технической скорости V_t скорость передачи информации измеряется в битах в секунду и задается соотношением:

$$V_h = V_t H(s),$$

где $H(s)$ — энтропия символа.

Для двоичных дискретных символов (0, 1) значение $H(s) = 1$. При числе L возможных равновероятных уровней амплитуды импульсов значение $H(s) = \log_2 L$.

Информационная емкость сигнала или полное количество информации в сигнале S (сообщении, кодовой последовательности/слове) определяется полным количеством энтропии символов в битах на интервале задания сигнала T_S :

$$I(S) = N \log_2 L = \frac{T_S}{T} \log_2 L,$$

где $N = T_S/T$ — количество тактовых интервалов на интервале задания сигнала T_S .

Увеличение числа уровней L увеличивает пропускную способность каналов связи, но усложняет аппаратуру кодирования данных и снижает помехоустойчивость связи.

Для непрерывных сигналов передача по каналам связи возможна только при условии, что максимальная информационная частота в сигнале F_{max} не превышает предельной частоты $F_{\text{пред}}$ передачи сигналов каналом связи. Для оценки информационной емкости непрерывного сигнала выполним его

$$\Delta t = \frac{1}{2F_{\text{max}}}$$

дискретизацию с интервалом Δt . Как установлено Котельниковым, по мгновенным отсчетам непрерывного сигнала с таким интервалом дискретизации аналоговый сигнал может быть восстановлен без потери информации. При полной длительности сигнала T_S число отсчетов:

$$N = \frac{T_S}{\Delta t} = 2F_{\text{max}} T_S.$$

Информационная емкость сигнала:

$$I(S) = 2F_{\text{max}} T_S \log_2 L.$$

Информационные возможности сигнала возрастают с расширением его спектра и превышением его уровня над уровнем помех.

2. Модель дискретного канала

Дискретный канал связи (ДКС) имеет на входе множество символов кода X с энтропией источника $H(X)$, а на выходе — множество символов Y с энтропией $H(Y)$ (рис. 1). Если формируемые символы из множества X и выявляемые из множества Y расположить в узлах графа, соединив эти узлы дугами, отображающими вероятности перехода одного символа в другой, то получим граф дискретного канала связи с шумом, представленный на рис. 2.

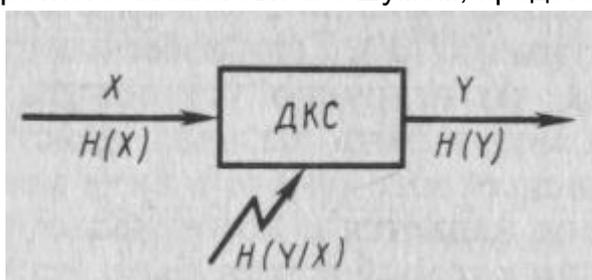


Рис. 1. Модель дискретного канала связи с шумом

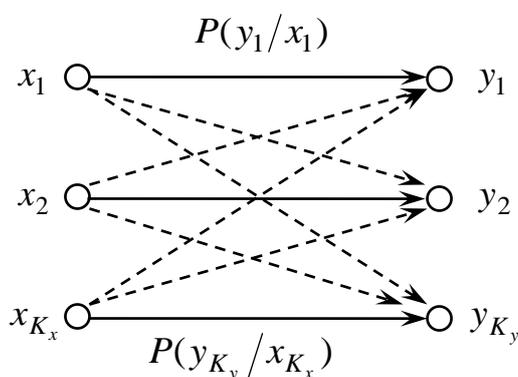


Рис. 2. Граф дискретного канала связи с шумом

С помощью дискретного сигнала можно закодировать конечное множество возможных сообщений. Чем больше число возможных сообщений и, следовательно, чем больше возможных значений сигнала, тем больше априорная неопределенность и тем большее количество информации получает адресат, когда эта неопределенность снимается.

Множество символов X конечно и определяется основанием системы счисления кода K_x на входе канала. Система счисления по выявляемым символам также конечна и составляет K_y . Вероятности переходов, связывающих входные и выходные символы, могут быть записаны в виде матрицы:

$$P = \begin{bmatrix} P(y_1/x_1) & P(y_2/x_1) & \dots & P(y_{K_y}/x_1) \\ P(y_1/x_2) & P(y_2/x_2) & \dots & P(y_{K_y}/x_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P(y_1/x_{K_x}) & P(y_2/x_{K_x}) & \dots & P(y_{K_y}/x_{K_x}) \end{bmatrix}.$$

В этой матрице i -ый столбец определяет вероятность выявления на выходе дискретного канала связи символа y_i . Вероятности, расположенные на главной диагонали, называются вероятностями прохождения символов, остальные — вероятности трансформации.

Анализ модели дискретного канала связи возможен, если известна статистика появления символов на входе канала. Тогда может быть определена энтропия $H(X)$. Если известна статистика символов на выходе канала, то можно определить энтропию $H(Y)$.

Потери информации могут быть вызваны действием помех, которые отображаются в дискретном канале в виде некоторого потока ошибок. Зная матрицу P можно найти условную энтропию $H(Y/X)$, которая отображает потери информации при прохождении ее по каналу связи. В данном случае $H(Y/X)$ — это потери информации из-за действия ошибок в дискретном канале связи.

Исходя из модели дискретного канала связи, можно выполнить классификацию дискретных каналов.

3. Классификация дискретных каналов

По основанию системы счисления на входе ДКС различают двоичные, троичные, четвертичные и другие каналы связи.

По соотношению системы счисления на выходе и на входе ДКС выделяют каналы связи со стиранием, если $K_y > K_x$, и каналы связи без стирания, если $K_y = K_x$.

По наличию зависимости вероятности переходов символов в ДКС от времени выделяют нестационарные каналы, для которых такая зависимость существует, и стационарные, где вероятности переходов постоянны и не меняются во времени.

Нестационарные каналы могут быть классифицированы по наличию зависимости переходов от предшествующих значений. Выделяют дискретные каналы с памятью, в которых такая зависимость имеет место, и дискретные каналы без памяти, где этой зависимости не существует.

При определенных соотношениях между вероятностями переходов, входящих в матрицу P , выделяют:

- симметричные каналы по входу, для которых вероятности, входящие в строку матрицы, являются перестановками одних и тех же чисел;
- симметричные каналы по выходу, для которых это относится к вероятностям, входящим в столбцы;
- симметричные каналы по входу и по выходу при соблюдении обоих условий.

На основе представленной классификации матрица двоичного симметричного канала имеет вид:

$$P = \begin{bmatrix} 1-P & P \\ P & 1-P \end{bmatrix},$$

где P — вероятность искажения символа; $1-P$ — вероятность прохождения символа.

Соответственно матрица двоичного симметричного канала со стиранием:

$$P = \begin{bmatrix} 1-P-q & P & q \\ P & 1-P-q & q \end{bmatrix},$$

где P — вероятность трансформации; $1-P-q$ — вероятность прохождения символа; q — вероятность стирания символа ($P+q < 1$).

Для двоичного канала без шума матрица переходов имеет вид (рис. 3):

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

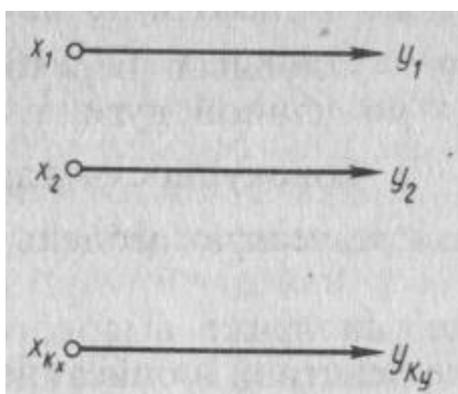


Рис. 3. Граф дискретного канала связи без шума

Основной характеристикой дискретного канала связи является пропускная способность. Под ней понимается верхний предел количества информации, которую можно передать через канал связи.

Количество взаимной информации, связывающей множества символов X и Y , составит:

$$I(X, Y) = I = H(Y) - H(Y/X).$$

Пропускная способность:

$$C = I_{\max} = H_{\max}(Y) - H_{\min}(Y/X).$$

Раскроем данное выражение для отдельных вариантов дискретного канала.

4. Пропускная способность дискретного канала передачи данных

Пропускная способность дискретного канала связи без шума. При отсутствии шума потерь информации в канале нет, поэтому:

$$H(Y/X) = 0, \text{ тогда } C = I_{\max} = H_{\max}(Y).$$

Максимум энтропии для дискретных событий достигается при их равновероятности, т. е. когда $P_1 = P_2 = \dots = P_K = 1/K$. Учитывая, что на выходе канала связи может появиться K_y символов, получим:

$$H_{\max} = -\sum_{i=1}^K p_i \log_2 p_i = -K_y \cdot \frac{1}{K_y} \log_2 \frac{1}{K_y} = -(\underbrace{\log_2 1}_{=0} - \log_2 K_y) = \log_2 K_y$$

Отсюда:

$$C = \log_2 K_y$$

Таким образом, пропускная способность дискретного канала без шума зависит только от основания кода. Чем оно больше, тем выше информативность каждого символа, тем больше пропускная способность. В данном представлении пропускная способность не связана со временем. При переходе от двоичного кода к четвертичному пропускная способность ДКС без шума увеличивается в два раза.

Пропускная способность дискретного канала связи с шумом.

Рассмотрим канал без стирания, для которого $K_x = K_y = K$. При наличии шума в ДКС входной символ x_j переходит в символ y_i с вероятностью $P(y_i/x_j)$.

Вероятность трансформации (искажения) символа x_j составит (вероятность появления какого-либо одного из нескольких несовместимых событий равна сумме вероятностей этих событий):

$$P = \sum_{i=1}^K P(y_i/x_j), \text{ при } i \neq j$$

Если же канал симметричен, то вероятности входящие в данную сумму, одинаковы, а поэтому вероятность трансформации (искажения) символа равна:

$$P = (K-1) \cdot P(y_i/x_j), \quad P/(K-1) = P(y_i/x_j), \text{ при } i \neq j,$$

($(K-1)$, так как $i = j$ не берется).

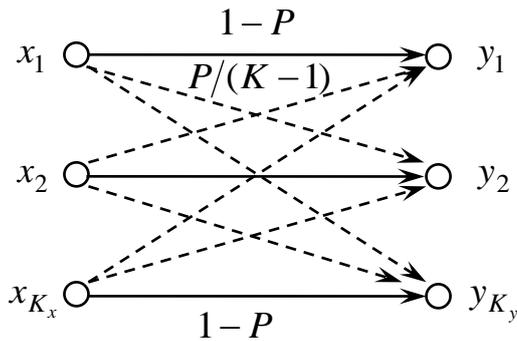
Вероятность прохождения символа:

$$1 - P = P(y_i/x_j), \text{ при } i = j \text{ (рис. 4).}$$

Пропускная способность рассматриваемого канала:

$$C = I_{\max} = H_{\max}(Y) - H_{\min}(Y/X)$$

Ранее показано, что $H_{\max}(Y) = \log_2 K_y$.



$(1 - P)$ — вероятность прохождения, $P/(K - 1)$ — вероятность трансформации

Рис. 4. Граф дискретного симметричного канала связи с шумом

Условная энтропия, отображающая потери информации из-за действия ошибок при прохождении ее по каналу связи (вероятность совместного появления нескольких событий равна произведению вероятностей этих событий):

$$H(Y / X) = - \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^K P(x_j) P(y_i / x_j) \log_2 P(y_i / x_j)$$

Принимая, что на входе ДКС символы равновероятны, то есть $P(x_j) = 1/K$, находим:

$$H(Y / X) = - \frac{1}{K} \left[\underbrace{K(1 - P) \log_2(1 - P)}_{\text{вероятности прохождения}} + \underbrace{K(K - 1) \frac{P}{(K - 1)} \log_2 \left(\frac{P}{K - 1} \right)}_{\text{вероятности трансформации}} \right] =$$

$$= -(1 - P) \log_2(1 - P) - P \log_2 \left(\frac{P}{K - 1} \right),$$

при этом учитываем, что общее число возможных переходов равно K^2 (если канал симметричный, или $K_x \cdot K_y$, если канал несимметричный). Количество переходов с вероятностями прохождения равно K , а количество переходов с вероятностями трансформации равно $K(K - 1)$.

Отсюда пропускная способность дискретного канала связи с шумом без стирания:

$$C = \log_2 K + (1 - P) \log_2(1 - P) + P \log_2 \left(\frac{P}{K - 1} \right).$$

Видно, что она увеличивается с ростом основания кода и с уменьшением вероятности трансформации символа.

В случае двоичного симметричного канала с шумом без стирания пропускная способность может быть найдена при $K = 2$, то есть:

$$C = 1 + (1 - P) \log_2(1 - P) + P \log_2 P$$

Зависимость пропускной способности двоичного симметричного канала от вероятности искажения символа представлена на рис. 5. При $P = 0$ получим $C = 1$. С ростом вероятности искажения до 0,5 пропускная способность падает до нуля. Рабочий диапазон дискретного канала соответствует вероятности $P \ll 0,1$. При этом пропускная способность близка к единице.

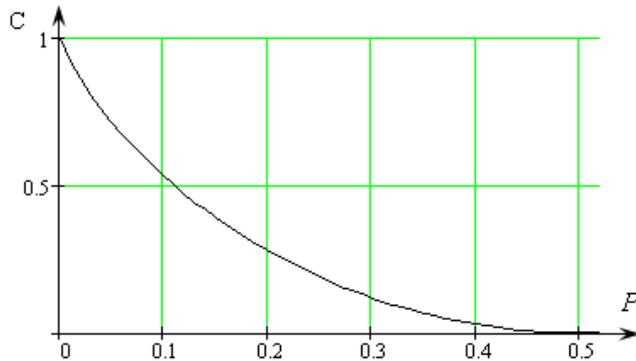


Рис. 5. Зависимость пропускной способности двоичного симметричного канала от вероятности искажения символа P

Пропускная способность двоичного симметричного **канала со стиранием**.

Если на входе двоичного канала имеют место символы x_1, x_2 , то при наличии стирания на выходе канала возникают символы y_1, y_2 и символы стирания y_3 . Символ стирания формируется при наличии в приемном устройстве специальной зоны стирания, попадание в которую означает возникновение символа неопределенности (стирания). Введение зоны стирания в приемное устройство позволяет снизить вероятность трансформации символа P за счет появления вероятности символа стирания q (рис. 6).

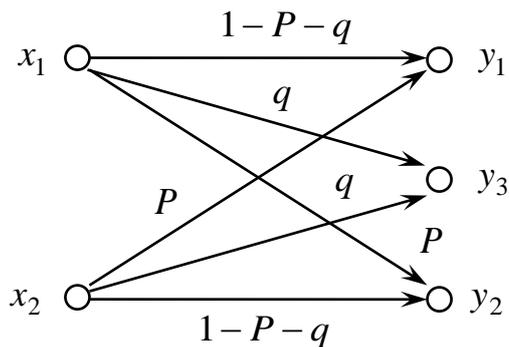


Рис. 6. Граф двоичного дискретного симметричного канала связи со стиранием

Тогда вероятность прохождения символа составляет $1 - P - q$. Пропускная способность $C = H_{\max}(Y) - H_{\min}(Y/X)$. При наличии символа стирания стремление к равновероятности символов на выходе канала не имеет смысла, поэтому энтропия на выходе $H(Y)$ определяется как:

$$H(Y) = -\sum_{i=1}^3 P(y_i) \log_2 P(y_i)$$

где $P(y_i)$ — вероятность возникновения на выходе дискретного канала символа y_i .

Найдем вероятности возникновения символов на выходе при условии, что символы на входе равновероятны, тогда:

$$P(x_1) = P(x_2) = 1/K_x = 1/2;$$

$$P(y_1) = \underbrace{P(x_1)P(y_1/x_1) + P(x_2)P(y_1/x_2)}_{\text{вероятность появления одного в двух событий}} = \underbrace{(1-P-q)}_{\text{вероятность прохождения } P(y_1/x_1)} / 2 + P/2 = (1-q)/2$$

;

$$P(y_2) = P(y_1);$$

$$P(y_3) = P(x_1)P(y_3/x_1) + P(x_2)P(y_3/x_2) = q/2 + q/2 = q.$$

Отсюда:

$$\begin{aligned} H(Y) &= -(P(y_1) \log_2 P(y_1) + P(y_2) \log_2 P(y_2) + P(y_3) \log_2 P(y_3)) = \\ &= -\frac{1-q}{2} \log_2 \left(\frac{1-q}{2} \right) - \frac{1-q}{2} \log_2 \left(\frac{1-q}{2} \right) - q \log_2 q = \\ &= -(1-q) \log_2 \left(\frac{1-q}{2} \right) - q \log_2 q = (-1+q) \left(\log_2(1-q) - \underbrace{\log_2 2}_1 \right) - q \log_2 q = \\ &= (1-q)[1 - \log_2(1-q)] - q \log_2 q. \end{aligned}$$

Соответственно условная энтропия:

$$\begin{aligned} H(Y/X) &= -\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^3 P(x_j)P(y_i/x_j) \log_2 P(y_i/x_j) = \\ &= -(1-P-q) \log_2(1-P-q) - P \log_2 P - q \log_2 q. \end{aligned}$$

Отсюда пропускная способность двоичного симметричного канала со стиранием:

$$C = (1-q)[1 - \log_2(1-q)] + (1-P-q) \log_2(1-P-q) + P \log_2 P.$$

Введение зоны стирания эффективно лишь при наличии помех. Тогда удается получить $P \ll q$ и повысить пропускную способность канала связи.

В общем случае в условиях действия помех повышение пропускной способности дискретного канала достигается за счет равновероятности символов на выходе и снижения вероятности искажения символа.

В случае симметричного канала связи равновероятность символов на выходе означает необходимость равновероятности символов на входе канала.

Снижение вероятности искажения символа в дискретном канале зависит от конструирования приемной схемы на физическом уровне.

На основании модели дискретного канала связи можно установить верхний предел количества информации и согласовать производительность источника с пропускной способностью канала связи. Условная энтропия $H(Y/X)$ дает возможность оценить минимально необходимую избыточность, отнесенную к одному символу кода. Это позволяет найти нижний предел избыточности при построении обнаруживающих и корректирующих кодов для каналов связи с шумами. Конкретное значение избыточности устанавливается из требований к вероятностно-временным характеристикам процесса передачи. Эти характеристики могут быть рассчитаны на основе модели функционирования системы передачи данных.

5. Пропускная способность непрерывного канала передачи данных

В непрерывном канале связи входной сигнал $x(t)$ преобразуется из-за наличия помехи в выходной сигнал $y(t)$ (рис. 7). Учитывая, что сигнал имеет случайную природу, он определяется плотностью распределения вероятностей своих значений на входе $\Psi(x)$ и на выходе — $\Psi(y)$ (плотность распределения вероятностей показывает вероятности, того, что случайная переменная будет принимать определенное значение). Количество взаимной информации, связывающей входной и выходной сигналы, соответствует выражению:

$$I(x, y) = I = H(y) - H(y/x),$$

где $H(y)$ — энтропия на выходе непрерывного канала; $H(y/x)$ — условная энтропия, отображающая потери при передаче через непрерывный канал связи.

Под пропускной способностью непрерывного канала связи понимают, как и ранее, верхний предел количества информации:

$$C = I_{\max} = H_{\max}(y) - H_{\min}(y/x).$$

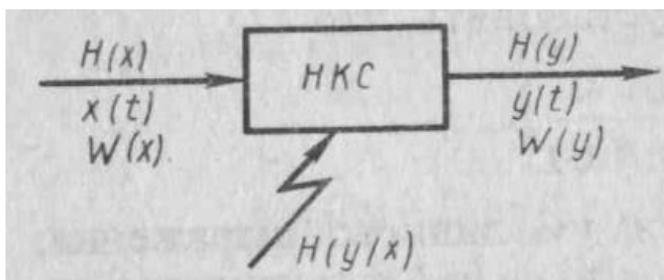


Рис. 7. Модель непрерывного канала связи с шумом

Примечание. Для характеристики случайной величины нужно знать совокупности возможных значений этой величины, а также вероятности, с которыми эти значения могут появляться. Эти данные образуют закон распределения случайной величины.

Если случайная переменная величина A может принимать любые значения, находящиеся в некотором интервале (a, b) (такая случайная величина называется непрерывной), то вероятность того, что величина A примет какое-

либо определенное значение x , равно нулю, так как число возможных случаев бесконечно.

Считая, что для каждого малого участка, находящегося на интервале (a, b) допустимых значений переменной A , вероятность попадания A на этот участок пропорциональна его длине, можно охарактеризовать случайную величину A , указав вероятность $\psi(x)dx$ того, что $x < A < x + dx$. Функция $\psi(x)$ называется плотностью распределения вероятности случайной величины A .

Пропускная способность непрерывного канала без шума. Для канала без шума $H(y/x) = 0$, $C = I_{\max} = H_{\max}(y)$.

Энтропия на выходе непрерывного канала определяется по следующей формуле:

$$H(y) = - \int_{-\infty}^{\infty} \psi(y) \log_2 \psi(y) dy$$

Максимум энтропии получаем для распределения, соответствующего нормальному закону (распределение Гаусса):

$$\psi(y) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-y^2/2\sigma^2}$$

где σ — параметр нормального закона распределения, который может принимать любые значения. Тогда:

$$C = I_{\max} = H_{\max}(y) = \log_2(\sigma\sqrt{2\pi e})$$

Пропускная способность непрерывного канала с шумом. Условная энтропия, отображающая потери при передаче через непрерывный канал связи:

$$H(y/x) = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x)\psi(o) \log_2 \psi(o) dx do$$

где $\psi(x)$, $\psi(o)$ — плотности распределения вероятностей значений на входе непрерывного канала и ошибок, существующих в канале.

Тогда пропускная способность непрерывного канала связи составит:

$$C = I = C_{\text{без шума}} + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x)\psi(o) \log_2 \psi(o) dx do$$

Если закон распределения ошибки имеет такие же параметры как закон распределения значений сигнала на входе и на выходе, то это означает, что уровень помех в канале достиг такой величины, при которой никакой зависимости между выходным и входным сигналом не остается. Статистическая независимость распределений $\psi(x)$ и $\psi(y)$ подтверждает, что сигнал полностью подавлен помехой, полезная информация не передается, т. е. $I = 0$. Это соответствует и нулевой пропускной способности.

Лекция № 8 Модуляция

- 1) Модуляция
- 2) Методы аналоговой модуляции
- 3) Методы дискретной модуляции

1. Модуляция

Физический уровень имеет дело с передачей битов по физическим каналам связи, таким, например, как коаксиальный кабель, витая пара, оптоволоконный кабель. К этому уровню имеют отношения характеристики физических сред передачи данных, такие как полоса пропускания, помехозащищенность.

Представление данных в виде электрических или оптических сигналов называется кодированием.

Сигналы от измерительных датчиков и любых других источников информации передаются по линиям связи к приемникам — измерительным приборам, в измерительно-вычислительные системы регистрации и обработки данных, в любые другие центры накопления и хранения данных. Как правило, информационные сигналы являются низкочастотными и ограниченными по ширине спектра, в отличие от широкополосных высокочастотных каналов связи, рассчитанных на передачу сигналов от множества источников одновременно с частотным разделением каналов. Перенос спектра сигналов из низкочастотной области в выделенную для их передачи область высоких частот выполняется операцией модуляции.

Допустим, что низкочастотный сигнал, подлежащий передаче по какому-либо каналу связи, задается функцией $\lambda(t)$. В канале связи для передачи данного сигнала выделяется определенный диапазон высоких частот. На входе канала связи в специальном передающем устройстве формируется вспомогательный, как правило, непрерывный во времени периодический высокочастотный сигнал $s(t) = f(t, a_1, a_2, \dots, a_m)$. Совокупность параметров a_i определяет форму вспомогательного сигнала. Значения параметров a_i в отсутствие модуляции являются величинами постоянными. Если на один из этих параметров перенести сигнал $\lambda(t)$, т. е. сделать его значение пропорционально зависимым от значения $\lambda(t)$ во времени (или по любой другой независимой переменной), то форма сигнала $s(t)$ приобретает новое свойство. Она несет информацию, тождественную информации в сигнале $\lambda(t)$. Именно поэтому сигнал $s(t)$ называют несущим сигналом, несущим колебанием, несущей частотой или просто несущей (carrier), а физический процесс переноса информации на параметры несущего сигнала — его модуляцией (modulation). Исходный информационный сигнал $\lambda(t)$ называют модулирующим (modulating signal), результат модуляции — модулированным сигналом (modulated signal). Обратную операцию выделения модулирующего сигнала из модулированного колебания называют демодуляцией (demodulation).

В случае если в качестве несущего сигнала используется гармоническое колебание:

$$s(t) = A \sin(\Omega t + \varphi),$$

которое имеет три свободных параметра A, Ω, φ , то реализуется аналоговая модуляция (подчеркивается тот факт, что кодирование осуществляется за счет изменения параметров аналогового сигнала). Причем в зависимости от того, на какой из данных параметров переносится информация, различают амплитудную (АМ), частотную (ЧМ) или фазовую (ФМ) аналоговую модуляцию несущего сигнала. Частотная и фазовая модуляция взаимосвязаны, поскольку изменяют аргумент функции синуса, и их обычно объединяют под общим названием — угловая модуляция (УМ). Получила также распространение квадратурная модуляция, при которой одновременно изменяются амплитуда и фаза несущих колебаний.

При использовании в качестве несущих сигналов периодических последовательностей импульсов параметрами модуляции могут быть амплитуда, ширина (длительность), частота следования импульсов и фаза (положение импульса относительно определенной точки тактового интервала). Это дает четыре основных вида импульсной модуляции: амплитудно-импульсная (АИМ), широтно-импульсная (ШИМ), частотно-импульсная (ЧИМ) и фазоимпульсная (ФИМ).

Существует синоним понятия «импульсная модуляция» — «дискретная модуляция» — это процесс представления аналоговой информации в дискретной форме.

Передача изначально дискретных данных с использованием последовательности импульсов называется цифровым кодированием.

2. Методы аналоговой модуляции

Аналоговая модуляция применяется для передачи данных по каналам с узкой полосой частот, типичным представителем которых является канал тональной частоты, предоставляемый в распоряжение пользователям общественных телефонных сетей. Типичная амплитудно-частотная характеристика канала тональной частоты представлена на рис. 1.

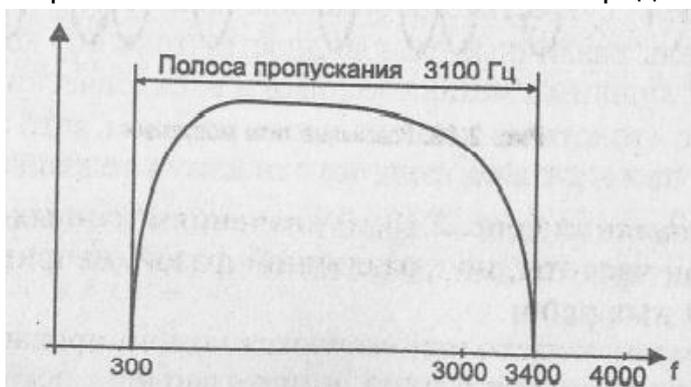


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика канала тональной частоты

Этот канал передает частоты в диапазоне от 300 до 3400 Гц, таким образом, его полоса пропускания равна 3100 Гц. Хотя человеческий голос имеет гораздо

более широкий спектр — примерно от 100 Гц до 10 кГц, — для приемлемого качества передачи речи диапазон в 3100 Гц является достаточным. Строгое ограничение полосы пропускания тонального канала связано с использованием аппаратуры уплотнения и коммутации каналов в телефонных сетях.

Устройство, которое выполняет функции модуляции несущей синусоиды на передающей стороне и демодуляции на приемной стороне, носит название модем (модулятор-демодулятор).

Аналоговая модуляция является таким способом физического кодирования, при котором информация кодируется изменением амплитуды, частоты или фазы синусоидального сигнала несущей частоты.

Передача дискретных данных с использованием аналоговой модуляции. На диаграмме (рис. 2, а) показана последовательность бит исходной информации, представленная потенциалами высокого уровня для логической единицы и потенциалом нулевого уровня для логического нуля. Такой способ кодирования называется потенциальным кодом, который часто используется при передаче данных между блоками компьютера.

При **амплитудной модуляции** (рис. 2, б) для логической единицы выбирается один уровень амплитуды синусоиды несущей частоты, а для логического нуля — другой. Этот способ редко используется в чистом виде на практике из-за низкой помехоустойчивости, но часто применяется в сочетании с другим видом модуляции — фазовой модуляцией.

При **частотной модуляции** (рис. 2, в) значения 0 и 1 исходных данных передаются синусоидами с различной частотой — f_0 и f_1 . Этот способ модуляции не требует сложных схем в модемах и обычно применяется в низкоскоростных модемах, работающих на скоростях 300 или 1200 бит/с.

При **фазовой модуляции** (рис. 2, г) значениям данных 0 и 1 соответствуют сигналы одинаковой частоты, но с различной фазой, например 0 и 180 градусов или 0, 90, 180 и 270 градусов.

При **фазоразностной модуляции** каждому информационному элементу ставится в соответствие не абсолютное значение фазы, а ее изменение относительно предыдущего значения. Если информационный элемент есть *дибит*, то в зависимости от его значения (00, 01, 10 или 11) фаза сигнала может измениться на 90° , 180° , 270° или не измениться вовсе.

В скоростных модемах часто используются комбинированные методы модуляции, как правило, амплитудная в сочетании с фазовой.

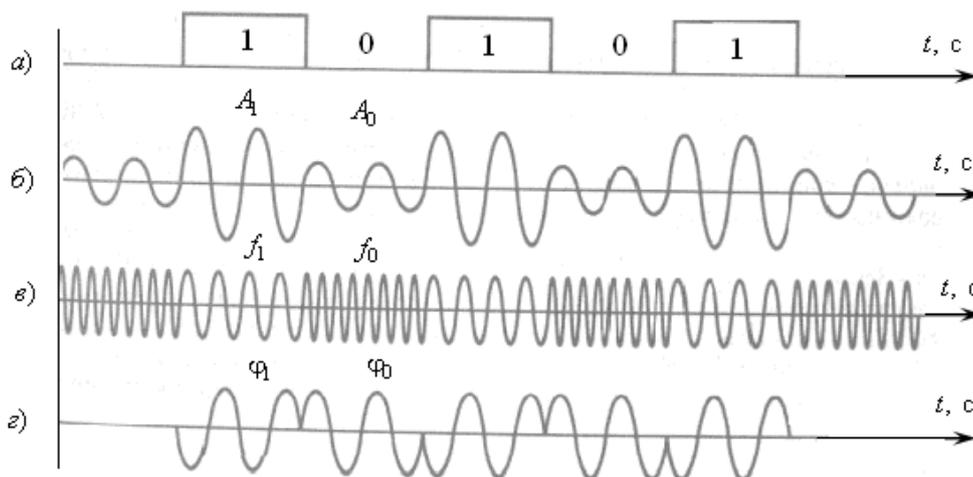


Рис. 2. Методы аналоговой модуляции

Амплитудно-фазовая модуляция (квадратурная модуляция). В данном виде модуляции для повышения пропускной способности используют одновременную манипуляцию двух параметров несущего колебания — амплитуды и фазы. Каждое возможное состояние модулированного сигнала (вектор сигнала или точка сигнального пространства) характеризуется определенным значением амплитуды и фазы, которые входят в так называемое созвездие.

Сигнал с квадратурной модуляцией представляет собой сумму двух несущих колебаний одной и той же частоты, сдвинутых по фазе друг относительно друга на 90° , т. е. находящихся в квадратуре, каждая несущая модулирована по амплитуде своим модулирующим сигналом:

$$s(t) = x(t) \sin(\omega t) + y(t) \cos(\omega t),$$

где $x(t) = A_i \sin(\omega_x t)$, $y(t) = B_i \sin(\omega_y t)$ — модулирующие сигналы для четных и нечетных импульсов (бит исходной дискретной последовательности); A_i , B_i — амплитуды модулирующих сигналов, зависящие от значения бита (0 или 1).

Косинусная составляющая называется синфазной, синусная — квадратурной. Сигнал исходных передаваемых данных разделяется на два потока — четные импульсы модулирует синусоидальное несущее колебание, а нечетные импульсы — косинусоидальное. Затем два модулированных колебания складываются, образуя единое квадратурно-модулированное колебание.

Передача непрерывных данных с использованием аналоговой модуляции.

Амплитудная модуляция. В системах с амплитудной модуляцией модулирующая функция $\lambda(t)$ (полезный сигнал, который необходимо передать) изменяет амплитуду высокочастотной гармонической функции сигнала-переносчика $s(t)$ и амплитудно-модулированный сигнал имеет вид:

$$s_a(t) = [1 + m\lambda(t)]s(t),$$

где $s(t) = A \sin(\Omega t + \varphi)$ — высокочастотный сигнал-переносчик (несущий сигнал); m — коэффициент амплитудной модуляции, характеризующий глубину модуляции.

Если модулирующий сигнал представлен одночастотным гармоническим колебанием $\lambda(t) = A_0 \sin(\omega_0 t)$ с амплитудой A_0 , то коэффициент модуляции

$$m = \frac{A_0}{A}$$

равен отношению амплитуд модулирующего и несущего колебания

Значение m должно находиться в пределах от 0 до 1 для всех гармоник модулирующего сигнала. При значении $m < 1$ форма огибающей амплитудно-модулированного колебания $s_a(t)$ полностью повторяет форму модулирующего сигнала $\lambda(t)$, что можно видеть на рис. 3.

Малую глубину модуляции $m \ll 1$ для основных гармоник модулирующего сигнала применять нецелесообразно, т. к. при этом мощность (амплитуда) передаваемого информационного сигнала будет много меньше мощности несущего колебания, и мощность передатчика будет использоваться неэкономично.

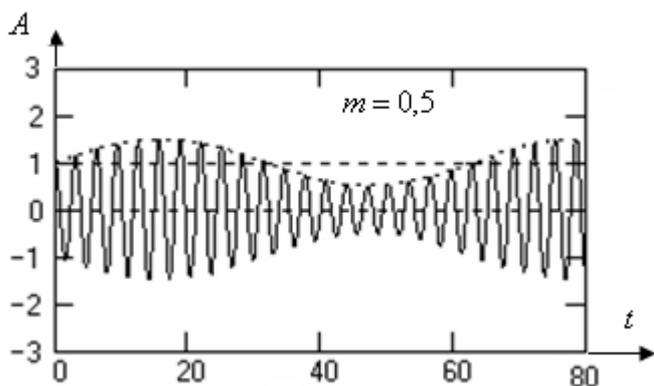


Рис. 3. Модулированный сигнал

На рис. 4 приведен пример глубокой модуляции, при которой значение $m = 1$. При глубокой модуляции используются также понятия относительного

коэффициента модуляции вверх: $m_{\text{в}} = \frac{A_{\text{max}} - A}{A}$ и модуляции вниз: $m_{\text{н}} = \frac{A - A_{\text{min}}}{A}$, которые выражаются в %.

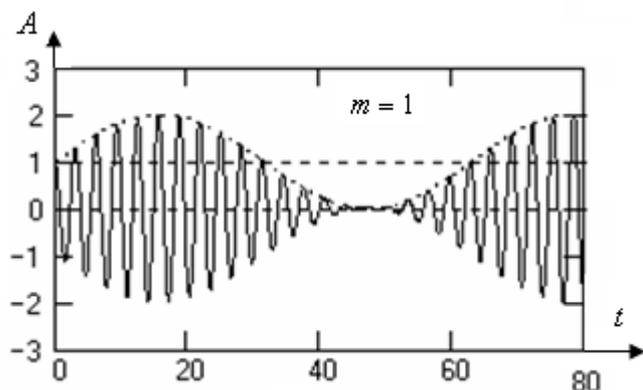


Рис. 4. Глубокая модуляция

Стопроцентная модуляция ($m = 1$) может приводить к искажениям сигналов при перегрузках передатчика, если последний имеет ограниченный динамический диапазон по амплитуде несущих частот или ограниченную мощность передатчика (увеличение амплитуды несущих колебаний в пиковых интервалах сигнала $s_a(t)$ в два раза требует увеличения мощности передатчика в четыре раза).

При $m > 1$ возникает так называемая перемодуляция, пример которой приведен на рис. 5. Форма огибающей при перемодуляции искажается относительно формы модулирующего сигнала, и после демодуляции, если применяются ее простейшие методы, информация может быть искажена.

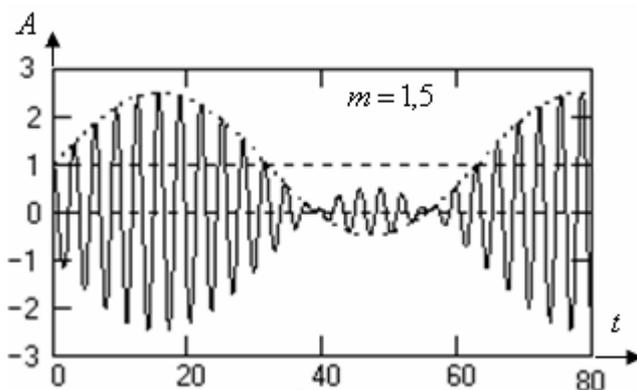


Рис. 5. Перемодуляция сигнала

Простейшая форма модулированного сигнала создается при однотоновой амплитудной модуляции — модуляции несущего сигнала гармоническим колебанием с одной частотой, например если $\lambda(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ или $\lambda(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$.

Многотональный модулирующий сигнал имеет произвольный спектральный состав. Математическая модель такого сигнала может быть аппроксимирована тригонометрической суммой гармонических составляющих:

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad \text{или} \quad \lambda(t) = \sum_{i=1}^m A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$$

$$\text{или} \quad \lambda(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + \sum_{j=1}^m A_j \cos(\omega_j t + \varphi_j)$$

Амплитудно-модулированный сигнал имеет дискретный (линейчатый) спектр, состоящий из трех линий (в случае однотоновой модуляции) (рис. 6): несущей частоты — Ω и двух боковых частот $(\Omega - \omega_0)$ и $(\Omega + \omega_0)$ — одна ниже, другая выше несущей частоты. Их называют верхней и нижней боковыми частотами. Вся информация о модулирующей функции полностью содержится в любой из боковых частот.

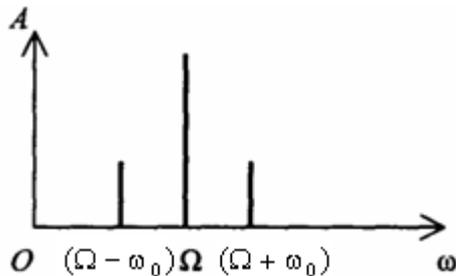


Рис. 6. Спектр амплитудно-модулированного сигнала при однотоновой модуляции

Спектр сигнала $f(t)$ строится с использованием формулы прямого преобразования Фурье:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

Функция угловой частоты ω — $F(j\omega)$ называется Фурье-изображением или частотным спектром функции $f(t)$ или спектральной характеристикой функции $f(t)$. Спектр характеризует соотношение амплитуд и фаз бесконечного множества бесконечно малых синусоидальных компонент, составляющих в сумме непериодический сигнал $f(t)$.

Спектральную характеристику можно представить в виде:

$$F(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega),$$

где $U(\omega) = \text{Re}[F(j\omega)]$ — действительная часть спектральной характеристики; $V(\omega) = \text{Im}[F(j\omega)]$ — мнимая часть спектральной характеристики.

Или можно записать в показательной форме:

$$F(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)},$$

где $A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$ — амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

непрерывной функции $f(t)$; $\varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}$ — фаза-частотная характеристика (ФЧХ).

Физический смысл частотных характеристик:

— АЧХ показывает с какой амплитудой гармоника частоты ω входит в данную функцию;

— ФЧХ показывает на какой угол сдвинута гармоника частоты ω от начала отсчета.

Система с амплитудной модуляцией, которая передает обе боковых и несущую частоту называется двухполосной системой. Несущая не несет никакой полезной информации и может быть удалена, но с несущей или без, полоса сигнала двухполосной системы вдвое больше полосы изначального сигнала. Для сужения рабочей полосы частот канала связи возможно вытеснение не только несущей, но и одной из боковых частот, так как они несут одну информацию. Этот вид амплитудной модуляции известен, как однополосная модуляция с подавленной несущей. При этом создается новый сигнал, идентичный оригиналу, но сдвинутый вверх по частоте.

В случае многотональной амплитудной модуляции верхних (и нижних) боковых частот образуется такое же количество, сколько гармоник содержит модулирующий сигнал $\lambda(t)$.

Демодуляция сигнала с амплитудной модуляцией достигается путем смешивания модулированного сигнала с несущей той же самой частоты, что и на модуляторе. Изначальный сигнал затем получают путем фильтрации. При использовании однополосной модуляции с подавленной несущей для демодуляции генерируется на месте, и она может не совпадать с частотой несущей на модуляторе. Небольшая разница между двумя несущими частотами является причиной несовпадения восстанавливаемых частот, что присуще телефонным сетям.

Частотная модуляция. В системах с частотной модуляцией частота модулируемого сигнала образуется сложением частоты высокочастотного несущего колебания Ω со значением модулирующего сигнала $\lambda(t)$ с определенным коэффициентом пропорциональности $\Delta\omega$ — девиацией частоты:

$$\omega_m = \Omega + \Delta\omega \cdot \lambda(t)$$

Девиация частоты — это наибольшее отклонение частоты модулированного сигнала при частотной модуляции от значения его несущей частоты.

Соответственно, фаза колебаний (интеграл от частоты есть фаза):

$$\psi(t) = \Omega t + \Delta\omega \cdot \int_0^t \lambda(t) dt + \varphi$$

Тогда частотно-модулированный сигнал:

$$s_\omega(t) = A \sin \left(\Omega t + \Delta\omega \cdot \int_0^t \lambda(t) dt + \varphi \right)$$

Для характеристики глубины частотной модуляции используются понятия девиации частоты вверх $\Delta\omega_B = \Delta\omega \lambda_{\max}$, и вниз $\Delta\omega_H = \Delta\omega \lambda_{\min}$.

Частотная модуляция помехоустойчива, поскольку искажению при помехах подвергается в основном амплитуда сигнала, а не частота. Частотная модуляция превосходит амплитудную в устойчивости к некоторым воздействиям, присутствующим в телефонной сети и ее следует использовать на более низких

скоростях (иначе полоса частот частотно-модулированного сигнала будет еще шире).

Фазовая модуляция. При фазовой модуляции информативным параметром сигнала-переносчика служит фаза φ несущей частоты Ω :

$$s_{\varphi}(t) = A \sin(\Omega t + \varphi + \Delta\varphi\lambda(t)),$$

где $\Delta\varphi$ — коэффициент фазовой модуляции.

Для характеристики глубины фазовой модуляции используются понятия девиации фазы вверх $\Delta\psi_{\text{в}} = \Delta\varphi\lambda_{\text{max}}$ и вниз $\Delta\psi_{\text{н}} = \Delta\varphi\lambda_{\text{min}}$.

Частотную и фазовую модуляции объединяют под общим названием угловой модуляции, поскольку по форме колебаний невозможно определить, к какому виду модуляции относится данное колебание, к фазовой или частотной, а при достаточно гладких функциях $\lambda(t)$ формы сигналов вообще практически не отличаются.

При фазовой и частотной модуляции спектр сигнала получается более сложным, чем при амплитудной модуляции, так как боковых гармоник здесь образуется более двух, но они также симметрично расположены относительно основной несущей частоты, а их амплитуды быстро убывают. Поэтому эти виды модуляции также хорошо подходят для передачи данных по каналу тональной частоты.

Амплитудно-фазовая (квадратурная) модуляция позволяет модулировать несущую частоту одновременно двумя сигналами путем модуляции амплитуды несущей одним сигналом, и фазы несущей другим сигналом. Амплитудно-

фазомодулированный сигнал $s_{\text{аф}}(t)$ формируют в следующем виде:

$$s_{\text{аф}}(t) = \lambda_1(t) \cos(\Omega t + \varphi + \Delta\varphi\lambda_2(t)),$$

где $\lambda_1(t) = \sin(\omega_0 t)$, $\lambda_2(t) = \cos(\omega_0 t)$ — модулирующие сигналы.

Раскроем косинус суммы и представим сигнал в виде суммы двух амплитудно-модулированных колебаний:

$$s_{\text{аф}}(t) = \lambda_1(t) \cos(\Omega t + \varphi) \cos(\Delta\varphi\lambda_2(t)) - \lambda_1(t) \sin(\Omega t + \varphi) \sin(\Delta\varphi\lambda_2(t)).$$

При $a(t) = \lambda_1(t) \cos(\Delta\varphi\lambda_2(t))$, $b(t) = -\lambda_1(t) \sin(\Delta\varphi\lambda_2(t))$ сигналы $a(t)$, $b(t)$ могут быть использованы в качестве модулирующих сигналов несущих колебаний $\cos(\Omega t + \varphi)$ и $\sin(\Omega t + \varphi)$, сдвинутых по фазе на 90° относительно друг друга:

$$s_{\text{аф}}(t) = a(t) \cos(\Omega t + \varphi) + b(t) \sin(\Omega t + \varphi).$$

Полученный сигнал называют квадратурным, а способ модуляции — квадратурной модуляцией. Низкочастотные составляющие $a(t)$ и $b(t)$ выделяются фильтром низких частот.

3. Методы дискретной модуляции

Основной тенденцией развития телекоммуникаций во всем мире является цифровизация сетей связи, предусматривающая построение сети на базе цифровых методов передачи и коммутации. Это объясняется следующими

существенными преимуществами цифровых методов передачи перед аналоговыми:

— высокая помехоустойчивость. Представление информации в цифровой форме позволяет осуществлять регенерацию (восстановление) этих символов при передаче их по линии связи, что резко снижает влияние помех и искажений на качество передачи информации;

— слабая зависимость качества передачи от длины линии связи. В пределах каждого регенерационного участка искажения передаваемых сигналов оказываются ничтожными. Длина регенерационного участка и оборудование регенератора при передаче сигналов на большие расстояния остаются практически такими же, как и в случае передачи на малые расстояния. Так, при увеличении длины линии в 100 раз для сохранения неизменным качества передачи информации достаточно уменьшить длину регенерационного участка лишь на несколько процентов;

— возможность построения цифровой сети связи. Цифровые системы передачи в сочетании с цифровыми системами коммутации являются основой цифровой сети связи, в которой передача, транзит и коммутация сигналов осуществляются в цифровой форме. При этом параметры каналов практически не зависят от структуры сети, что обеспечивает возможность построения гибкой разветвленной сети, обладающей высокими надежностными и качественными показателями;

— высокие технико-экономические показатели. Передача и коммутация сигналов в цифровой форме позволяют реализовывать оборудование на единых аппаратных платформах. Это позволяет резко снижать трудоемкость изготовления оборудования, значительно снижать его стоимость, потребляемую энергию и габариты. Кроме того, существенно упрощается эксплуатация систем и повышается их надежность.

В связи с этим в настоящее время данные, изначально имеющие аналоговую форму — речь, телевизионное изображение, — передаются по каналам связи в дискретном виде, то есть в виде последовательности единиц и нулей. Процесс представления аналоговой информации в дискретной форме называется дискретной модуляцией.

В процессе преобразования непрерывного сигнала в дискретный сигнал импульсный элемент, состоящий из идеального импульсного элемента (ключ) и формирующего устройства (модулятор) решает две задачи. Ключ выполняет дискретизацию входного сигнала $u(t)$ с периодом T , в результате на выходе появляется сигнал $u[kT]$. Формирующее устройство выполняет импульсную модуляцию, изменяя какой-либо параметр импульса (амплитуду, ширину) пропорционально входным сигналам $u[kT]$, в результате на выходе появляется сигнал $u^*(t)$.

При **амплитудно-импульсной модуляции (АИМ)** модулируемым (изменяемым) параметром служит амплитуда (высота) импульсов. Сигнал $u^*(t)$ на выходе импульсного элемента формируется в виде (рис. 7):

$$u^*(t) = \begin{cases} K_a u[kT] & \text{при } kT \leq t < (k + \gamma)T, \\ 0 & \text{при } (k + \gamma)T \leq t < (k + 1)T, \end{cases}$$

где K_a — коэффициент пропорциональности; γ — скважность импульсов ($0 < \gamma \leq 1$), которая остается постоянной.

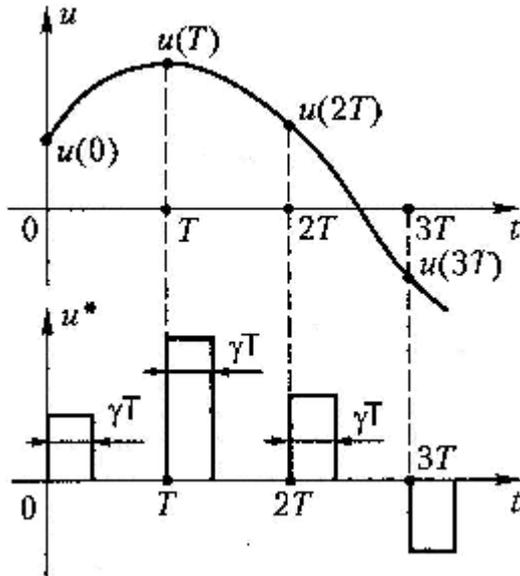


Рис. 7. Амплитудно-импульсная модуляция (АИМ)

При **широтно-импульсной модуляции (ШИМ)** модулируемым параметром является ширина (длительность) импульсов $\tau_k = \gamma_k T$, где $\gamma_k = \gamma(kT)$ — скважность k -го импульса. Амплитуда импульсов при этом остается постоянной.

Сигнал $u^*(t)$ на выходе импульсного элемента формируется в виде (рис. 8):

$$u^*(t) = \begin{cases} h \cdot \text{sign}(u[kT]) & \text{при } kT \leq t < (k + \gamma_k)T, \\ 0 & \text{при } (k + \gamma_k)T \leq t < (k + 1)T, \end{cases}$$

где h — амплитуда импульсов; $\text{sign}(u[kT])$ — функция, определяющая знак величины $u[kT]$.

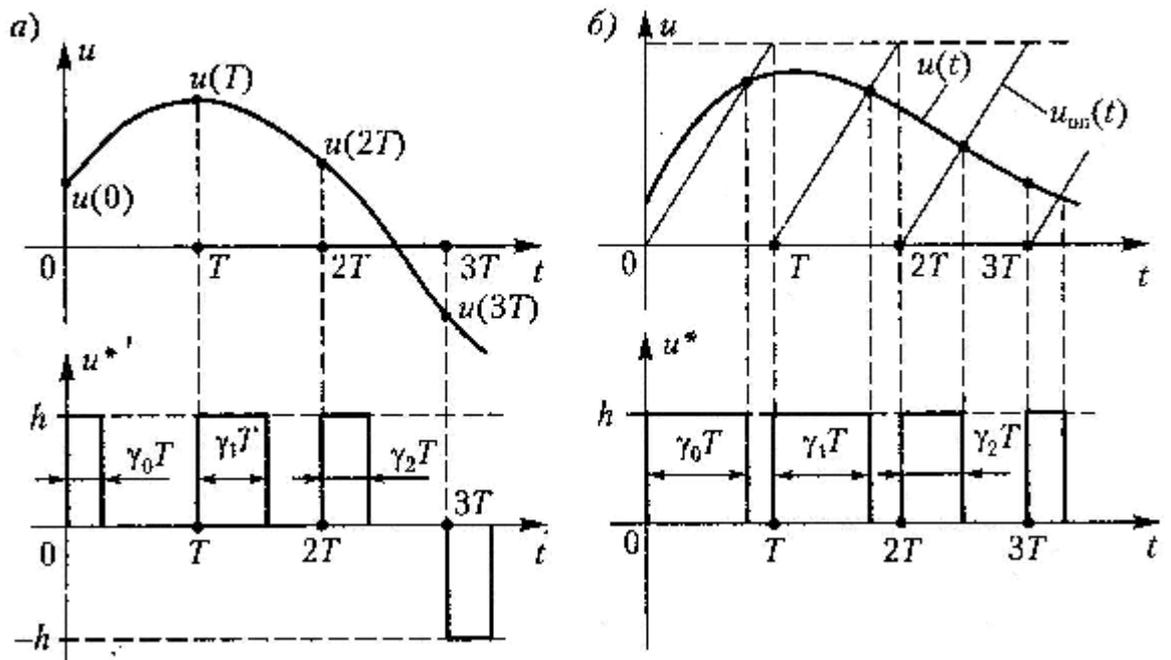


Рис. 8. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ)

В зависимости от способа определения текущего значения скважности импульсов γ_k различают широтно-импульсную модуляцию 1-го рода (ШИМ-1) и широтно-импульсную модуляцию 2-го рода (ШИМ-2).

При ШИМ-1 (рис. 8, а) скважность k -го импульса равна:

$$\gamma_k = \begin{cases} K_{\text{ш}} \cdot |u[kT]| & \text{при } K_{\text{ш}} \cdot |u[kT]| < 1, \\ 1 & \text{при } K_{\text{ш}} \cdot |u[kT]| \geq 1, \end{cases}$$

где $K_{\text{ш}}$ — коэффициент пропорциональности (крутизна характеристики широтно-импульсного модулятора).

При ШИМ-2 (рис. 8, б) длительность импульсов определяется в результате сравнения непрерывного входного сигнала $u(t)$ с некоторым периодическим опорным сигналом $u_{\text{оп}}(t)$, в качестве которого обычно используется пилообразный сигнал, формируемый специальным генератором. Импульсы запускаются в моменты времени $t = kT$ и существуют до момента совпадения сигналов $u(t)$ и $u_{\text{оп}}(t)$. Как правило, ШИМ-2 используют в системах, в которых сигнал $u(t)$ не меняет свой знак.

Лекция № 9 Цифровое и логическое кодирование

- 1) Требования, предъявляемые к методам цифрового кодирования
- 2) Методы цифрового кодирования
- 3) Методы логического кодирования

1. Требования, предъявляемые к методам цифрового кодирования

При цифровом кодировании дискретной информации применяют потенциальные и импульсные коды.

В потенциальных кодах для представления логических единиц и нулей используется только значение потенциала сигнала, а его перепады, формирующие законченные импульсы, во внимание не принимаются.

Импульсные коды позволяют представить двоичные данные либо импульсами определенной полярности, либо частью импульса — перепадом потенциала определенного направления.

При использовании импульсов для передачи дискретной информации необходимо выбрать такой способ кодирования, который одновременно достигал бы нескольких целей:

- имел при одной и той же битовой скорости наименьшую ширину спектра результирующего сигнала;
- обеспечивал синхронизацию между передатчиком и приемником;
- обладал способностью распознавать ошибки;
- обладал низкой стоимостью реализации.

Более узкий спектр сигналов позволяет на одной и той же линии (с одной и той же полосой пропускания) добиваться более высокой скорости передачи данных. Кроме того, часто к спектру сигнала предъявляется требование отсутствия постоянной составляющей, то есть наличия постоянного тока между передатчиком и приемником. В частности, применение различных трансформаторных схем гальванической развязки препятствует прохождению постоянного тока.

Гальваническая развязка — передача энергии между участками электрической цепи без обеспечения между ними электрического контакта. Развязки используются для передачи сигналов, для бесконтактного управления и для защиты цепей автоматики от слишком больших токов.

Без использования развязки предельный ток, протекающий между цепями, ограничен только электрическими сопротивлениями, которые обычно относительно малы. В результате возможно протекание выравнивающих токов и других токов, способных повреждать компоненты цепи или поражать людей, случайно схватившихся за оборудование, имеющее электрический контакт с цепью. Прибор, обеспечивающий развязку, искусственно ограничивает передачу энергии из одной части цепи в другую. В качестве такого прибора может использоваться трансформатор. В обоих случаях цепи оказываются электрически разделенными, но между ними возможна передача энергии.

Синхронизация передатчика и приемника нужна для того, чтобы приемник точно знал, в какой момент времени необходимо считывать новую информацию с линии связи. Эта проблема в сетях решается сложнее, чем при обмене данными между близко расположенными устройствами, например между блоками внутри компьютера или же между компьютером и принтером. На небольших расстояниях хорошо работает схема, основанная на отдельной тактирующей линии связи (рис. 1), так что информация снимается с линии данных только в момент прихода тактового импульса.



Рис. 1. Синхронизация приемника и передатчика на небольших расстояниях

В сетях использование этой схемы вызывает трудности из-за неоднородности характеристик проводников в кабелях. На больших расстояниях неравномерность скорости распространения сигнала может привести к тому, что тактовый импульс придет настолько позже или раньше соответствующего сигнала данных, что бит данных будет пропущен или считан повторно. Другой причиной, по которой в сетях отказываются от использования тактирующих импульсов, является экономия проводников в дорогостоящих кабелях.

Поэтому в сетях применяются так называемые самосинхронизирующиеся коды, сигналы которых несут для передатчика указания о том, в какой момент времени нужно осуществлять распознавание очередного бита (или нескольких бит, если код ориентирован более чем на два состояния сигнала). Любой резкий перепад сигнала — так называемый фронт — может служить хорошим указанием для синхронизации приемника с передатчиком.

При использовании синусоид в качестве несущего сигнала результирующий код обладает свойством самосинхронизации, так как изменение амплитуды несущей частоты дает возможность приемнику определить момент появления входного кода.

Распознавание и коррекцию искаженных данных сложно осуществить средствами физического уровня, поэтому чаще всего эту работу берут на себя протоколы, лежащие выше: канальный, сетевой, транспортный или прикладной. С другой стороны, распознавание ошибок на физическом уровне экономит время, так как приемник не ждет полного помещения кадра в буфер, а отбраковывает его сразу при распознавании ошибочных бит внутри кадра.

Требования, предъявляемые к методам кодирования, являются взаимно противоречивыми, поэтому каждый из рассматриваемых ниже методов цифрового кодирования обладает своими преимуществами и своими недостатками по сравнению с другими.

2. Методы цифрового кодирования

На рис. 2, а показан метод потенциального кодирования, называемый также кодированием без возвращения к нулю (Non Return to Zero, NRZ). Последнее название отражает то обстоятельство, что при передаче последовательности единиц сигнал не возвращается к нулю в течение такта. Метод NRZ прост в реализации, обладает хорошей распознаваемостью ошибок (из-за двух резко отличающихся потенциалов), но не обладает свойством самосинхронизации. При передаче длинной последовательности единиц или нулей сигнал на линии не изменяется, поэтому приемник лишен возможности определять по входному сигналу моменты времени, когда нужно в очередной раз считывать данные. Даже при наличии высокоточного тактового генератора приемник может ошибиться с моментом съема данных, так как частоты двух генераторов никогда не бывают полностью идентичными. Поэтому при высоких скоростях обмена данными и длинных последовательностях единиц или нулей небольшое рассогласование тактовых частот может привести к ошибке в целый такт и, соответственно, считыванию некорректного значения бита.

Другим серьезным недостатком метода NRZ является наличие низкочастотной составляющей, которая приближается к нулю при передаче длинных последовательностей единиц или нулей. Из-за этого многие каналы связи, не обеспечивающие прямого гальванического соединения между приемником и источником, этот вид кодирования не поддерживают. В результате в чистом виде код NRZ в сетях не используется. Тем не менее, используются его различные модификации, в которых устраняют как плохую самосинхронизацию кода NRZ, так и наличие постоянной составляющей.

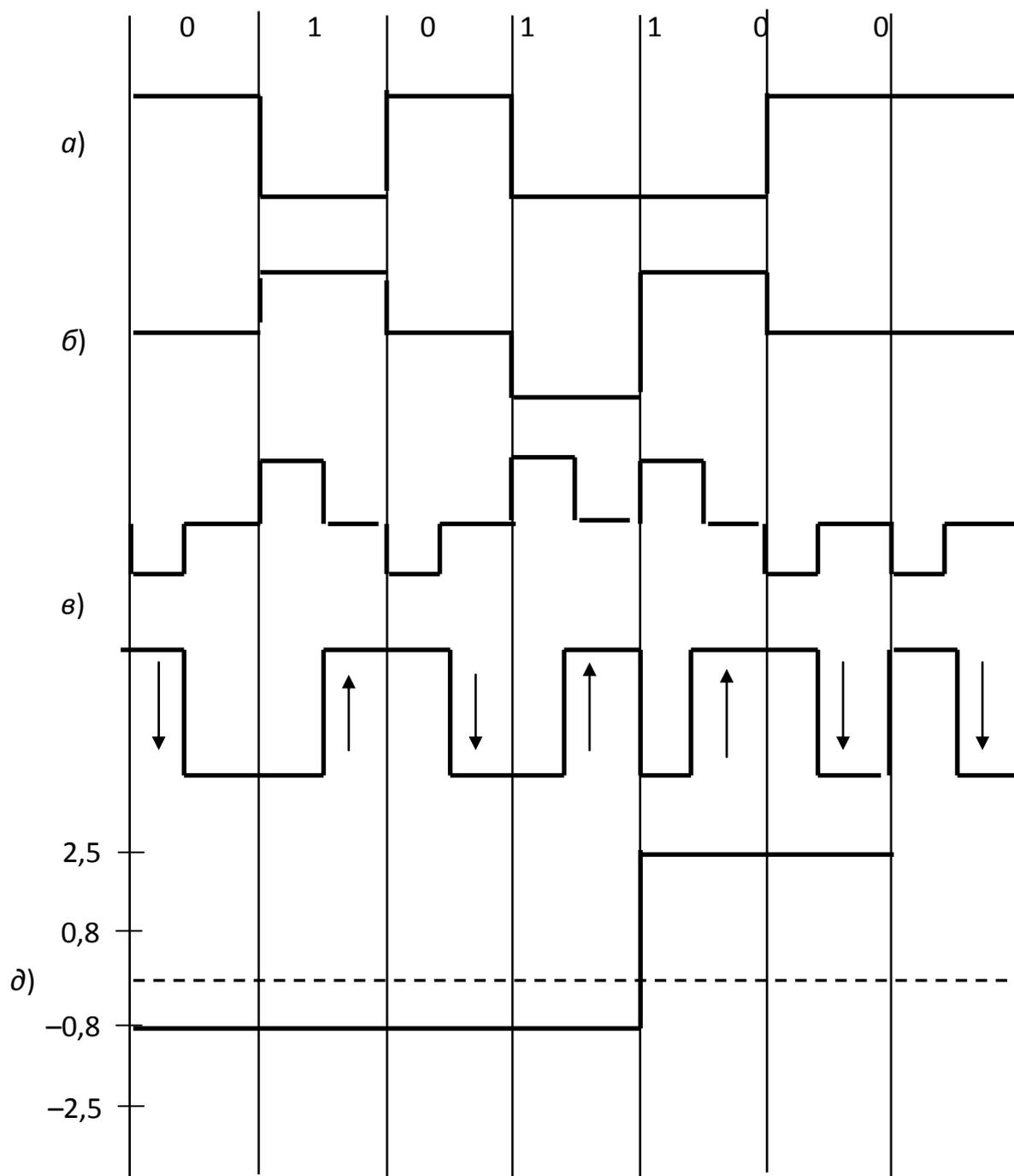


Рис. 2. Способы цифрового кодирования данных

Одной из модификаций метода NRZ является **метод биполярного кодирования с альтернативной инверсией** (Bipolar Alternate Mark Inversion, AMI). В этом методе (рис. 2, б) используются три уровня потенциала — отрицательный, нулевой и положительный. Для кодирования логического нуля используется нулевой потенциал, а логическая единица кодируется либо положительным потенциалом, либо отрицательным, при этом потенциал каждой новой единицы противоположен потенциалу предыдущей.

Код AMI частично ликвидирует проблемы постоянной составляющей и отсутствия самосинхронизации, присущие коду NRZ. Это происходит при передаче длинных последовательностей единиц. В этих случаях сигнал на линии представляет собой последовательность разнополярных импульсов. Длинные же

последовательности нулей также опасны для кода AMI, как и для кода NRZ — сигнал вырождается в постоянный потенциал нулевой амплитуды.

Код AMI предоставляет также некоторые возможности по распознаванию ошибочных сигналов. Так, нарушение строгого чередования полярности сигналов говорит о ложном импульсе или исчезновении с линии корректного импульса. Сигнал с некорректной полярностью называется запрещенным сигналом.

В коде AMI используются не два, а три уровня сигнала на линии. Дополнительный уровень требует увеличение мощности передатчика примерно на 3 дБ для обеспечения той же достоверности приема бит на линии, что является общим недостатком кодов с несколькими состояниями сигнала по сравнению с кодами, которые различают только два состояния.

Кроме потенциальных кодов в сетях используются и импульсные коды, когда данные представлены полным импульсом или же его частью — фронтом. Наиболее простым случаем такого подхода является **биполярный импульсный код**, в котором единица представлена импульсом одной полярности, а ноль — другой (рис. 2, в). Каждый импульс длится половину такта. Такой код обладает отличными самосинхронизирующими свойствами, но постоянная составляющая может присутствовать, например, при передаче длинной последовательности единиц или нулей.

В **манчестерском коде** для кодирования единиц и нулей используется перепад потенциала, то есть фронт импульса (рис. 2, г). При манчестерском кодировании каждый такт делится на две части. Информация кодируется перепадами потенциала, происходящими в середине каждого такта. Единица кодируется перепадом от низкого уровня сигнала к высокому, а ноль — обратным перепадом. В начале каждого такта может происходить служебный перепад сигнала, если нужно представить несколько единиц или нулей подряд. Так как сигнал изменяется по крайней мере один раз за такт передачи одного бита данных, то манчестерский код обладает хорошими самосинхронизирующими свойствами. Манчестерский код имеет преимущество перед биполярным импульсным кодом. В последнем для передачи данных используются три уровня сигнала, а в манчестерском — два.

На рис. 2, д показан **потенциальный код 2B1Q** с четырьмя уровнями сигнала для кодирования данных, название которого отражает его суть — каждые два бита (2B) передаются за один такт сигналом, имеющим четыре состояния (1Q):

- пара бит 00 соответствует потенциал $-2,5$ В,
- пара бит 01 соответствует потенциал $-0,833$ В,
- пара бит 11 соответствует потенциал $+0,833$ В,
- пара бит 10 соответствует потенциал $+2,5$ В.

При этом способе кодирования требуются дополнительные меры по борьбе с длинными последовательностями одинаковых пар бит, так как при этом сигнал превращается в постоянную составляющую. Для его реализации мощность передатчика должна быть выше, чтобы четыре уровня четко различались приемником на фоне помех.

3. Методы логического кодирования

Логическое кодирование используется для улучшения потенциальных кодов типа *AMI*, *NRZI* и *2B1Q*. Логическое кодирование должно заменять длинные последовательности нулевых бит, приводящие к постоянному потенциалу, вкраплениями единиц. Для логического кодирования используют два метода — *избыточные коды* и *скремблирование*.

Избыточные коды основаны на разбиении исходной последовательности бит на порции, которые называют *символами*. Затем исходный символ заменяется на новый, который имеет большее количество бит, чем исходный, то есть в исходный код добавляются избыточные биты, содержащих логические единицы. Тогда длинные последовательности нулей прерываются, и код становится самосинхронизирующимся для любых передаваемых данных. Но этот метод снижает полезную пропускную способность линии, так как избыточные единицы пользовательской информации не несут.

Например, логический код 4В/5В заменяет исходные символы длиной в 4 бита на символы длиной в 5 бит. Соответствие исходных и результирующих кодов 4В/5В представлено в табл. 1.

Таблица 1

Соответствие исходных и результирующих кодов 4В/5В

Исходный код	Результирующий код	Исходный код	Результирующий код
0000	11110	1000	10010
0001	01001	1001	10011
0010	10100	1010	10110
0011	10101	1011	10111
0100	01010	1100	11010
0101	01011	1101	11011
0110	01110	1110	11100
0111	01111	1111	11101

Код 4В/5В затем передается по линии с помощью физического кодирования по одному из методов потенциального кодирования, чувствительному только к длинным последовательностям нулей. Символы кода 4В/5В длиной 5 бит гарантируют, что при любом их сочетании на линии не могут встретиться более трех нулей подряд.

Использование таблицы перекодировки является очень простой операцией, поэтому этот подход не усложняет сетевые адаптеры и интерфейсные блоки коммутаторов и маршрутизаторов.

Скремблирование основано на предварительном «перемешивании» исходной информации таким образом, чтобы вероятность появления единиц и нулей на линии становилась близкой. Устройства, или блоки, выполняющие такую операцию, называются *скремблерами* (*scramble* — свалка, беспорядочная сборка). При скремблировании используется известный алгоритм, поэтому приемник, получив двоичные данные, передает их на *дескремблер*, который

восстанавливает исходную последовательность бит. Избыточные биты при этом по линии не передаются.

Методы скремблирования заключаются в побитном вычислении результирующего кода на основании бит исходного кода и полученных в предыдущих тактах бит результирующего кода. Например, скремблер может реализовывать следующее соотношение:

$$B_i = A_i \oplus B_{i-3} \oplus B_{i-5},$$

где B_i — двоичная цифра результирующего кода, полученная на i -м такте работы скремблера; A_i — двоичная цифра исходного кода, поступающая на i -м такте на вход скремблера; B_{i-3} , B_{i-5} — двоичные цифры результирующего кода, полученные на предыдущих тактах работы скремблера, соответственно на 3 и на 5 тактов ранее текущего такта; \oplus — операция исключающего ИЛИ (сложение по модулю два) ($1 \oplus 1 = 0$, $0 \oplus 0 = 0$, $1 \oplus 0 = 1$, $0 \oplus 1 = 1$).

Например, для исходной последовательности 110110000001 скремблер даст следующий результирующий код:

$B_1 = A_1 = 1$ (первые три цифры результирующего кода будут совпадать с исходным, так как еще нет нужных предыдущих цифр)

$B_2 = A_2 = 1$

$B_3 = A_3 = 0$

$B_4 = A_4 \oplus B_1 = 1 \oplus 1 = 0$

$B_5 = A_5 \oplus B_2 = 1 \oplus 1 = 0$

$B_6 = A_6 \oplus B_3 \oplus B_1 = 0 \oplus 0 \oplus 1 = 1$

$B_7 = A_7 \oplus B_4 \oplus B_2 = 0 \oplus 0 \oplus 1 = 1$

$B_8 = A_8 \oplus B_5 \oplus B_3 = 0 \oplus 0 \oplus 0 = 0$

$B_9 = A_9 \oplus B_6 \oplus B_4 = 0 \oplus 1 \oplus 0 = 1$

$B_{10} = A_{10} \oplus B_7 \oplus B_5 = 0 \oplus 1 \oplus 0 = 1$

$B_{11} = A_{11} \oplus B_8 \oplus B_6 = 0 \oplus 0 \oplus 1 = 1$

$B_{12} = A_{12} \oplus B_9 \oplus B_7 = 1 \oplus 1 \oplus 1 = 1$

Таким образом, на выходе скремблера появится последовательность 110001101111, в которой нет последовательности из шести нулей, присутствовавшей в исходном коде.

После получения результирующей последовательности приемник передает ее дескремблеру, который восстанавливает исходную последовательность на основании обратного соотношения:

$$C_i = B_i \oplus B_{i-3} \oplus B_{i-5} = (A_i \oplus B_{i-3} \oplus B_{i-5}) \oplus B_{i-3} \oplus B_{i-5} = A_i.$$

Различные алгоритмы скремблирования отличаются количеством слагаемых, дающих цифру результирующего кода, и сдвигом между слагаемыми.

Лекция № 10 Помехоустойчивое и эффективное кодирование

- 1) Принципы помехоустойчивого кодирования
- 2) Модели ошибок
- 3) Обнаружение ошибок
- 4) Исправление ошибок
- 5) Информационный предел избыточности
- 6) Эффективное кодирование

1. Принципы помехоустойчивого кодирования

Под кодированием информации будем понимать преобразование формы представления информации с целью обеспечения удобства ее передачи по каналам связи или хранения. Правило, по которому осуществляется кодирование, называется кодирующим отображением или кодом. Пусть $A = \{p, q, r, s\}$ является входным алфавитом кода Γ , а $B = \{a, b\}$ — его выходным алфавитом. Код Γ в процессе кодирования перерабатывает слово над алфавитом A в слово над алфавитом B . Если код Γ описывается табл. 1, то слово pqr в алфавите A преобразуется в алфавите B в слово $aabaab$. Слова, сопоставляемые элементам множества A по правилу Γ в алфавите B , называются кодовыми комбинациями. Если $x \in A$ и $\Gamma x = a_1 a_2 \dots a_n$, где $a_i \in B$ для всех i , то говорят что символу x соответствует кодовая комбинация $a_1 a_2 \dots a_n$ (иногда эту кодовую комбинацию называют кодом символа).

Таблица 1

Пример задания кода

p	aa
q	ab
r	ba
s	bb

Коды, формирующие кодовые комбинации различной длины, называются неравномерными, а коды, которым соответствуют кодовые комбинации равной длины — равномерными.

Значность кода — длина кодовых комбинаций равномерного кода.

Декодирование — это процесс обратный кодированию, т. е. замена кодовой комбинации символом из входного алфавита. Если процесс кодирования осуществляется по правилу Γ , то процесс декодирования основан на правиле Γ^{-1} — отображении, обратном Γ . Пусть α — слово в алфавите A , $\beta = \Gamma\alpha$ — слово в алфавите B . Код называется обратимым, если для любого слова $\beta = \Gamma\alpha$ в алфавите B существует единственное преобразование $\Gamma^{-1}\beta = \alpha$, т. е. по слову β в алфавите B , являющимся последовательностью кодовых комбинаций, ко-

дирующих слово α , всегда однозначно восстанавливается слово α . Для того, чтобы код был обратимым, необходимо выполнение двух условий обратимости кода:

- разным символам входного алфавита A должны быть сопоставлены различные кодовые комбинации;
- никакая кодовая комбинация не должна составлять начальной части какой-либо другой кодовой комбинации.

Выполнение второго условия необходимо только для неравномерных кодов, для равномерных кодов оно выполняется автоматически при выполнении первого условия.

В системах передачи дискретных сообщений (данных) используют два алфавита: один имеет достаточно большой объем, применяется для представления сообщения на языке источника и получателя информации и называется внешним алфавитом; второй используют непосредственно для передачи информации по каналу, он содержит небольшое число символов и называется внутренним алфавитом. Чем меньше символов содержит внутренний алфавит, тем легче их различать в условиях помех. Проблемы помехоустойчивого кодирования решаются специальными методами.

Рассмотрим представление кодовых комбинаций применительно к равномерным кодам, в частности к блочным, в которых кодовые комбинации кодируются и декодируются независимо друг от друга. Пусть выходной алфавит B равномерного n -значного кода Γ состоит из m символов; число t называется основанием кода. Кодовая комбинация такого кода имеет вид $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, где α_i — значение i -го разряда кода, $i = 1, 2, \dots, n$; $\alpha_i \in B$.

Упорядочим (произвольно, но раз и навсегда) символы алфавита $B = (C_0, C_1, \dots, C_{m-1})$ и будем под ними понимать различные классы вычетов по модулю t . Индекс класса при этом поставим в соответствие значению остатка при делении любого представителя класса на число m .

Введем на множестве B две алгебраические операции: умножение и сложение, понимая под произведением классов $C_k C_j$ класс C_r (где r — остаток от деления произведения kj на m) и под суммой классов $C_k + C_j$ класс C_{k+j} при $k + j < m$ и класс C_{k+j-m} при $k + j \geq m$.

Кодовые комбинации над выходным алфавитом B n -значного равномерного кода можно рассматривать как векторы в n -мерном векторном линейном пространстве над полем B . Это пространство в дальнейшем будем называть кодовым пространством, а его элементы — кодовыми векторами. Для упрощения оперирования с классами вычетов по модулю m в дальнейшем будем обозначать их наименьшими представителями $0, 1, 2, \dots, m-1$.

При анализе воздействия ошибок на кодовые векторы в кодовом пространстве вводится метрика. Наибольший практический интерес представляет метрика

Хэмминга. Вес вектора v по Хэммингу равен числу ненулевых разрядов этого вектора, а расстояние Хэмминга между векторами v_j и v_k определяется как вес разности векторов v_j и v_k . Для бинарных кодов ($m=2$) имеем:

$$d(v_j, v_k) = \sum_{i=1}^n (a_i \oplus b_i)$$

Кодовое пространство n -разрядного кода с основанием m составляет m^n векторов. При передаче информации, как правило, используются не все возможные комбинации, а лишь некоторое их подмножество $V_1 = \{v_1, \dots, v_N\}$, где $N < m^n$. Обозначим расстояние между парой векторов набора V_1 символом $d(v_i, v_j)$, $i, j = 1, 2, \dots, N$, $i \neq j$. Величина $\min d(v_i, v_j)$, представляющая собой минимальное расстояние между парой векторов набора V_1 , называется кодовым расстоянием и обозначается символом d .

В системах передачи информации в основном используют бинарные коды, т. е. коды с основанием $m=2$: $B = \{0, 1\}$. Учитывая это, главное внимание в дальнейшем будем уделять бинарным кодам.

2. Модели ошибок

В моделях систем передачи информации используется дискретный канал связи (рис. 1). Передаваемый кодовый вектор v_1 складывается в дискретном канале поразрядно по модулю 2 с вектором ошибки e , и в общем на выходе образуется уже другой, искаженный кодовый вектор v_1' . Например, если $v_1 = 11111$ и $e = 01000$, то $v_1' = v_1 \oplus e = 11111 + 01000 = 10111$, т. е. во втором разряде результирующей кодовой комбинации v_1' , как видно, произошла ошибка. Таким образом, в разрядах передаваемой кодовой комбинации, соответствующих единичным разрядам вектора e , возникают ошибки.

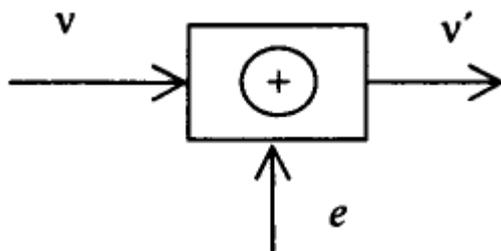


Рис. 1. Схема дискретного канала

При теоретических исследованиях процесса возникновения ошибок в дискретном канале используют математические модели ошибок. Под математической моделью ошибки понимается распределение вероятностей по всем возможным векторам ошибки. В соответствии с принятыми моделями ошибок различают и

дискретные каналы (ДК). Дискретный канал называется стационарным или однородным дискретным каналом без памяти, если условные вероятности того, что на j -ой позиции кодовой комбинации принят символ y_j , при условии, что на i -ой позиции на вход канала подан символ x_i , для всех позиций j одинаковы и не зависят от времени и от значений x_i и y_j на других позициях кодовой комбинации: $p(y_j | x_i) = p(y_r | x_k)$.

В качестве примера рассмотрим одну из наиболее часто встречающихся моделей ошибки, которая основана на следующей статистической гипотезе: в каждом разряде вектора ошибки единица появляется с вероятностью p независимо от того, какие значения получили остальные разряды вектора ошибки. Такой стационарный ДК, в котором вероятности искажения любого символа кодовой комбинации одинаковы, называется симметричным каналом без памяти.

Назовем величину, равную числу единиц в векторе ошибки, кратностью ошибки и обозначим символом q . В теории вероятностей доказывается, что выдвинутой статистической гипотезе отвечает биномиальный закон распределения кратности ошибки. Таким образом, для рассматриваемого примера математической моделью ошибки может служить выражение:

$$P_{n,q} = C_n^q p^q (1-p)^{n-q},$$

где $P_{n,q}$ — вероятность того, что при передаче по дискретному каналу в кодовой комбинации бинарного кода длины n появится ошибка кратности q .

Значительно больший практический интерес представляют симметричные каналы с памятью, в которых условные вероятности $p(y_j | x_i)$ для каждой пары ij зависят как от времени, так и от переходов, имевших место ранее.

Подавляющее число реальных каналов связи имеет склонность к многоступенчатому группированию ошибок, в чем и выражается запоминание некоторого состояния канала. При описании группирования ошибок с помощью простой цепи Маркова канал представляется набором состояний s_i , которые переходят друг в друга с вероятностью P_{ij} и в каждом из которых ошибки независимы и происходят с вероятностью P_i . Простейшей моделью такого типа ошибки является модель Гильберта (рис. 2).

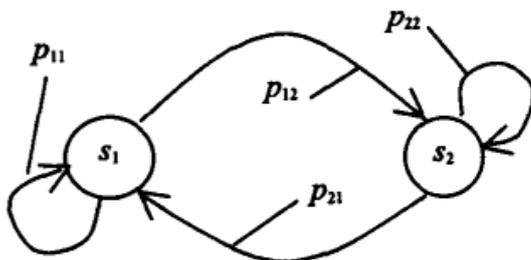


Рис. 2. Модель Гильберта

В состоянии s_1 ошибки отсутствуют $P_1 = 0$, а в состоянии s_2 ошибки появляются с вероятностью $P_2 \neq 0$. Если известны вероятности перехода $P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}$, то статистика ошибок образует простую Марковскую цепь последовательности состояний с матрицей переходов:

$$P(s) = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{vmatrix}.$$

Чтобы выполнялось условие группирования ошибок в канале, переходные вероятности состояний должны быть значительно меньше вероятностей сохранения состояний, т. е. $P_{12} \ll P_{11}, P_{21} \ll P_{22}$. Тогда вероятности пребывания канала в состояниях s_1 и s_2 соответственно будут равны:

$$p_1 \cong \frac{P_{21}}{P_{12} + P_{21}}, \quad p_2 \cong \frac{P_{12}}{P_{12} + P_{21}},$$

а вероятность ошибки символа

$$p = P_2 p_2 = P_2 \frac{P_{12}}{P_{12} + P_{21}}.$$

Математические модели ошибок должны отражать реальные процессы, происходящие в канале связи, и строиться на статистике помех. Чем точнее математическая модель описывает действительность, тем точнее можно получить оценки относительно спроектированного кода.

Необходимо учитывать, что эффективность того или иного помехоустойчивого кода всегда зависит от вида помех, действующих в канале связи. Код может быть весьма эффективным (в том смысле, что число необнаруженных ошибок при его применении будет очень мало) при одной статистике помех и очень плохим — при другой. Поэтому при проектировании помехоустойчивых кодов необходимо ориентироваться на определенный вид помех и в соответствии с этим в качестве исходной иметь определенную модель ошибок.

3. Обнаружение ошибок

Наибольшее распространение при передаче дискретных сообщений получили блочные равномерные коды. Рассмотрим на примере этих кодов как обнаруживаются ошибки. Помехоустойчивость блочных кодов, как и других кодов, достигается введением избыточности в кодовые комбинации. Коды, не обладающие избыточностью, не способны обнаруживать и тем более исправлять ошибки.

В безыбыточных равномерных кодах длины k все 2^k возможных кодовых комбинаций используются, т. е. любой из 2^k кодовой комбинации сопоставляется какой-либо символ внешнего алфавита. Такие коды получили название первичных кодов. Ошибка любой кратности в какой-либо кодовой комбинации всегда приводит к ошибочному декодированию этой кодовой комбинации. Нетрудно видеть, что кодовое расстояние для первичного кода равно единице, т. е. неко-

торые пары кодовых комбинаций первичного кода располагаются на минимальном расстоянии, отличном от нуля. Для обеспечения помехоустойчивости кода вводят дополнительные разряды. Если, например, для кодирования всех символов внешнего алфавита достаточно иметь k -разрядный первичный код, то для обеспечения помехоустойчивости к разрядам первичного кода добавляется r избыточных разрядов. При этом длина результирующей кодовой комбинации становится равной $n = k + r$.

Различают избыточные блочные коды разделимые и неразделимые. В разделимых кодах роль разрядов кодовых комбинаций разграничена: часть разрядов, часто совпадающая с разрядами исходного первичного кода, являются информационными, остальные разряды играют роль проверочных разрядов. В неразделимых кодах все разряды равноправные, и в кодовой комбинации нельзя отделить информационные разряды от проверочных.

В качестве примера неразделимого кода может служить код с постоянным весом «3 из 7». Особенностью этого кода является то, что в любой его кодовой комбинации длины 7 имеется ровно три единицы. Таким образом, всего кодовых комбинаций кода «3 из 7» будет:

$$C_7^3 = \frac{7!}{(3!4!)} = 35$$

Обнаруживающая способность данного кода основывается на том, что любая одиночная ошибка изменяет число единиц в кодовой комбинации.

Таким образом, обнаружение ошибок помехоустойчивым кодом возможно благодаря тому, что для передачи информации используются не все 2^n n -разрядные кодовые комбинации равномерного кода, а лишь часть из них. Для разделимых кодов эта часть составляет 2^k кодовых комбинаций, получивших название разрешенных кодовых комбинаций. Оставшаяся часть $2^n - 2^k$ кодовых комбинаций, составляющая запрещенные кодовые комбинации, при передаче информации не применяется. Использование при кодировании символов внешнего алфавита лишь части кодовых комбинаций позволяет разнести разрешенные кодовые комбинации в кодовом пространстве на расстояние, превышающее единицу: Нетрудно видеть, что если расстояние $d > 1$, то все одиночные ошибки будут переводить разрешенные кодовые комбинации в запрещенные, а появление запрещенной кодовой комбинации на приемной стороне может служить индикатором того, что произошла ошибка.

При разработке реальных кодов учитывают статистику ошибок и требование верности передачи информации. Верность передачи оценивается часто как среднее число верно принятых кодовых комбинаций, приходящихся на одну ошибочно принятую кодовую комбинацию, или как вероятность верного приема кодовой комбинации. Так, при выполнении статистической гипотезы о том, что ошибки меньшей кратности появляются чаще ошибок большей кратности, исходя из требования верности передачи, определяют максимальную кратность ошибки, начиная с которой все ошибки меньшей кратности должен обнаруживать

помехоустойчивый код. По максимальной кратности ошибки q_m выбирают такое минимальное кодовое расстояние, при котором все разрешенные кодовые комбинации при действии на них ошибок кратностью, не превышающей q_m , переходят в подмножество запрещенных кодовых комбинаций и, следовательно, могут быть обнаружены на приемной стороне системы передачи данных.

Результатом действия ошибки кратности q на разрешенную кодовую комбинацию является новая кодовая комбинация, удаленная от первоначальной на расстояние q . Отсюда следует, что если кодовое расстояние $d \leq q$, то при действии ошибки кратности q на какую-либо разрешенную кодовую комбинацию последняя может перейти в другую, но тоже разрешенную кодовую комбинацию и такая ошибка уже не может быть обнаружена. Поэтому для обнаружения всех ошибок, кратность которых не превышает q , кодовое расстояние должно быть больше q : $d > q$. Для обнаружения всех ошибок кратности, не превышающей q_m , кодовое расстояние должно, по крайней мере, на единицу превышать максимальную кратность ошибки: $d = q_m + 1$.

Примером блочного делимого кода служит код с проверкой на четность. Кодовая комбинация такого кода имеет вид $a_1 a_2 \dots a_k b$. Первые k разрядов являются информационными и, как правило, совпадают с разрядами исходного первичного кода. Последний разряд является избыточным и определяется по формуле $b = a_1 \oplus a_2 \oplus \dots \oplus a_k$. Из формулы видно, что значение избыточного разряда зависит от того, четное или нечетное число единиц в кодовой комбинации: если число единиц четное, то $b = 0$, в противном случае $b = 1$.

Если выбрать любую кодовую комбинацию первичного кода $a_1 a_2 \dots a_k$ и любую другую ближайшую к ней кодовую комбинацию $a'_1 a'_2 \dots a'_k$, то, как легко установить, отличие между ними будет лишь в одном разряде, а отсюда следует, что кодовые комбинации будут различной четности. При дополнении этих комбинаций проверочными разрядами последние не будут совпадать, т. е. $b \neq b'$.

Следовательно, кодовые комбинации $a_1 a_2 \dots a_k b$ и $a'_1 a'_2 \dots a'_k b'$ после дополнения разрядами b и b' будут отличаться уже в двух разрядах. Так как данный вывод справедлив для любых двух ближайших кодовых комбинаций исходного первичного кода, то после введения дополнительных разрядов вновь образованный код с проверкой на четность будет иметь кодовое расстояние $d = 2$ и обладать способностью обнаруживать все одиночные ошибки.

4. Исправление ошибок

Помехоустойчивые коды, позволяющие не только обнаруживать ошибки, но и исправлять их, называются *корректирующими кодами*. Общая идея исправления ошибок кратности не более q_m заключается в следующем. Число возможных

кодовых комбинаций M помехоустойчивого кода разбивается на N классов по числу N разрешенных кодовых комбинаций. Разбиение осуществляется таким образом, чтобы в каждый класс входили одна разрешенная кодовая комбинация и ближайшие к ней запрещенные. При декодировании определяется, какому классу принадлежит принятая кодовая комбинация. Если кодовая комбинация принята с ошибкой, т. е. является запрещенной, то она исправляется на разрешенную кодовую комбинацию, принадлежащую тому же классу.

В теории кодирования доказывается, что для обеспечения возможности исправления ошибок кратности не более q_m кодовое расстояние должно быть больше $2q_m$. Обычно оно выбирается по формуле $d = 2q_m + 1$.

Актуальной является задача определения наибольшего числа N разрешенных кодовых комбинаций n -разрядного двоичного кода с кодовым расстоянием d . В теории кодирования существуют следующие отношения:

$d = 1$	$N = 2^n$
$d = 2$	$N = 2^{n-1}$
$d = 3$	$N \leq 2^n (1 + n)^{-1}$
$d = 2q + 1$	$N \leq 2^n \left(1 + \sum_{i=1}^q C_n^i \right)^{-1}$

5. Информационный предел избыточности

Процесс передачи данных в реальных системах и сетях реализуется в условиях действия помех, поэтому возникает необходимость построения моделей функционирования системы передачи данных, позволяющих оценить ее вероятностно-временные характеристики. Их удобно находить, исходя из модели передачи данных по дискретному каналу связи, вводя в модель *источник ошибок* (ИО) (рис. 3).

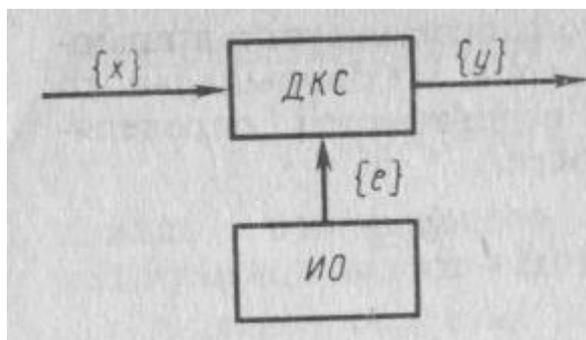


Рис. 3. Включение в модель дискретного канала связи источника ошибок

Если на вход ДКС поступает некоторая последовательность $\{x\}$, а источник ошибок генерирует последовательность $\{e\}$, то на выходе канала для двоичного кода формируется последовательность $\{y = x \oplus e\}$. Местоположение единиц в e указывает ошибки выходной последовательности y .

При передаче формируются последовательности символов длиной n , отображающие одно или несколько сообщений. Последствия возникновения ошибок на передаваемый код зависят от числа ошибок, попавших на длину кода n . Обозначим вероятность попадания j ошибок на код длины n через $P(j, n)$. Эта вероятность может быть найдена при экспериментальном исследовании, путем моделирования или на основе аналитических расчетов. Модель дискретного симметричного канала связи позволяет оценить эту вероятность аналитическим путем для простых описаний потоков ошибок.

В дискретном двоичном симметричном канале связи вероятность искажения любого из передаваемых символов одинакова. Это позволяет применить для описания потока ошибок биномиальный закон распределения:

$$P(j, n) = C_n^j P^j (1 - P)^{n-j},$$

где P — вероятность искажения символа;

$$C_n^j = \frac{n(n-1) \cdot \dots \cdot (n-j+1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot j} = \frac{n!}{j!(n-j)!} \text{ — число сочетаний из } n \text{ элементов по } j.$$

Отметим, что случай непопадания ошибок на длину кода n возникает с вероятностью:

$$P(0, n) = C_n^0 P^0 (1 - P)^{n-0} = 1 \cdot 1 \cdot (1 - P)^n = (1 - P)^n, \quad (0! = 1).$$

Из биномиального закона можно получить совокупность вероятностей, определяющих возникновение в коде i ошибок и более:

$$P(\geq i, n) = \sum_{j=i}^n P(j, n) = \sum_{j=i}^n C_n^j P^j (1 - P)^{n-j}.$$

Среднее число ошибок в коде длины n составляет $n \cdot P$.

Если один бит — 10% ошибки, 10 бит — 100% ошибки.

В реальных абонентских каналах связи это число очень мало. При $P \leq 0,1$ находим закон распределения Пуассона для описания потока ошибок:

$$P(j, n) = \frac{(nP)^j}{j!} e^{-nP}.$$

Этот закон определяется одним параметром $n \cdot P$, что облегчает аналитический расчет вероятностей.

Вероятность перехода сообщения x_{0j} в сообщение y_{0i} назовем вероятностью трансформации сообщения, т. е. $P(y_{0i}/x_{0j}) = P_{\text{тр}}$, при $i \neq j$.

Если принятое сообщение соответствует переданному, то событие можно оценить вероятностью прохождения: $P(y_{0i}/x_{0j}) = P_{\text{пр}}$, при $i = j$.

В реальном канале связи может возникать ситуация, когда принятое сообщение не может быть отождествлено ни с одним из передаваемых. Этот исход получил название «защитного отказа». Он возникает при обнаружении ошибок. Обозначим вероятность защитного отказа $P_{\text{зо}}$, тогда $P_{\text{пр}} = 1 - P_{\text{о}}$, где $P_{\text{о}} = P_{\text{зо}} + P_{\text{тр}}$ — вероятность ошибки.

Пусть через дискретный канал связи передается код, исправляющий s и обнаруживающий r ошибок. Если число ошибок, возникших в коде длины n , не превышает его корректирующей способности, то происходит правильная передача сообщения. Отсюда вероятность прохождения:

$$P_{\text{пр}} = \sum_{j=0}^s P(j, n)$$

Используя закон распределения Пуассона, получим вероятность прохождения сообщения:

$$P_{\text{пр}} = \sum_{j=0}^s \frac{(nP)^j}{j!} e^{-nP}$$

$$P_{\text{о}} = \sum_{j=s+1}^n P(j, n) = \sum_{j=s+1}^n \frac{(nP)^j}{j!} e^{-nP}$$

вероятность появления ошибки:

Видно, что с увеличением числа исправляемых ошибок s вероятность прохождения увеличивается, а вероятность ошибки уменьшается. Для кода, не исправляющего ошибки, вероятность прохождения:

$$P_{\text{пр}} = P(0, n) = \frac{(nP)^0}{0!} e^{-nP} = e^{-nP}$$

Соответственно вероятность ошибки:

$$P_{\text{о}} = 1 - e^{-nP}$$

При $n \cdot P \ll 1$, используя разложение в ряд Тейлора, получим $P_{\text{о}} \approx n \cdot P$, т. е. вероятность ошибки равна среднему числу ошибок, возникающих на длине кода n . Отсюда следует, что при отсутствии избыточности получить малую вероятность ошибки можно лишь при очень малых значениях $n \cdot P$. С увеличением вероятности искажения символов необходимо ввести избыточность в передаваемый код. При введении избыточности улучшаются обнаруживающие свойства кода.

Избыточность в коде проявляется в виде контрольной информации I_k , компенсирующей потери информации в дискретном канале связи $H(Y/X)$. Минимально необходимая избыточность, компенсирующая ошибки в заданном типе канала связи, получила название информационного предела избыточности.

Информационный предел избыточности количественно выражается числом контрольных символов, введенных в код для передачи контрольной информации. При равновероятности передаваемых символов и энтропии источника $H_{\max}(X) = \log_2 K$, получим нижнюю границу избыточности:

$$k_{\min} = \frac{I_k}{\log_2 K},$$

где k_{\min} — минимальное число контрольных символов.

Используя формулу энтропии и принимая допущение, что возникновение любой корректируемой ошибки и отсутствие ошибок происходит с равной вероятностью, получим:

$$I_k = \log_2 \left(\sum_{j=0}^s C_n^j \right).$$

Информационный предел избыточности составит:

$$k_{\min} = \frac{I_k}{\log_2 2} = I_k = \log_2 \left(\sum_{j=0}^s C_n^j \right).$$

Общее число элементов в коде $n = m + k$, m — число информационных элементов, k — количество контрольных элементов в коде:

$$k \geq k_{\min} = \log_2 \left(\sum_{j=0}^s C_n^j \right).$$

Рассмотренный информационный предел получил название предела Хемминга. Модель дискретного канала связи в определенной степени задает и модель потока ошибок. Зная модель потока ошибок и свойства дискретного канала связи, можно найти информационный предел избыточности и в соответствии с ним построить код, исправляющий ошибки.

6. Эффективное кодирование

Избыточность является одной из основных характеристик кода, это — полезное свойство, так как оно повышает помехоустойчивость кода. Однако для избыточных кодов для передачи по каналам связи требуется больше времени, кроме того, они занимают больший объем памяти при хранении информации. Большая избыточность не всегда оправдана требованиями помехоустойчивости при передаче и хранении информации. Поэтому возникает задача устранения избыточности, получившая название эффективного кодирования.

Определим $X = \{x_1, x_2, \dots, x_r\}$ — входной алфавит кода Γ ; множество $B = \{0, 1, \dots, m-1\}$ — выходной алфавит того же кода, где m — число элементов множества B . Код Γ сопоставляет каждому символу из входного алфавита $x_i \in X$

кодovou комбинацию, составленную из n_i символов алфавита $B - \Gamma x_r = b_1 b_2 \dots b_{n_i}$.

Требуется оценить минимальную среднюю длину кодовой комбинации.

Обозначим через $p(x_i)$ вероятность появления сообщения x_i , тогда энтропия сообщений $X = \{x_1, x_2, \dots, x_r\}$:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^r p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad , (1)$$

а средняя длина кодовой комбинации:

$$n_{\text{cp}} = \sum_{i=1}^r n_i p(x_i) \quad . (2)$$

Максимальная энтропия, которую может иметь сообщение из символов алфавита B равно:

$$H_{\text{max}} = n_{\text{cp}} \log_2 m \quad . (3)$$

Для обеспечения передачи информации, содержащейся в сообщениях X , с помощью кодовых комбинаций в алфавите B должно выполняться неравенство:

$$H_{\text{max}} \geq H(X) \quad . (4)$$

В случае строгого неравенства $H_{\text{max}} > H(X)$ имеет место избыточность, которую определяют через коэффициент избыточности $K_{\text{и}}$:

$$K_{\text{и}} = \frac{H_{\text{max}} - H(X)}{H_{\text{max}}} \quad . (5)$$

Оценим минимальную среднюю длину кодовой комбинации, при которой еще возможна передача сообщения X без потери информации. Учитывая (3) и (4), получим:

$$n_{\text{cp}} \geq \frac{H_{\text{max}}}{\log_2 m} \quad , (6)$$

т. е.:

$$n_{\text{min}} = \frac{H_{\text{max}}}{\log_2 m} \quad . (7)$$

Выражение (5) для коэффициента избыточности с учетом (7) можно представить в следующем виде:

$$K_{\text{и}} = \frac{n_{\text{cp}} - n_{\text{min}}}{n_{\text{cp}}} \quad . (8)$$

Под эффективным кодом понимают код, коэффициент избыточности которого равен нулю, т. е. для эффективных кодов $n_{\text{cp}} = n_{\text{min}}$ или с учетом (1), (2) и (3):

$$\sum_{i=1}^r n_i p(x_i) \log_2 m = - \sum_{i=1}^r p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad . (9)$$

Объединив суммы левой и правой части, получим:

$$\sum_{i=1}^r p(x_i) (n_i \log_2 m + \log_2 p(x_i)) = 0 \quad . (10)$$

Если $p(x_i) \neq 0$, то необходимо, чтобы:

$$n_i = - \frac{\log_2 p(x_i)}{\log_2 m} \quad \text{для всех } i = 1, 2, \dots, r. \quad (11)$$

Однако отношение (9) не всегда является целым числом и, следовательно, не для любого набора сообщений $X = \{x_1, x_2, \dots, x_r\}$ с заданным распределением вероятности $p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_r)$ можно построить эффективный код с минимальной избыточностью $K_{\text{и}} = 0$. Всегда можно обеспечить выполнение неравенства:

$$- \frac{\log_2 p(x_i)}{\log_2 m} \leq n_{\text{cp}} \leq \frac{\log_2 p(x_i)}{\log_2 m} + 1 \quad , (12)$$

или умножая части неравенства на $p(x_i)$ и суммируя по i , получим критерий оценки эффективности кода:

$$\frac{H(X)}{\log_2 m} \leq n_{\text{cp}} \leq \frac{H(X)}{\log_2 m} + 1 \quad . (13)$$

Выражение для коэффициента избыточности равномерного двоичного кода определим по формуле (5), в которой под максимальной энтропией H_{max} будем понимать максимальную энтропию равномерного n -разрядного кода, $n_{\text{cp}} = n, m = 2$. При этом максимальная энтропия $H_{\text{max}} = n_{\text{cp}} \log_2 m = n$. Под энтропией сообщений $H(X)$ будем понимать энтропию разрешенных кодовых комбинаций, число которых обозначим через N , тогда $H(X) = \log_2 N$.

Подставляя выражения для H_{max} и $H(X)$ в (5), имеем:

$$K_{\text{и}} = \frac{n - \log_2 N}{n} = 1 - \frac{\log_2 N}{n} \quad . (14)$$

Для делимых кодов формула упрощается:

$$K_{\text{и}} = 1 - \frac{\log_2 2^k}{n} = 1 - \frac{k}{n} \quad . (15)$$

Анализ формулы (5) показывает, что коэффициент избыточности принимает значения от 0 (отсутствие избыточности) до 1 (избыточность неограниченно велика). Коэффициент избыточности характеризует качество помехоустойчивого

кода — чем меньше избыточность кода при прочих равных условиях, тем код лучше.

Лекция № 11 Виды связи и режимы передачи данных

- 1) Виды связи и режимы передачи данных
- 2) Передача с установлением логического соединения и без установления логического соединения

1. Виды связи и режимы передачи данных

Канальный уровень обеспечивает передачу пакетов данных, поступающих от протоколов верхних уровней, узлу назначения, адрес которого также указывает протокол верхнего уровня. Протоколы канального уровня оформляют переданные им пакеты в кадры собственного формата, помещая указанный адрес назначения в одно из полей такого кадра, а также сопровождая кадр контрольной суммой.

Протокол канального уровня предназначен для доставки кадров данных, как правило, в пределах сетей с простой топологией связей и однотипной или близкой технологией. Другой областью действия протоколов канального уровня являются связи типа «точка-точка» глобальных сетей, когда протокол канального уровня ответственен за доставку кадра непосредственному соседу. Адрес в этом случае не имеет принципиального значения, а на первый план выходит способность протокола восстанавливать искаженные и утерянные кадры, так как плохое качество территориальных каналов, особенно коммутируемых телефонных, часто требует выполнения подобных действий.

Основными характеристиками метода передачи на канальном уровне являются следующие:

- асинхронный или синхронный (байт-ориентированный или бит-ориентированный);
- с предварительным установлением соединения или дейтаграммный;
- с обнаружением искаженных данных или без обнаружения;
- с обнаружением потерянных данных или без обнаружения;
- с восстановлением искаженных и потерянных данных или без восстановления;
- с поддержкой динамической компрессии данных или без поддержки.

Многие из них характерны не только для протоколов канального уровня, но и для протоколов более высоких уровней.

При передаче данных между двумя взаимодействующими объектами возможны три вида связи:

- симплексный используется, когда передача данных должна осуществляться только в одном направлении, например в системах контроля, в которых информация с датчиков передается в управляющий компьютер через регулярные промежутки времени;
- полудуплексный применяется, когда два взаимодействующих объекта хотя бы иногда обмениваются информацией поочередно, т. е. канал используется поочередно для передачи данных в обоих направлениях. Ясно, в таком режиме каждый объект должен иметь возможность переключаться от состояния передачи к состоянию приема;

— дуплексный используется для обмена данными между двумя взаимодействующими объектами (устройствами) в обоих направлениях одновременно, например, когда пропускная способность канала позволяет потоку данных осуществляться в обоих направлениях независимо.

Чтобы приемник мог правильно декодировать и интерпретировать получаемый набор битов, он должен знать:

— скорость передачи битов, определяемую интервалом времени, выделяемым на один битовый разряд;

— начало и конец каждого элемента (символа или байта);

— начало и конец каждого полного блока сообщения или кадра.

Эти три фактора называют соответственно побитной или тактовой синхронизацией, побайтной или посимвольной синхронизацией и поблочной или покадровой синхронизацией.

Канальный уровень оперирует кадрами данных и обеспечивает синхронизацию между приемником и передатчиком на уровне кадров. В обязанности приемника входит распознавание начала первого байта кадра, границ полей кадра и признака окончания кадра. Обычно достаточно обеспечить синхронизацию на указанных двух уровнях — битовом и кадровом, — чтобы передатчик и приемник обеспечили устойчивый обмен информацией. Однако при плохом качестве линии связи (как правило, это относится к телефонным коммутируемым каналам) для повышения надежности передачи данных вводят дополнительные средства синхронизации на уровне байт. Такой режим работы называется асинхронным или старт-стопным.

В асинхронном режиме каждый байт данных сопровождается специальными сигналами «старт»-стартовый бит и «стоп»-стоповый(ые) бит(ы) (рис. 1). Назначение этих сигналов состоит в том, чтобы, во-первых, известить приемник о приходе данных и, во-вторых, чтобы дать приемнику достаточно времени для выполнения некоторых функций, связанных с синхронизацией, до поступления следующего байта. Сигнал «старт» имеет продолжительность в один тактовый интервал, а сигнал «стоп» может длиться один, полтора или два такта, поэтому говорят, что используется один, полтора или два бита в качестве стопового сигнала, хотя эти сигналы не несут информации.

Асинхронным данный режим называют потому, что каждый байт может быть несколько смещен во времени относительно побитовых тактов предыдущего байта. Такая асинхронность передачи байт не влияет на корректность принимаемых данных, так как в начале каждого байта происходит дополнительная синхронизация приемника с источником за счет стартового бита. Более «свободные» временные допуски определяют низкую стоимость оборудования асинхронной системы.

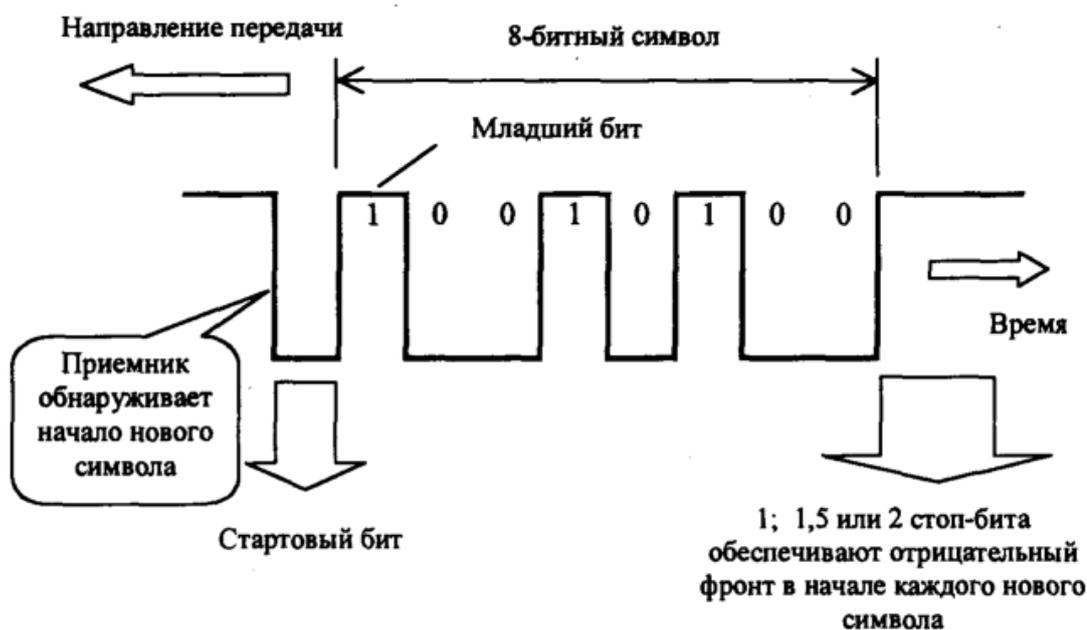


Рис. 1. Асинхронная передача

При синхронном режиме передачи старт-стопные биты между каждой парой байт отсутствуют и весь блок или кадр данных передается как одна цепочка битов без каких-либо задержек между 8-битными элементами. Чтобы приемник обеспечивал различные уровни синхронизации, необходимо выполнение следующих требований:

- передаваемая цепочка битов должна быть закодирована так, чтобы приемник мог осуществлять побитовую синхронизацию;
- каждому кадру должен предшествовать один или более зарезервированных байтов или символов, благодаря чему приемник может надежно разделить полученную цепочку битов по границам байтов или символов (побайтная или посимвольная синхронизация);
- содержимое каждого кадра обрамляется парой зарезервированных байтов или символов.

Благодаря, последнему требованию приемник оповещается о поступлении кадра данных и об окончании кадра (рис. 2). При наличии промежутков времени между передачей двух последовательных кадров в этот период либо непрерывно передаются синхробайты бездействия (простоя), что позволяет приемнику поддерживать побитную или побайтную синхронизацию, либо каждому кадру предшествует один или несколько специальных синхронизирующих байтов или символов, например 01111110, что позволяет приемнику вновь войти в байтовый синхронизм с передатчиком.

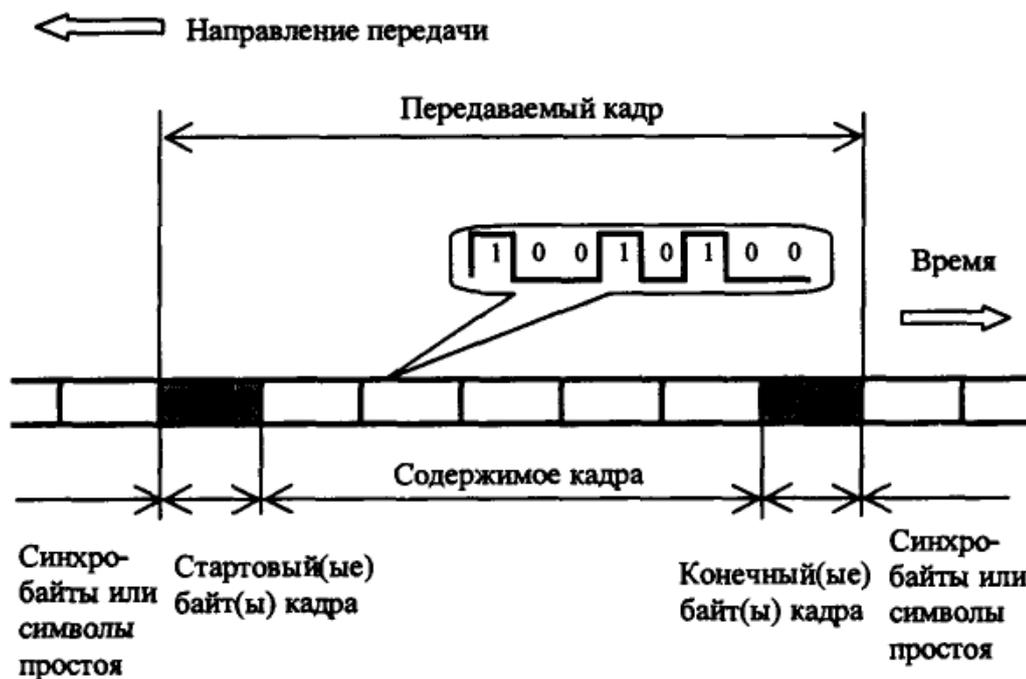


Рис. 2. Синхронная передача

Для обеспечения побитовой синхронизации используют самосинхронизирующиеся коды.

2. Передача с установлением логического соединения и без установления логического соединения

При передаче кадров данных на канальном уровне используют дейтаграммные процедуры, работающие без установления логического соединения (connectionless), и процедуры с предварительным установлением логического соединения (connection-oriented) (рис. 3).

При дейтаграммной передаче кадр посылается в сеть «без предупреждения», и никакой ответственности за его утерю протокол не несет (рис. 3, а). Дейтаграммный метод работает быстро, так как никаких предварительных действий перед отправкой данных не выполняется. Однако при таком методе трудно организовать в рамках протокола отслеживание факта доставки кадра узлу назначения. Этот метод не гарантирует доставку пакета.

Передача с установлением соединения более надежна, но требует больше времени для передачи данных и вычислительных затрат от конечных узлов. При такой передаче узлу-получателю отправляется служебный кадр специального формата с предложением установить соединение (рис. 3, б). Если узел-получатель согласен с этим, то он посылает в ответ другой служебный кадр, подтверждающий установление соединения и предлагающий для данного логического соединения некоторые параметры, например идентификатор соединения, максимальное значение поля данных кадров, которые будут использоваться в рамках данного соединения, и т. п. Узел-инициатор соединения может завершить процесс установления соединения отправкой третьего служебного кадра, в котором сообщит, что предложенные параметры ему подходят. На этом логическое соединение считается установленным, и в его рамках можно

передавать информационные кадры с пользовательскими данными. После передачи некоторого законченного набора данных, например определенного файла, узел инициирует разрыв данного логического соединения, посылая соответствующий служебный кадр.

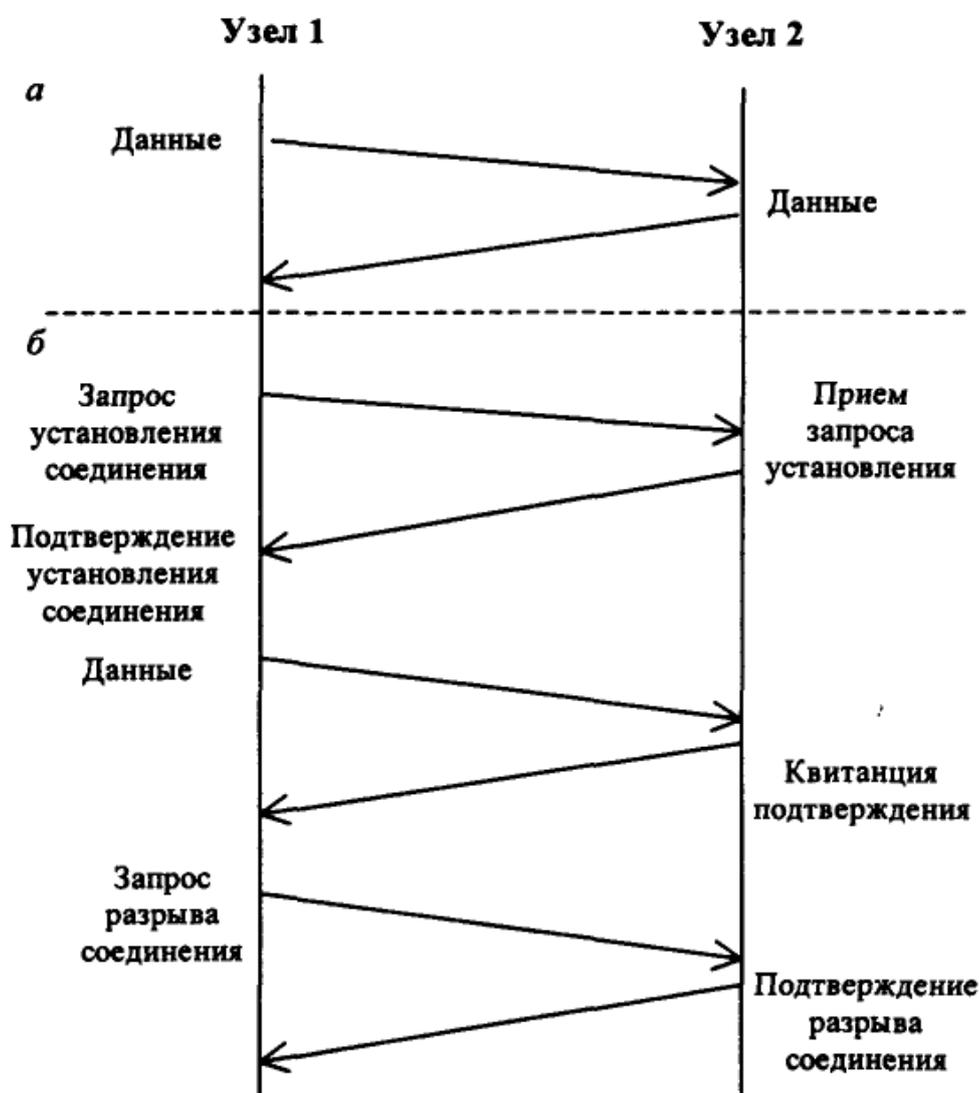


Рис. 3. Протоколы без установления соединения (а) и с установлением соединения (б)

В отличие от протоколов дейтаграммного типа, которые поддерживают только один тип кадра — информационный, протоколы, работающие по процедуре с установлением соединения, должны поддерживать несколько типов кадров — служебные, для установления (и разрыва) логического соединения, и информационные, переносящие собственно пользовательские данные.

Процедура установления соединения используется:

- для взаимной аутентификации либо пользователей, либо оборудования (маршрутизаторы тоже могут иметь имена и пароли, которые нужны для уверенности в том, что злоумышленник не подменил корпоративный маршрутизатор и не отвел поток данных в свою сеть для анализа);

- для согласования изменяемых параметров протокола: MTU, различных тайм-аутов и т. п.;

— для обнаружения и коррекции ошибок. Установление логического соединения дает точку отсчета для задания начальных значений номеров кадров. При потере нумерованного кадра приемник, во-первых, получает возможность обнаружить этот факт, а во-вторых, может сообщить передатчику, какой в точности кадр нужно передать повторно.

В некоторых технологиях процедуру установления логического соединения используют при динамической настройке коммутаторов сети для маршрутизации всех последующих кадров, которые будут проходить через сеть в рамках данного логического соединения. Так работают сети технологий X.25, Frame relay и ATM.

Лекция № 12 Обнаружение и коррекция ошибок. Компрессия (сжатие) данных

- 1) Методы обнаружения ошибок
- 2) Методы восстановления искаженных и потерянных кадров
- 3) Компрессия (сжатие) данных

1. Методы обнаружения ошибок

Все методы обнаружения ошибок основаны на передаче в составе кадра данных служебной избыточной информации, по которой можно судить о достоверности принятых данных. Эту служебную информацию называют *контрольной суммой*. Контрольная сумма вычисляется как функция от основной информации, причем необязательно только путем суммирования. Принимающая сторона повторно вычисляет контрольную сумму кадра по известному алгоритму и в случае ее совпадения с контрольной суммой, вычисленной передающей стороной, делает вывод о том, что данные были переданы через сеть корректно.

Существует несколько распространенных алгоритмов вычисления контрольной суммы, отличающихся вычислительной сложностью и способностью обнаружить ошибки в данных.

Примечание.

Паритет — равенство, равноправие сторон.

Операция исключающего ИЛИ (сложение по модулю два)
 $1 \oplus 1 = 0, 0 \oplus 0 = 0, 1 \oplus 0 = 1, 0 \oplus 1 = 1$

Контроль по паритету представляет собой наиболее простой метод контроля данных, но с его помощью можно обнаружить только одиночные ошибки в проверяемых данных. Метод заключается в суммировании по модулю 2 всех бит контролируемой информации. Например, для данных 100101011 результатом контрольного суммирования будет значение 1. Результат суммирования также представляет собой один бит данных, который пересылается вместе с контролируемой информацией. При искажении при пересылке любого одного бита исходных данных (или контрольного разряда) результат суммирования будет отличаться от принятого контрольного разряда, что говорит об ошибке. Однако двойная ошибка, например 110101010, будет неверно принята за корректные данные. Метод редко применяется в вычислительных сетях из-за невысоких диагностических способностей.

Вертикальный и горизонтальный контроль по паритету представляет собой модификацию описанного выше метода. Его отличие состоит в том, что исходные данные рассматриваются в виде матрицы, строки которой составляют байты данных. Контрольный разряд подсчитывается отдельно для каждой строки и для каждого столбца матрицы. Этот метод обнаруживает большую часть двойных ошибок, однако обладает большой избыточностью. На практике сейчас также почти не применяется.

Циклический избыточный контроль является в настоящее время наиболее популярным методом контроля в вычислительных сетях. Метод основан на рассмотрении исходных данных в виде одного многоразрядного двоичного числа.

Например, кадр, состоящий из 1024 байт, будет рассматриваться как одно число, состоящее из $1024 \cdot 8 = 8192$ бит. В качестве контрольной информации рассматривается остаток от деления этого числа на известный делитель R .

Обычно в качестве делителя выбирается семнадцати- или тридцати трехразрядное число. При получении кадра данных снова вычисляется остаток от деления на тот же делитель R , но при этом от кадра вычитается содержащаяся в нем контрольная сумма. Если остаток от деления на R равен нулю, то делается вывод об отсутствии ошибок в полученном кадре, в противном случае кадр считается искаженным.

Этот метод обладает более высокой вычислительной сложностью, но его диагностические возможности гораздо выше, чем у методов контроля по паритету. Метод обнаруживает все одиночные ошибки, двойные ошибки и ошибки в нечетном числе бит. Метод обладает также невысокой степенью избыточности.

2. Методы восстановления искаженных и потерянных кадров

Методы коррекции ошибок в вычислительных сетях основаны на повторной передаче кадра данных в том случае, если кадр теряется и не доходит до адресата или приемник обнаружил в нем искажение информации. Чтобы убедиться в необходимости повторной передачи данных, отправитель нумерует отправляемые кадры и для каждого кадра ожидает от приемника *положительной квитанции* — служебного кадра, извещающего о том, что исходный кадр был получен и данные в нем оказались корректными. Время этого ожидания ограничено — при отправке каждого кадра передатчик запускает таймер, и, если по его истечении положительная квитанция не получена, кадр считается утерянным. Приемник в случае получения кадра с искаженными данными может отправить *отрицательную квитанцию* — явное указание на то, что данный кадр нужно передать повторно.

Существуют два подхода к организации процесса обмена квитанциями: с простоями и с организацией «окна».

Метод с простоями требует, чтобы источник, пославший кадр, ожидал получения квитанции (положительной или отрицательной) от приемника и только после этого посылал следующий кадр (или повторял искаженный). Если же квитанция не приходит в течение тайм-аута, то кадр (или квитанция) считается утерянным и его передача повторяется. На [рис. 1, а](#) видно, что в этом случае производительность обмена данными существенно снижается, — хотя передатчик и мог бы послать следующий кадр сразу же после отправки предыдущего, он обязан ждать прихода квитанции.

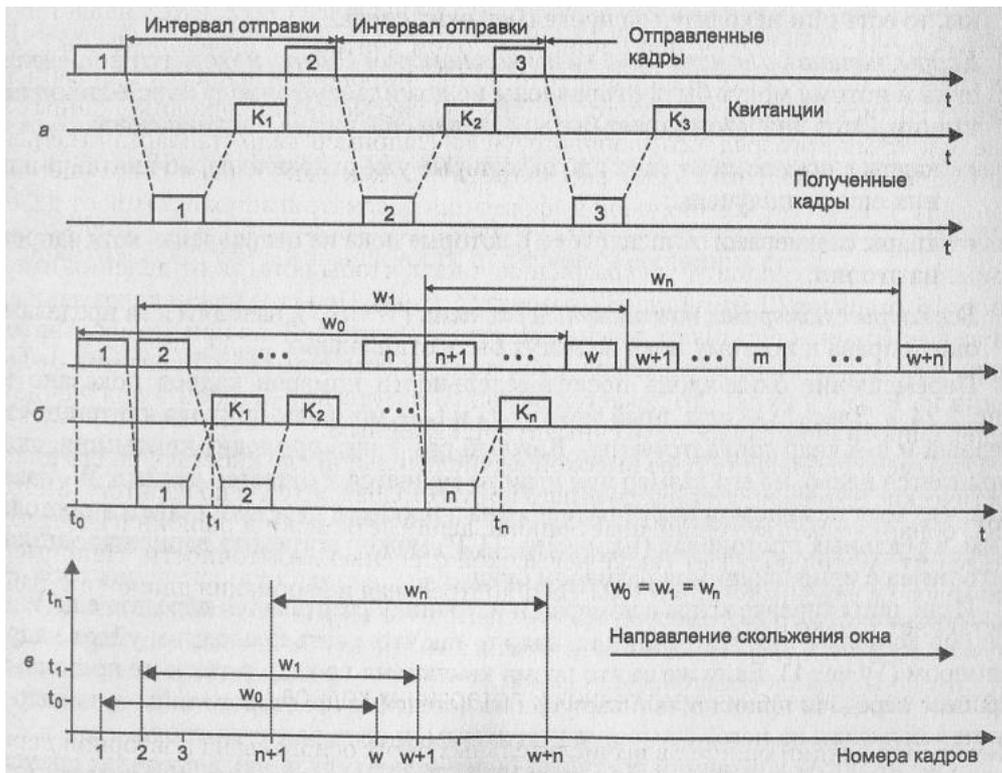


Рис. 1. Методы восстановления искаженных и потерянных кадров:

t_0 — исходный момент; t_1 и t_n — моменты прихода квитанций на 1-ый и n -ый кадры соответственно

Второй метод называется методом «скользящего окна». В этом методе для повышения коэффициента использования линии источнику разрешается передать некоторое количество кадров в непрерывном режиме, то есть в максимально возможном для источника темпе, без получения на эти кадры положительных ответных квитанций. Количество кадров, которые разрешается передавать таким образом, называется *размером окна*. Рис. 1, б иллюстрирует данный метод для окна размером в W кадров.

В начальный момент, когда еще не послано ни одного кадра, окно определяет диапазон кадров с номерами от 1 до W включительно. Источник начинает передавать кадры и получать в ответ квитанции. В момент t_1 при получении первой квитанции K_1 окно сдвигается на одну позицию, определяя новый диапазон от 2 до $(W + 1) - W_1$.

Рассмотрим произвольный момент времени t_n когда источник получил квитанцию на кадр с номером n . Окно сдвинулось вправо и определило диапазон разрешенных к передаче кадров от $(n + 1)$ до $(W + n)$. Все множество кадров, выходящих из источника, можно разделить на перечисленные ниже группы (рис. 1, б).

1. Кадры с номерами от 1 до n уже были отправлены и квитанции на них получены, то есть они находятся за пределами окна слева.

Кадры, начиная с номера $(n + 1)$ и кончая номером $(W + n)$, находятся в пределах окна и потому могут быть отправлены не дожидаясь прихода какой-либо квитанции. Этот диапазон может быть разделен еще на два поддиапазона:

— кадры с номерами от $(n + 1)$ до m , которые уже отправлены, но квитанции на них еще не получены;

— кадры с номерами от m до $(W + n)$, которые пока не отправлены, хотя запрета на это нет.

1. Все кадры с номерами, большими или равными $(W + n + 1)$, находятся за пределами окна справа и поэтому пока не могут быть отправлены.

Каждый раз, когда приходит квитанция, окно сдвигается вправо, но его размер при этом не меняется и остается равным W .

При отправке кадра с номером n источнику разрешается передать еще $(W - 1)$ кадров до получения квитанции на кадр n (размер окна в W), так что в сеть последним уйдет кадр с номером $(W + n - 1)$. Если же за это время квитанция на кадр n так и не пришла, то процесс передачи приостанавливается, и по истечении некоторого тайм-аута кадр n (или квитанция на него) считается утерянным, и он передается снова.

Метод скользящего окна более сложен в реализации, чем метод с простоями, так как передатчик должен хранить в буфере все кадры, на которые пока не получены положительные квитанции. Кроме того, требуется отслеживать несколько параметров алгоритма: размер окна W , номер кадра, на который получена квитанция, номер кадра, который еще можно передать до получения новой квитанции.

Если несколько кадров пришли почти одновременно, то приемник может послать квитанцию только на последний кадр. При этом подразумевается, что все предыдущие кадры также дошли благополучно.

Метод с простоями является частным случаем метода скользящего окна, когда размер окна равен единице.

Метод скользящего окна имеет два параметра, которые влияют на эффективность передачи данных — размер окна и величина тайм-аута ожидания квитанции. В надежных сетях, когда кадры искажаются и теряются редко, для повышения скорости обмена данными размер окна нужно увеличивать, так как при этом передатчик будет посылать кадры с меньшими паузами. В ненадежных сетях размер окна следует уменьшать, так как при частых потерях и искажениях кадров резко возрастает объем вторично передаваемых через сеть кадров, а значит, пропускная способность сети будет расходоваться во многом впустую — полезная пропускная способность сети будет падать.

Выбор тайм-аута зависит не от надежности сети, а от задержек передачи кадров сетью.

3. Компрессия (сжатие) данных

Компрессия данных применяется для сокращения времени их передачи. Так как на компрессию и декомпрессию данных передающая и приемная стороны тратят дополнительное время, то выгоды от сокращения времени на передачу сжатых данных обычно бывают заметны только для низкоскоростных каналов (около 64 кбит/с).

Каждый алгоритм компрессии применяется к определенному типу данных. Рассмотрим некоторые общие алгоритмы сжатия данных.

Десятичная упаковка. Когда данные состоят только из чисел, экономию можно получить путем уменьшения количества используемых на цифру бит с 7 до 4, используя простое двоичное кодирование десятичных цифр вместо кода ASCII (акси). В таблице ASCII старшие три бита всех кодов десятичных цифр содержат комбинацию 011. Если все данные в кадре информации состоят из десятичных цифр, то, поместив в заголовок кадра соответствующий управляющий символ, можно существенно сократить длину кадра.

Относительное кодирование. При передаче числовых данных с небольшими отклонениями между последовательными цифрами передаются только эти отклонения вместе с опорным значением. Такой метод используется в методе цифрового кодирования голоса, передающем в каждом такте только разницу между соседними замерами голоса. Обычно разности отсчетов меньше самих отсчетов.

Например, алгоритм MPEG ориентированный на обработку видео. При формировании потока данных исходят из предположения о том, что два соседних кадра в видеопоследовательности мало отличаются. Опорные кадры сжимают по методу JPEG и передают относительно редко. В основном передаются изменения между соседними кадрами.

Символьное подавление. Если передаваемые данные содержат большое количество повторяющихся байт (например, при передаче черно-белого изображения черные поверхности будут порождать большое количество нулевых значений, а максимально освещенные участки изображения — большое количество байт, состоящих из всех единиц) передатчик сканирует последовательность передаваемых байт и, если обнаруживает последовательность из трех или более одинаковых байт, заменяет ее специальной трехбайтовой последовательностью, в которой указывает значение байта, количество его повторений, а также отмечает начало этой последовательности специальным управляющим символом. Примером может служить алгоритм RLE, который применяют для сжатия графики (файлы формата PCX) и видео.

Коды переменной длины (статистическое кодирование). В этом методе кодирования используется тот факт, что не все символы в передаваемом кадре встречаются с одинаковой частотой. Поэтому коды часто встречающихся символов заменяют кодами меньшей длины, а редко встречающихся — кодами большей длины.

Например, алгоритм Хаффмана позволяет строить коды автоматически, на основании известных частот символов. Строится двоичное дерево, листья соответствуют кодируемым символам. Код символа представляется последовательностью ребер (в двоичном дереве 1 и 0), ведущих от корня к листу. Листья символов с высокой вероятностью появления находятся ближе к корню, чем листья маловероятных символов.

Существующие алгоритмы сжатия информации можно разделить на две большие группы:

— алгоритмы сжатия без потерь: алгоритм Лемпеля-Зива (Lempel-Ziv, LZ), RLE (Run Length Encoding), кодирование Хаффмана (Huffman Encoding);

— алгоритмы сжатия с потерями: JPEG (Joint Photographic Expert Group), M-JPEG, MPEG (Motion Picture Expert Group).

Алгоритм Лемпеля-Зива лежит в основе архиваторов (pkzip, arj, lha) и программ динамического сжатия дисков (Stacker, DoubleSpace). Основная идея этого алгоритма состоит в том, что второе и последующие вхождения некоторой строки символов в сообщение заменяются ссылкой на ее первое появление в сообщении. Алгоритм используется для сжатия текстов и графики.

Алгоритм JPEG ориентирован на сжатие неподвижных изображений. Он базируется на дискретном косинусном преобразовании (ДКП) неподвижного изображения, отбрасывании малых высокочастотных компонентов получаемого спектра и последующем энтропийном сжатии полученных данных.

Алгоритм M-JPEG используют для компрессии видео, в котором каждый отдельный кадр сжимается по методу JPEG.

Из приведенного обзора алгоритмов сжатия очевидны два вывода:

— нет алгоритма, одинаково эффективного для данных разной природы;

— приведенные алгоритмы рассчитаны на сжатие данных, в которых есть последовательности одинаковых символов или одни символы встречаются чаще других.

Лекция № 13 Коммутация каналов

1. Принципы построения систем коммутации и структура коммутационного узла
2. Передача данных в системах с коммутацией каналов
 - 2.1 Коммутация каналов на основе частотного мультиплексирования
 - 2.2 Коммутация каналов на основе разделения времени
 - 2.3 Общие свойства сетей с коммутацией каналов

1. Принципы построения систем коммутации и структура коммутационного узла

Под коммутацией понимается замыкание, размыкание и переключение электрических цепей. Посредством коммутации абонентские устройства (оконечные устройства сети) соединяются между собой для передачи (приема) информации. Коммутация осуществляется на коммутационных узлах, которые представляют собой устройства, предназначенные для приема, обработки и распределения поступающей информации.

Абонентские устройства сети соединяются с коммутационными узлами абонентскими линиями. Коммутационные узлы, находящиеся на территории одного города (населенного пункта), соединяются соединительными линиями.

Коммутационный узел, в который включаются абонентские линии, называется коммутационной станцией или просто станцией.

На рис. 1 приведена общая структура сети с коммутацией абонентов. Абоненты соединяются с коммутаторами индивидуальными линиями связи, каждая из которых используется в любой момент времени только одним, закрепленным за этой линией абонентом. Между коммутаторами линии связи используются совместно несколькими абонентами.

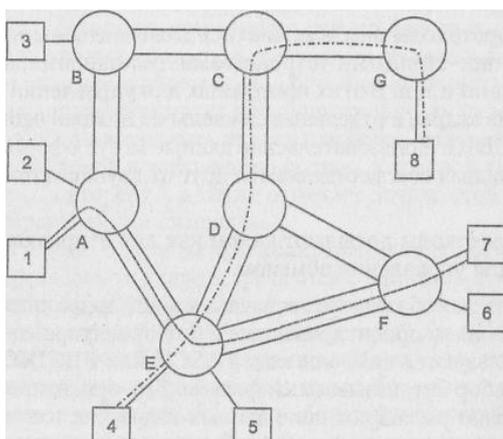


Рис. 1. Общая структура сети с коммутацией абонентов

Для осуществления требуемого соединения коммутационный узел и абонентское устройство обмениваются управляющими сигналами.

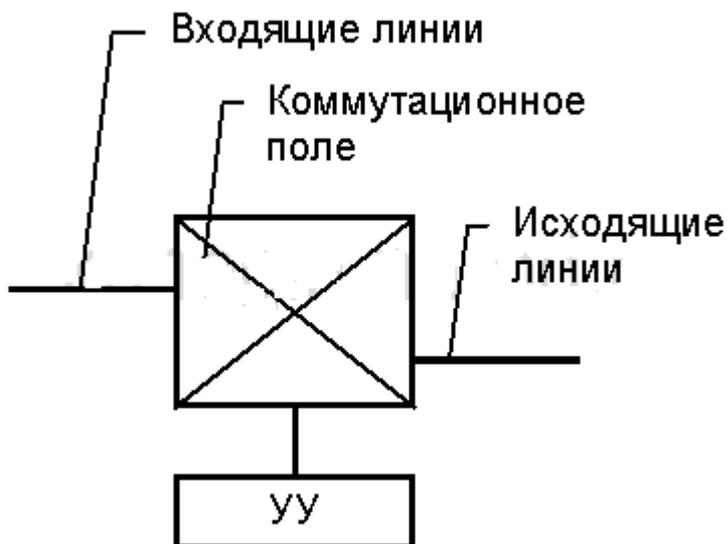
На коммутационных узлах соединение может устанавливаться на время, необходимое для передачи одного сообщения (например, одного телефонного разговора), или на длительное время, превышающее время передачи одного сообщения. Коммутация первого вида называется оперативной (динамической), а второго — кроссовой (долговременной, постоянной). Режим постоянной

коммутации в сетях с коммутацией каналов называется сервисом выделенных каналов.

Структура коммутационного узла. Для выполнения своих функций коммутационный узел должен иметь (рис. 2):

— коммутационное поле (КП), предназначенное для соединения входящих и исходящих линий (каналов) на время передачи информации;

— управляющее устройство (УУ), обеспечивающее установление соединения между входящими и исходящими линиями через коммутационное поле, а также прием и передачу управляющей информации.



УУ - управляющее устройство

Рис. 2. Основные составляющие коммутационного узла

В некоторых случаях коммутационный узел может иметь устройства приема и хранения информации, если таковая передается не непосредственно потребителю информации, а предварительно накапливается на узле. Такие узлы применяются в системах коммутации сообщений.

Коммутационные узлы сетей связи классифицируются по ряду признаков:

— по виду передаваемой информации (телефонные, телеграфные, вещания, телеуправления, передачи данных и др.);

— по способу обслуживания соединений (ручные, полуавтоматические, автоматические);

— по типу сети связи (городские, сельские, учрежденческие, междугородные);

— по типу коммутационного и управляющего оборудования (электромеханические, электронные);

— по системам применяемого коммутационного оборудования (декадно-шаговые, координатные, машинные, квазиэлектронные, электронные);

— по емкости, т. е. по числу входящих и исходящих линий или каналов (малой, средней, большой емкости);

— по типу коммутации (оперативная, кроссовая, смешанная);

— по способу разделения каналов (пространственный, временной, частотный).

Существуют три схемы коммутации абонентов в сетях:

- коммутация каналов;
- коммутация пакетов;
- коммутация сообщений.

Сети с коммутацией каналов имеют более богатую историю, они ведут свое происхождение от первых телефонных сетей. Сети с коммутацией пакетов сравнительно молоды, они появились в конце 60-х годов как результат экспериментов с первыми глобальными компьютерными сетями. Сети с коммутацией сообщений послужили прототипом современных сетей с коммутацией пакетов и сегодня они в чистом виде практически не существуют.

2. Передача данных в системах с коммутацией каналов

Коммутация каналов подразумевает образование непрерывного составного физического канала из последовательно соединенных отдельных канальных участков для прямой передачи данных между абонентами. Отдельные каналы соединяются между собой коммутаторами, которые устанавливают связи между любыми конечными узлами сети. В сети с коммутацией каналов перед передачей данных всегда необходимо выполнить процедуру установления соединения, в процессе которой и создается составной канал.

Например, если сеть, изображенная на рис. 1, работает по технологии коммутации каналов, то узел 1, чтобы передать данные узлу 7, прежде всего должен передать специальный запрос на установление соединения коммутатору А, указав адрес назначения 7. Коммутатор А должен выбрать маршрут образования составного канала, а затем передать запрос следующему коммутатору, в данном случае Е. Затем коммутатор Е передает запрос коммутатору F, а тот, в свою очередь, передает запрос узлу 7. Если узел 7 принимает запрос на установление соединения, он направляет по уже установленному каналу ответ исходному узлу, после чего составной канал считается скоммутированным и узлы 1 и 7 могут обмениваться по нему данными.

Коммутаторы, а также соединяющие их каналы должны обеспечивать одновременную передачу данных нескольких абонентских каналов. Для этого они должны поддерживать какую-либо технику мультиплексирования абонентских каналов.

В настоящее время для мультиплексирования абонентских каналов используются:

- техника частотного мультиплексирования (Frequency Division Multiplexing FDM);
- техника мультиплексирования с разделением времени (Time Division Multiplexing TDM).

2.1 Коммутация каналов на основе частотного мультиплексирования

Техника частотного мультиплексирования каналов была разработана для телефонных сетей, но применяется она и для других видов сетей, например сетей кабельного телевидения.

Рассмотрим особенности этого вида мультиплексирования на примере телефонной сети.

Речевые сигналы имеют спектр шириной примерно в 10 000 Гц, однако основные гармоники укладываются в диапазон от 300 до 3400 Гц. Поэтому для качественной передачи речи достаточно образовать между двумя собеседниками канал с полосой пропускания в 3100 Гц, который и используется в телефонных сетях для соединения двух абонентов. В то же время полоса пропускания кабельных систем соединяющих телефонные коммутаторы между собой составляет сотни килогерц. Однако непосредственно передавать сигналы нескольких абонентских каналов по широкополосному каналу невозможно, так как все они работают в одном и том же диапазоне частот и сигналы разных абонентов смешаются между собой так, что разделить их будет невозможно.

Для разделения абонентских каналов характерна техника модуляции высокочастотного несущего синусоидального сигнала низкочастотным речевым сигналом (рис. 3). В результате спектр модулированного сигнала переносится в другой частотный диапазон.

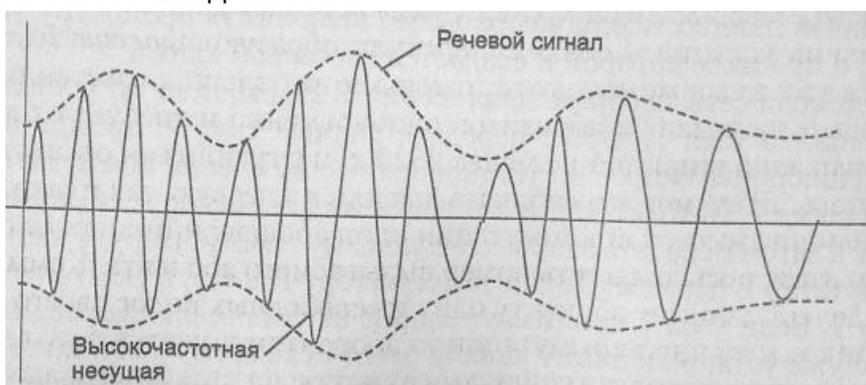


Рис. 3. Модуляция речевого сигнала

Если сигналы каждого абонентского канала перенести в свой собственный диапазон частот, то в одном широкополосном канале можно одновременно передавать сигналы нескольких абонентских каналов.

На входы коммутатора поступают исходные сигналы от абонентов телефонной сети. Коммутатор выполняет перенос частоты каждого канала в свой диапазон частот. Обычно высокочастотный диапазон делится на полосы, которые отводятся для передачи данных абонентских каналов (рис. 4). Чтобы низкочастотные составляющие сигналов разных каналов не смешивались между собой, полосы делают шириной в 4 кГц, а не в 3,1 кГц, оставляя между ними страховой промежуток в 900 Гц. В канале между двумя коммутаторами одновременно передаются сигналы всех абонентских каналов, но каждый из них занимает свою полосу частот. Такой канал называют уплотненным.

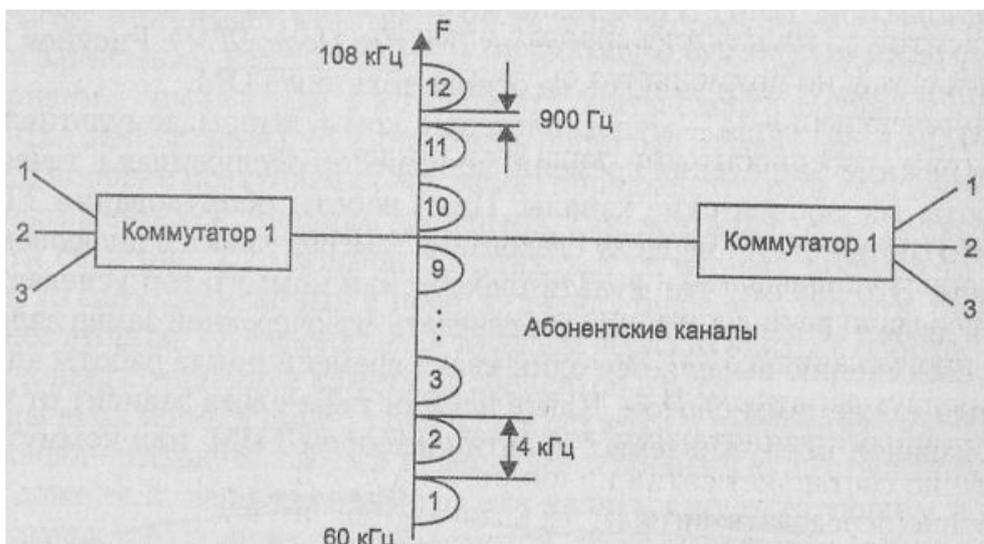


Рис. 4. Коммутация на основе частотного уплотнения

Выходной коммутатор выделяет модулированные сигналы каждой несущей частоты и передает их на соответствующий выходной канал, к которому непосредственно подключен абонентский телефон.

В сетях на основе FDM коммутации принято несколько уровней иерархии уплотненных каналов. Первый уровень уплотнения образуют 12 абонентских каналов, которые составляют базовую группу каналов, занимающую полосу частот шириной в 48 кГц с границами от 60 до 108 кГц. Вторым уровнем уплотнения образуют 5 базовых групп, которые составляют супергруппу, с полосой частот шириной в 240 кГц и границами от 312 до 552 кГц. Супергруппа передает данные 60 абонентских каналов тональной частоты. Десять супергрупп образуют главную группу, которая используется для связи между коммутаторами на больших расстояниях. Главная группа передает данные 600 абонентов одновременно и требует от канала связи полосу пропускания шириной не менее 2520 кГц с границами от 564 до 3084 кГц.

Коммутаторы FDM могут выполнять как динамическую, так и постоянную коммутацию. При динамической коммутации один абонент инициирует соединение с другим абонентом, посылая в сеть номер вызываемого абонента. Коммутатор динамически выделяет данному абоненту одну из свободных полос своего уплотненного канала. При постоянной коммутации за абонентом полоса в 4 кГц закрепляется на длительный срок путем настройки коммутатора по отдельному входу, недоступному пользователям.

Принцип коммутации на основе разделения частот остается неизменным и в сетях другого вида, меняются только границы полос, выделяемых абонентскому каналу, а также количество низкоскоростных каналов в уплотненном высокоскоростном.

2.2 Коммутация каналов на основе разделения времени

Коммутация на основе техники разделения частот разрабатывалась в расчете на передачу непрерывных сигналов, представляющих голос. При переходе к цифровой форме представления голоса была разработана новая техника мультиплексирования, ориентирующаяся на дискретный характер

передаваемых данных. Эта техника мультиплексирования с разделением времени. Рис. 5 поясняет принцип коммутации каналов на основе техники TDM.

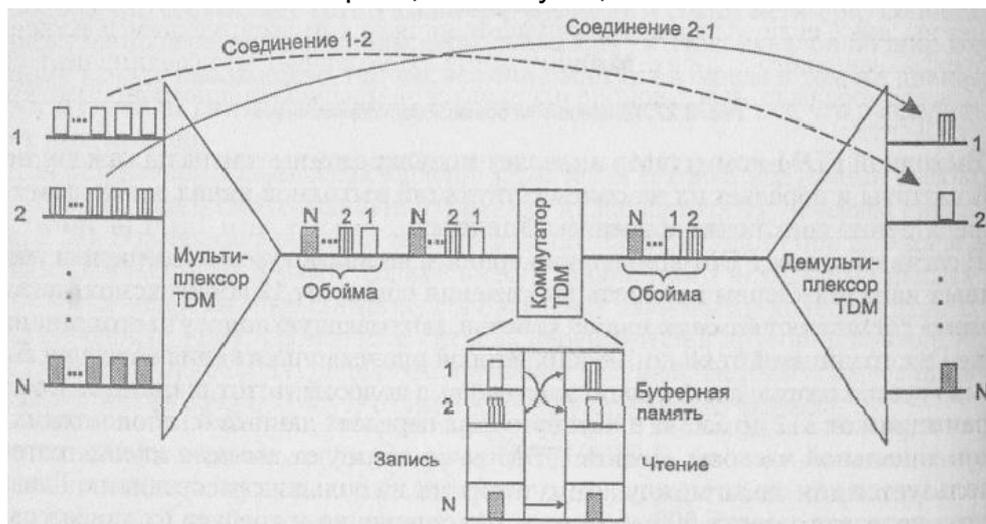


Рис. 5. Коммутация на основе разделения каналов во времени

Аппаратура TDM-сетей — мультиплексоры, коммутаторы, демultipлексоры работает в режиме разделения времени, поочередно обслуживая в течение цикла своей работы все абонентские каналы. Каждому соединению выделяется один квант времени цикла работы аппаратуры, называемый тайм-слотом. Его длительность зависит от числа абонентских каналов, обслуживаемых мультиплексором TDM или коммутатором.

В каждом цикле мультиплексор выполняет следующие действия:

- прием от каждого канала очередного байта данных;
- составление из принятых байтов уплотненного кадра, называемого обоймой;
- передача уплотненного кадра на выходной канал.

Порядок байт в обойме соответствует номеру входного канала, от которого этот байт получен. Количество обслуживаемых мультиплексором абонентских каналов зависит от его быстродействия.

Демultipлексор выполняет обратную задачу — он разбирает байты уплотненного кадра и распределяет их по своим нескольким выходным каналам, при этом он считает, что порядковый номер байта в обойме соответствует номеру выходного канала.

Коммутатор принимает уплотненный кадр по скоростному каналу от мультиплексора и записывает каждый байт из него в отдельную ячейку своей буферной памяти, причем в том порядке, в котором эти байты были упакованы в уплотненный кадр. Для выполнения операции коммутации байты извлекаются из буферной памяти не в порядке поступления, а в таком порядке, который соответствует поддерживаемым в сети соединениям абонентов. Так, например, если первый абонент левой части сети рис. 5 должен соединиться со вторым абонентом в правой части сети, то байт, записанный в первую ячейку буферной памяти, будет извлекаться из нее вторым. «Перемешивая» нужным образом байты в обойме, коммутатор обеспечивает соединение конечных абонентов в сети.

Сети TDM могут поддерживать режим динамической коммутации и режим постоянной коммутации.

2.3 Общие свойства сетей с коммутацией каналов

Сети с коммутацией каналов обладают общими свойствами независимо от того, какой тип мультиплексирования в них используется.

Сети с динамической коммутацией требуют предварительной процедуры установления соединения между абонентами. Для этого в сеть передается адрес вызываемого абонента, который проходит через коммутаторы и настраивает их на последующую передачу данных.

Сеть может отказать в установлении соединения, если емкость требуемого выходного канала уже исчерпана. Для FDM-коммутатора емкость выходного канала равна количеству частотных полос этого канала, а для TDM-коммутатора — количеству тайм-слотов, на которые делится цикл работы канала. Сеть отказывает в соединении также в том случае, если запрашиваемый абонент уже установил соединение с кем-нибудь другим. В первом случае говорят, что занят коммутатор, а во втором — абонент. Возможность отказа в соединении является недостатком метода коммутации каналов.

Если соединение может быть установлено, то ему выделяется фиксированная полоса частот в FDM-сетях или же фиксированная пропускная способность в TDM-сетях. Эти величины остаются неизменными в течение всего периода соединения. Гарантированная пропускная способность сети после установления соединения необходима для таких приложений, как передача голоса, изображения или управления объектами в реальном масштабе времени. Однако динамически изменять пропускную способность канала по требованию абонента сети с коммутацией каналов не могут, что делает их неэффективными в условиях пульсирующего трафика.

Недостатком сетей с коммутацией каналов является невозможность применения пользовательской аппаратуры, работающей с разной скоростью. Отдельные части составного канала работают с одинаковой скоростью, так как сети с коммутацией каналов не буферизуют данные пользователей.

Лекция № 14 Коммутация пакетов и сообщений

- 1) Передача данных в системах с коммутацией пакетов**
 - 1.1 Принципы коммутации пакетов**
 - 1.2 Виртуальные каналы в сетях с коммутацией пакетов**
 - 1.3 Пропускная способность сетей с коммутацией пакетов**
- 2) Передача данных в системах с коммутацией сообщений**
- 3) Обеспечение дальности связи**

1. Передача данных в системах с коммутацией пакетов

1.1 Принципы коммутации пакетов

Компьютерные сети на основе коммутации каналов показали, что этот вид коммутации не позволяет достичь высокой общей пропускной способности сети. Проблема заключается в пульсирующем характере трафика, который генерируют типичные сетевые приложения. Поэтому для передачи компьютерного трафика была разработана техника коммутации пакетов.

Например, при обращении к удаленному серверу пользователь сначала просматривает содержимое каталога этого сервера, что порождает передачу небольшого объема данных. Затем он открывает требуемый файл в текстовом редакторе, и эта операция может создать достаточно интенсивный обмен данными, особенно если файл содержит объемные графические включения. После отображения нескольких страниц файла пользователь некоторое время работает с ними локально, что вообще не требует передачи данных по сети, а затем возвращает модифицированные копии страниц на сервер — и это снова порождает интенсивную передачу данных по сети.

Если организовать коммутацию канала между компьютером пользователя и сервером, то большую часть времени канал будет простаивать. В то же время коммутационные возможности сети будут использоваться — часть тайм-слотов или частотных полос коммутаторов будет занята и недоступна другим пользователям сети.

При коммутации пакетов все передаваемые пользователем сообщения разбиваются в исходном узле на сравнительно небольшие части, называемые пакетами.

Сообщением называется логически завершенная порция данных — запрос на передачу файла, ответ на этот запрос, содержащий весь файл, и т. п. Сообщения могут иметь произвольную длину, от нескольких байт до многих мегабайт.

Пакеты могут иметь переменную длину до 4 кбайт. Каждый пакет снабжается заголовком, в котором указывается адресная информация, необходимая для доставки пакета узлу назначения, а также номер пакета, который будет использоваться узлом назначения для сборки сообщения. Пакеты транспортируются в сети как независимые информационные блоки. Коммутаторы сети принимают пакеты от конечных узлов и на основании адресной информации передают их друг другу, а в конечном итоге — узлу назначения.

Коммутаторы пакетной сети отличаются от коммутаторов каналов тем, что они имеют внутреннюю буферную память для временного хранения пакетов, если выходной порт коммутатора в момент принятия пакета занят передачей другого пакета. В этом случае пакет находится некоторое время в очереди пакетов в буферной памяти выходного порта, а когда до него дойдет очередь, то он передается следующему коммутатору. Такая схема передачи данных позволяет сглаживать пульсации трафика на магистральных связях между коммутаторами и тем самым использовать их наиболее эффективным образом для повышения пропускной способности сети в целом.

Действительно, для пары абонентов наиболее эффективным было бы предоставление им в единоличное пользование скомутированного канала связи, как это делается в сетях с коммутацией каналов. При этом способе время взаимодействия этой пары абонентов было бы минимальным, так как данные без задержек передавались бы от одного абонента другому. Простои канала во время пауз передачи абонентов не интересуют, для них важно быстрее решить свою собственную задачу. Сеть с коммутацией пакетов замедляет процесс взаимодействия конкретной пары абонентов, так как их пакеты могут ожидать в коммутаторах, пока по магистральным связям передаются другие пакеты, пришедшие в коммутатор ранее.

Тем не менее, общий объем передаваемых сетью компьютерных данных в единицу времени при технике коммутации пакетов будет выше, чем при технике коммутации каналов. Это происходит потому, что пульсации отдельных абонентов в соответствии с законом больших чисел распределяются во времени. Поэтому коммутаторы постоянно и достаточно равномерно загружены работой, если число обслуживаемых ими абонентов действительно велико.

Более высокая эффективность сетей с коммутацией пакетов по сравнению с сетями с коммутацией каналов (при равной пропускной способности каналов связи) была доказана в 60-е годы как экспериментально, так и с помощью имитационного моделирования.

1.2 Виртуальные каналы в сетях с коммутацией пакетов

Описанный выше режим передачи пакетов между двумя конечными узлами сети предполагает независимую маршрутизацию каждого пакета. Такой режим работы сети называется дейтаграммным, и при его использовании коммутатор может изменить маршрут какого-либо пакета в зависимости от состояния сети — работоспособности каналов и других коммутаторов, длины очередей пакетов в соседних коммутаторах и т. п.

Существует и другой режим работы сети — передача пакетов по виртуальному каналу (*virtual circuit* или *virtual channel*). В этом случае перед тем, как начать передачу данных между двумя конечными узлами, должен быть установлен виртуальный канал, который представляет собой единственный маршрут, соединяющий эти конечные узлы. Виртуальный канал может быть динамическим или постоянным. Динамический виртуальный канал устанавливается при передаче в сеть специального пакета — запроса на установление соединения. Этот пакет проходит через коммутаторы и

«прокладывает» виртуальный канал. Это означает, что коммутаторы запоминают маршрут для данного соединения и при поступлении последующих пакетов данного соединения отправляют их всегда по проложенному маршруту. Постоянные виртуальные каналы создаются администраторами сети путем ручной настройки коммутаторов.

При отказе коммутатора или канала на пути виртуального канала соединение разрывается, и виртуальный канал нужно прокладывать заново. При этом он, естественно, обойдет отказавшие участки сети.

Каждый режим передачи пакетов имеет свои преимущества и недостатки. Дейтаграммный метод не требует предварительного установления соединения и поэтому работает без задержки перед передачей данных. Это особенно выгодно для передачи небольшого объема данных, когда время установления соединения может быть соизмеримым со временем передачи данных. Кроме того, дейтаграммный метод быстрее адаптируется к изменениям в сети.

При использовании метода виртуальных каналов время, затраченное на установление виртуального канала, компенсируется последующей быстрой передачей всего потока пакетов. Коммутаторы распознают принадлежность пакета к виртуальному каналу по специальной метке — номеру виртуального канала, а не анализируют адреса конечных узлов, как это делается при дейтаграммном методе.

1.3 Пропускная способность сетей с коммутацией пакетов

Одним из отличий метода коммутации пакетов от метода коммутации каналов является неопределенность пропускной способности соединения между двумя абонентами. В методе коммутации каналов после образования составного канала пропускная способность сети при передаче данных между конечными узлами известна — это пропускная способность канала. Данные после задержки, связанной с установлением канала, начинают передаваться на максимальной для канала скорости (рис. 1, а). Время передачи сообщения в сети с коммутацией

каналов $T_{к.к.}$ равно сумме задержки распространения сигнала по линии связи $t_{з.р.}$

и задержки передачи сообщения $t_{з.п.}$. Задержка распространения сигнала зависит от скорости распространения электромагнитных волн в конкретной физической среде, которая колеблется от 0,6 до 0,9 скорости света в вакууме. Время

передачи сообщения равно $\frac{V}{C}$, где V — объем сообщения (бит); C — пропускная способность канала (бит/с).

В сети с коммутацией пакетов наблюдается принципиально другая картина.

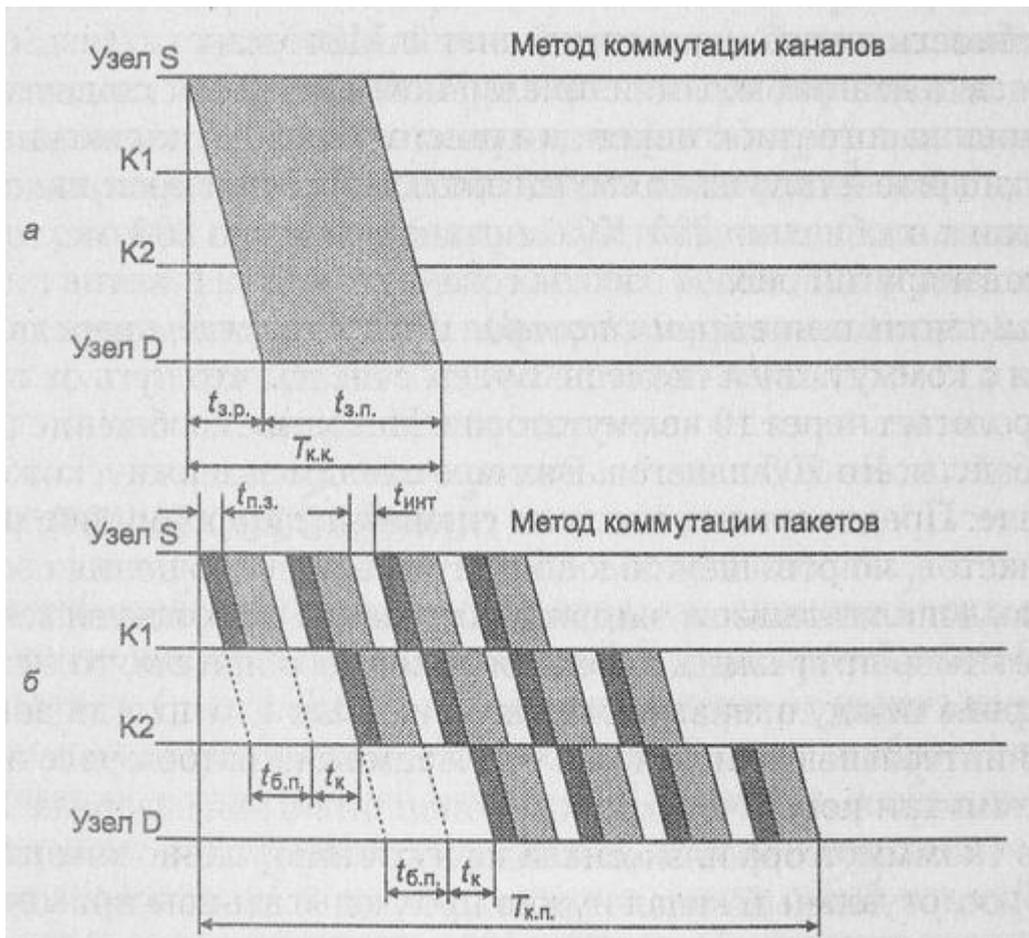


Рис. 1. Задержки передачи данных в сетях с коммутацией каналов и пакетов

Процедура установления соединения в этих сетях, если она используется, занимает примерно такое же время, как и в сетях с коммутацией каналов, поэтому будем сравнивать только время передачи данных.

На рис. 1, б показан пример передачи в сети с коммутацией пакетов. Предполагается, что в сеть передается сообщение того же объема, что и сообщение, иллюстрируемое рис. 1, а, однако оно разделено на пакеты, каждый из которых снабжен заголовком. Время передачи сообщения в сети с коммутацией пакетов обозначено на рисунке $T_{к.п.}$. При передаче этого сообщения, разбитого на пакеты, по сети с коммутацией пакетов возникают дополнительные временные задержки. Во-первых, это задержки в источнике передачи, который, помимо передачи собственно сообщения, тратит дополнительное время на передачу заголовков $t_{п.з.}$, плюс к этому добавляются задержки $t_{инт}$, вызванные интервалами между передачей каждого следующего пакета (это время уходит на формирование очередного пакета).

Во-вторых, дополнительное время тратится в каждом коммутаторе. Здесь задержки складываются из времени буферизации пакета $t_{б.п.}$ (коммутатор не может начать передачу пакета, не приняв его полностью в свой буфер) и времени коммутации t_k . Время буферизации равно времени приема пакета с битовой скоростью протокола. Время коммутации складывается из времени ожидания пакета в очереди и времени перемещения пакета в выходной порт. Если время

перемещения пакета фиксировано и обычно невелико (от нескольких микросекунд до нескольких десятков микросекунд), то время ожидания пакета в очереди колеблется в очень широких пределах и заранее неизвестно, так как зависит от текущей загрузки сети пакетами.

Таким образом, процесс передачи для определенной пары абонентов в сети с коммутацией пакетов является более медленным, чем в сети с коммутацией каналов.

Неопределенная пропускная способность сети с коммутацией пакетов — это плата за ее общую эффективность при некотором ущемлении интересов отдельных абонентов.

На эффективность работы сети существенно влияют размеры пакетов, которые передает сеть. Слишком большие размеры пакетов приближают сеть с коммутацией пакетов к сети с коммутацией каналов, поэтому эффективность сети при этом падает. Слишком маленькие пакеты заметно увеличивают долю служебной информации, так как каждый пакет несет с собой заголовок фиксированной длины, а количество пакетов, на которые разбиваются сообщения, будет резко расти при уменьшении размера пакета. Существует некоторая золотая середина, которая обеспечивает максимальную эффективность работы сети, однако ее трудно определить точно, так как она зависит от многих факторов, некоторые из них к тому же постоянно меняются в процессе работы сети. Поэтому разработчики протоколов для сетей с коммутацией пакетов выбирают пределы, в которых может находиться длина пакета, а точнее его поле данных, так как заголовок, как правило, имеет фиксированную длину. Обычно нижний предел поля данных выбирается равным нулю, что разрешает передавать служебные пакеты без пользовательских данных, а верхний предел не превышает 4 кбайт.

При выборе размера пакета необходимо учитывать также и интенсивность битовых ошибок канала. На ненадежных каналах необходимо уменьшать размеры пакетов, так как это уменьшает объем повторно передаваемых данных при искажениях пакетов.

2. Передача данных в системах с коммутацией сообщений

Под коммутацией сообщений понимается передача единого блока данных между транзитными компьютерами сети с временной буферизацией этого блока на диске каждого компьютера. Сообщение в отличие от пакета имеет произвольную длину, которая определяется не технологическими соображениями, а содержанием информации, составляющей сообщение. Например, сообщением может быть текстовый документ, файл с кодом программы, электронное письмо.

Транзитные компьютеры могут соединяться между собой как сетью с коммутацией пакетов, так и сетью с коммутацией каналов. Сообщение хранится в транзитном компьютере на диске, причем время хранения может быть достаточно большим, если компьютер загружен другими работами или сеть временно перегружена.

По такой схеме обычно передаются сообщения, не требующие немедленного ответа, чаще всего сообщения электронной почты. Режим передачи с

промежуточным хранением на диске называется режимом «хранение-и-передача» (store-and-forward).

Режим коммутации сообщений разгружает сеть для передачи трафика, требующего быстрого ответа, например трафика службы WWW или файловой службы.

Количество транзитных компьютеров стараются по возможности уменьшить. Если компьютеры подключены к сети с коммутацией пакетов, то число промежуточных компьютеров обычно уменьшается до двух. Например, пользователь передает почтовое сообщение своему серверу исходящей почты, а тот сразу старается передать сообщение серверу входящей почты адресата. Но если компьютеры связаны между собой телефонной сетью, то часто используется несколько промежуточных серверов, так как прямой доступ к конечному серверу может быть невозможен в данный момент из-за перегрузки телефонной сети (абонент занят) или экономически невыгоден из-за высоких тарифов на дальнюю телефонную связь.

Техника коммутации сообщений появилась в компьютерных сетях раньше техники коммутации пакетов, но потом была вытеснена последней, как более эффективной по критерию пропускной способности сети. Запись сообщения на диск занимает достаточно много времени, кроме того, наличие дисков предполагает специализированные компьютеры в качестве коммутаторов, что удорожает сеть.

Сегодня коммутация сообщений работает только для некоторых не оперативных служб, причем чаще всего поверх сети с коммутацией пакетов, как служба прикладного уровня.

3. Обеспечение дальности связи

Многоканальные системы передачи с частотным и временным разделением каналов — это сложный комплекс технических средств, включающий в себя оконечную аппаратуру, устанавливаемую на *оконечных пунктах* (ОП), промежуточную аппаратуру, размещаемую в *обслуживаемых* (ОУП) или *необслуживаемых* (НУП) *усилительных пунктах*, а также линий связи (рис. 2).

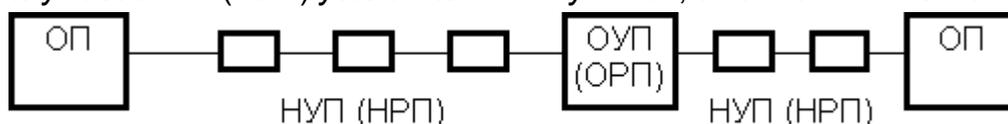


Рис. 2. Структурная схема построения систем передачи

В отличие от аналоговых систем во временных (цифровых) системах на обслуживаемых и необслуживаемых пунктах устанавливается аппаратура для восстановления (*регенерации*) импульсных сигналов линейного тракта. Отсюда обслуживаемые и необслуживаемые пункты в этих системах принято называть *регенерационными* (ОРП, НРП).

Поясним, для чего нужны усилительные и регенерационные пункты. Дальность передачи сигналов по физическим цепям (средам) определяется прежде всего *затуханием* (ослаблением) сигнала из-за того, что в цепи теряется часть энергии передаваемого сигнала. Конкретные электрические параметры цепи и чувствительность приемного устройства определяют допустимую

дальность связи. Например, при передаче речи мощность сигнала на выходе микрофона телефонного аппарата $P_{\text{пер}} = 1$ мВт, а чувствительность телефона приемного аппарата $P_{\text{пр}} = 0,001$ мВт. Таким образом, максимально допустимое

затухание цепи не должно быть больше $a_{\text{max}} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{пр}}} \right) = 10 \lg \left(\frac{1}{0,001} \right) = 30$

дБ. Зная затухание a_{max} и километрический коэффициент затухания α , можно определить дальности передачи $l = \frac{a_{\text{max}}}{\alpha}$.

В системах передачи применяется способ компенсации затухания сигналов повышением мощности сигнала в нескольких равномерно расположенных точках тракта. Часть канала связи между соседними промежуточными усилителями называется *усилительным участком*. Изменение уровней сигнала вдоль магистрали описывается *диаграммой уровней*, приведенной на [рис. 3](#).

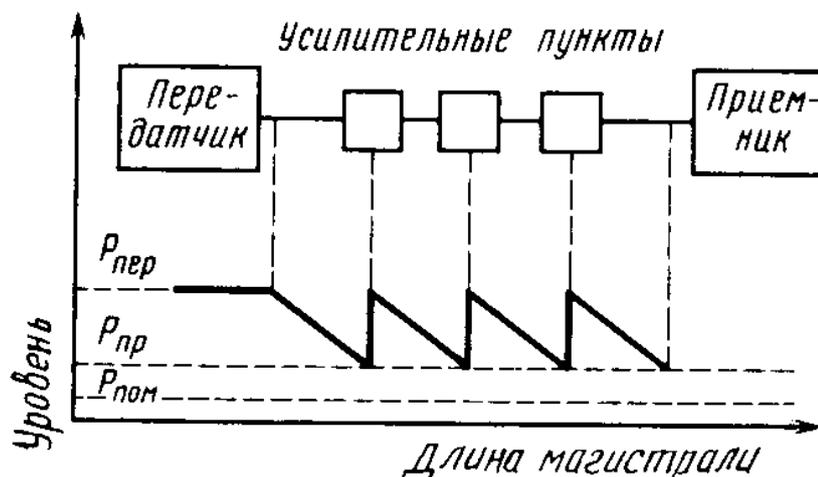


Рис. 3. Диаграмма уровней: $P_{\text{пер}}$, $P_{\text{пр}}$ — уровни сигнала на передаче и приеме; $P_{\text{пом}}$ — уровень помехи

Аппаратура обслуживаемых и необслуживаемых усилительных пунктов служит не только для усиления аналогового сигнала, но и для коррекции (выравнивания) амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик линейного тракта. Аппаратура обслуживаемых и необслуживаемых регенерационных пунктов предназначена для восстановления амплитуды, длительности и временного интервала между импульсами сигнала цифровых систем.

Расстояние между необслуживаемыми усилительными пунктами (необслуживаемыми регенерационными пунктами) меняется в широких пределах для различных систем передачи и может составлять от единиц до десятков (иногда сотни) километров. Как правило, необслуживаемые усилительные пункты (необслуживаемые регенерационные пункты) представляет собой металлическую камеру, имеющую подземную и наземную части. В камере размещаются вводно-коммутационное и усилительное (регенерационное) оборудование. Аппаратура конечных пунктов и обслуживаемых усилительных пунктов (обслуживаемых

регенерационных пунктов) размещается в зданиях, где постоянно находится технический персонал для ее обслуживания.

Лекция № 15 Телефонные сети

- 1) **Нумерация абонентских линий на телефонных сетях**
- 2) **Основы теории телефонного сообщения**
- 3) **Аппаратура передачи речи**
- 4) **Коммутационные приборы**
- 5) **Управляющие устройства автоматических телефонных станций**
- 6) **Телефонная сигнализация**

Телефонная связь, являясь наиболее доступным, удобным и массовым видом электросвязи, позволяет вести переговоры людям, находящимся друг от друга практически на любых расстояниях с помощью сравнительно простых и дешевых систем, реализующих этот вид связи. Именно поэтому современные телефонные сети значительно крупнее и разветвленнее сетей других видов электросвязи.

Сеть телефонной связи нашей страны — Общегосударственная автоматически коммутируемая телефонная сеть (ОАКТС) — является составной частью Взаимоувязанной сети связи страны и содержит десятки миллионов телефонных аппаратов. Объем сообщений, передаваемых по телефонным сетям, в несколько раз превышает суммарный объем сообщений, передаваемых по системам всех других видов связи.

1. Нумерация абонентских линий на телефонных сетях

Единая система нумерации обеспечивает возможность установления соединения между любыми двумя абонентами ОАКТС.

На ОАКТС принят *зоновый принцип нумерации*. Территория бывшего СССР разбита на 171 зону. Обычно территория зоны телефонной нумерации совпадает с территорией области (края и т. п.). Каждой зоне присвоен свой код (ABC). Например, код Москвы — 095, Санкт-Петербурга — 812. В пределах каждой зоны вводится единая 7-значная нумерация, причем каждой 100-тысячной группе номеров присвоен двузначный код (ab).

Для осуществления *междугородной телефонной связи* между абонентами разных зон вызывающий абонент должен набрать 10-значный номер вызываемого абонента: ABCabxxxxx. При установлении связи внутри зоны используется 7 цифр этого номера, которые называются *7-значным зоновым номером абонента*.

В качестве знака «а» не могут использоваться цифры 8 и 0 (8 — индекс выхода на междугородную сеть, 0 — на узел спецслужб с сокращенной нумерацией). Емкость зонной нумерации ограничивается 80 кодами ab, т. е. 80-ю 100-тысячными группами или 8 млн. абонентских номеров.

Для *городских телефонных сетей* (ГТС) в зависимости от их емкости и перспектив развития из общей зонной нумерации выделяется одна, две и более 100-тысячных групп. Для осуществления соединений в пределах ГТС устанавливается местная 5-, 6- или 7-значная нумерация.

Основной единицей емкости ГТС является АТС на 10 тысяч номеров, поэтому местный абонентский номер образуется из 4-значного номера в пределах

10-тысячной группы с добавлением станционного кода. Например, ахххх, аbхххх, аbсхххх.

В качестве знака «а» не могут использоваться цифры 0 или 8. Знаки «а» 6-значного и «аb» 7-значного местного номера должны совпадать с кодами 100-тысячных групп нумерации, выделенных для данной ГТС.

При наличии на ГТС учрежденческо-производственных телефонных станций (УПТС) для сокращенной нумерации в пределах УПТС из состава нумерации ближайшей (опорной) районной АТС (РАТС) выделяется группа номеров, кратная 100.

Для *сельских телефонных сетей* (СТС) в составе зонной нумерации выделяется *одна* 100-тысячная группа. На СТС применяется открытая (9 — цифра выхода на вышестоящую станцию) и закрытая нумерация.

Междугородный вызов абонента ГТС осуществляется следующим образом. Набор индекса выхода на междугородную сеть «8»; готовность АМТС («зуммер» или «длинный гудок»); набор 10-значного номера. Если вызываемая ГТС имеет 5- или 6-значную нумерацию, то местный номер вызываемого абонента дополняется до 7 цифрами «2».

Междугородный вызов абонента СТС. Установление соединения с абонентом СТС другой зоны. После кода зоны набирается 2-значный код сельского района и 5-значный абонентский номер. В справочниках коды зоны и сельского района объединяются. Например, код Санкт-Петербурга — 812, код Волховского района — 63, тогда код г. Волхова — 81263.

Установление соединения в пределах своей зоны. 8 — зуммер — направляющий индекс 2 (своя зона) — код 100-тысячной группы аb — 5-значный номер. В справочниках направляющий индекс 2 и код аb объединяют. Код СТС Пушкинского района — 53, код г. Пушкино 253. Тогда вызов абонента г. Пушкино 7-55-99 из Москвы осуществляется следующим образом: 8-(253)75599. Вызов того же абонента из Санкт-Петербурга: 8-(096)5375599.

2. Основы теории телефонного сообщения

Для теоретического исследования сетей используются теория вероятностей и математическая статистика, на основе которой создана теория массового обслуживания. Применительно к телефонной связи она получила название теории телефонного сообщения. Эта теория изучает процессы и закономерности прохождения сообщений по сети, определяет эффективность использования коммутационных систем и линий связи, а также вопросы качества обслуживания абонентов.

Важнейшими понятиями теории телефонного сообщения являются вызовы, нагрузка и потери.

Вызовом называется заявка (специальный сигнал) одного из абонентов на установление соединения, т. е. заявка на создание системы связи между абонентами. Понятие вызова распространяется и на сам процесс установления соединения.

Совокупность заявок, поступающих на станцию, называют потоком вызовов. Важным параметром потоков вызовов является интенсивность вызовов, под

которым понимается число вызовов, появившихся в единицу времени. Вызовы поступают неравномерно, т. е. интенсивность вызовов является величиной непостоянной.

Кроме знаний о характере и параметрах потоков вызовов для правильного построения коммутационных систем необходимо знать суммарное время обслуживания вызовов, поступающих в единицу времени, которое принято называть нагрузкой. Единица измерения нагрузки — часо-занятия.

Для подсчета нагрузки используется выражение:

$$Y = Nct,$$

где N — число источников нагрузки (например, число абонентов); c — число вызовов за час от одного источника; t — длительность обслуживания вызова.

Например, если на станцию за 1 ч поступают 100 вызовов, то для последовательного обслуживания всех вызовов со средней затратой времени на каждый вызов 0,1 ч (6 мин) потребуется суммарное время 10 ч. Столько времени будут заняты обслуживающие приборы.

Вызовы можно обслуживать не только последовательно, один за другим, но и параллельно, одновременно используя несколько приборов станции и соединительных линий.

Например, если в обслуживании тех же вызовов будут участвовать 10 приборов и 10 линий, то поступившие 100 вызовов будут обслужены за 1 час.

В случае параллельного обслуживания используют параметр интенсивность нагрузки. Интенсивность нагрузки измеряется в часо-занятиях, отнесенных к часу. Единица интенсивности нагрузки — Эрланг. Один Эрланг (Эрл) — эта такая интенсивность нагрузки, при которой в течении одного часа будет обслужена нагрузка в одно часо-занятие.

Интенсивность нагрузки подвержена резким колебаниям в течение суток. Для расчета необходимого числа оборудования коммутационной станции принято учитывать так называемый час наибольшей нагрузки (ЧНН) — непрерывные 60 мин в течение суток, когда наблюдается максимальная интенсивность нагрузки. На рис. 1 показан характер изменения интенсивности нагрузки в течение суток для станций, обслуживающих производственные районы (кривая 1) и жилой массив (кривая 2).

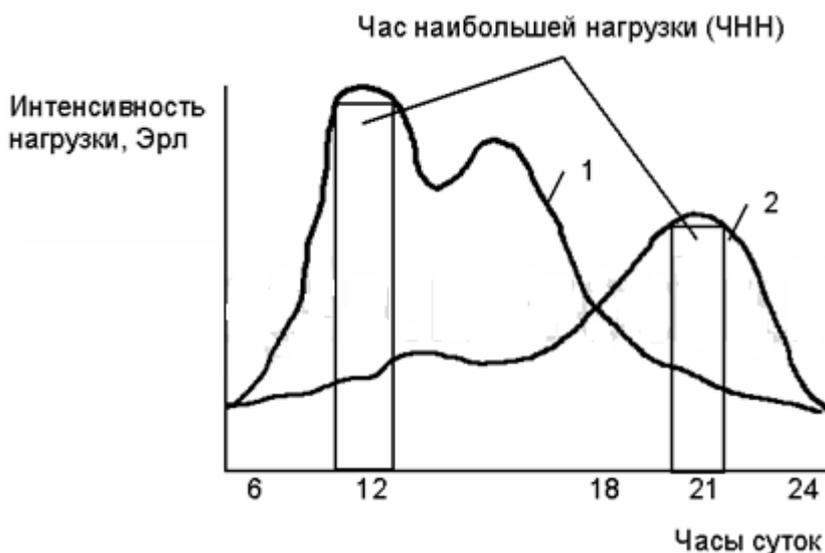


Рис. 1. Характер изменения интенсивности телефонной нагрузки в течение суток для станций, обслуживающих производственные предприятия (кривая 1) и жилой микрорайон (кривая 2)

На коммутационных станциях не все поступающие вызовы могут быть обслужены немедленно из-за отсутствия в нужный момент свободных исходящих линий. В этом случае абонент получает сигнал «Занято», необслуженный вызов называют потерянным, а сам факт необслуживания — отказом. Такие системы получили название системы коммутации с потерями.

Существуют так называемые системы коммутации с ожиданием, в которых при занятых исходящих линиях абонент не получает отказа, а ожидает освобождения одной из линий, после чего соединение будет установлено.

Число потерянных вызовов в единицу времени в системах с потерями и число одновременно ожидающих абонентов в системах с ожиданием характеризуют качество обслуживания.

3. Аппаратура передачи речи

В системе телефонной связи к аппаратуре передачи речи относятся электроакустические преобразователи и вспомогательные устройства. Электроакустические преобразователи осуществляют преобразование электрической энергии в звуковую и наоборот.

Телефон — осуществляет преобразование электрической энергии в звуковую, предназначен для работы в условиях нагрузки на ухо человека. Микрофон — преобразует звуковые колебания в электрические. Устройства, сочетающие функции телефона и микрофона, называют обратимыми. Устройства, требующие для своей работы источник питания, называют активными.

Принцип действия электромагнитного телефона основан на взаимодействии магнитных потоков, создаваемых постоянным магнитом (Φ_0) и электромагнитом (Φ_{\sim}). Под действием результирующего (суммарного) потока мембрана телефона совершает колебательные движение, совпадающее с изменениями электрического тока, поступающего в обмотку электромагнита.

Основными элементами телефона (рис. 2) являются: постоянный магнит, электромагнит, состоящий из двух обмоток с сердечниками, и мембрана.

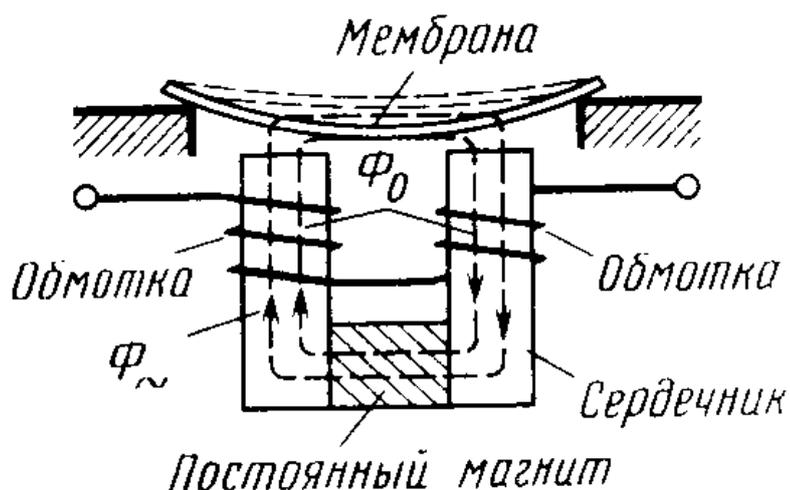


Рис. 2. Устройство электромагнитного телефона

В телефонных аппаратах применяются так называемые капсульные телефоны, размещаемые в микротелефонных трубках. Конструктивное исполнение их может быть различным.

В покое, т. е. при отсутствии тока в обмотках электромагнита, мембрана притянута к сердечникам под действием потока, создаваемого постоянным магнитом, имеет небольшой прогиб в сторону сердечников и неподвижна. Появление переменного электрического тока в обмотках электромагнита создает в сердечнике дополнительный переменный магнитный поток, имеющий направление совпадающее, либо противоположное направлению потока, создаваемого постоянным магнитом (рис. 3). В результате мембрана будет совершать колебательные движения, соответствующие изменению величины тока. Колебательные движения мембраны создают распространяющиеся колебательные движения частиц воздуха, воспринимающиеся ухом человека как звук.

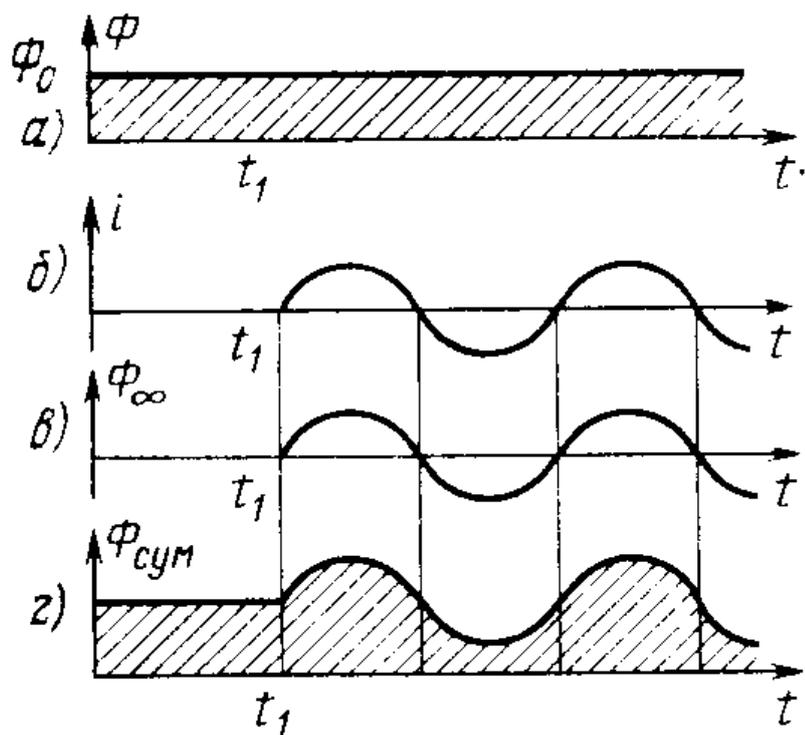


Рис. 3. Графики, поясняющие работу электромагнитного телефона: а — поток постоянного магнита; б — изменение тока в обмотках; в — изменение потока электромагнита; г — суммарный магнитный поток

Угольный микрофон — необратимый активный акустоэлектрический преобразователь. Принцип действия основан на свойстве угольного порошка изменять сопротивление электрическому току в зависимости от его плотности, изменяющейся под действием звуковых колебаний воздушной среды. Устройство угольного микрофона и схема его включения в электрическую цепь показаны на рис. 4. Основными элементами микрофона являются подвижный и неподвижный электроды, подключенные к электрической цепи, и угольный порошок, заполняющий пространство между электродами. Подвижный электрод жестко связан с мембраной, воспринимающей колебания окружающего слоя воздуха. Элементы микрофона помещены в общий корпус, изготовленный из токонепроводящего материала. Звуковые колебания воздуха приводят к соответствующим колебаниям мембраны. Вместе с мембраной колеблется, совершая горизонтальные движения, подвижный электрод, изменяющий плотность угольного порошка. При увеличении плотности порошка его сопротивление электрическому току уменьшается, а при уменьшении — увеличивается. Следовательно, ток в цепи будет изменяться прямо пропорционально изменению звукового давления (рис. 5).

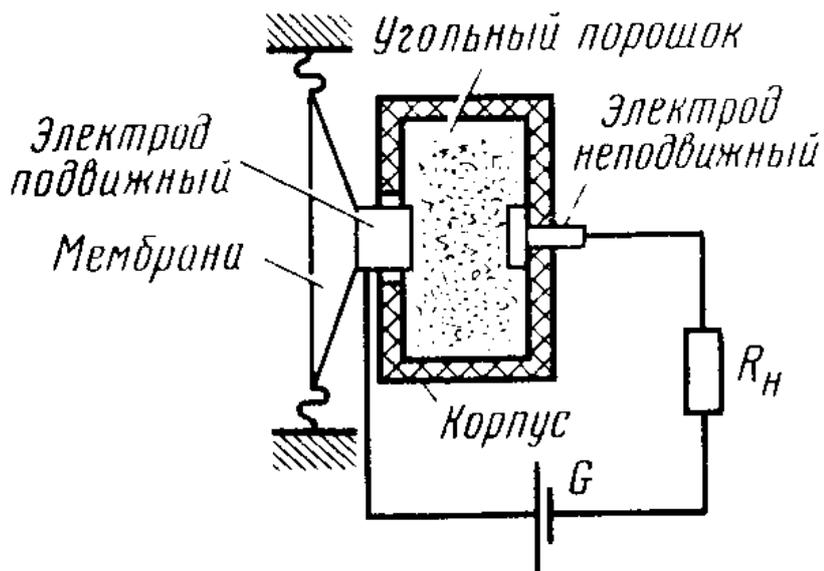


Рис. 4. Устройство и схема включения угольного микрофона

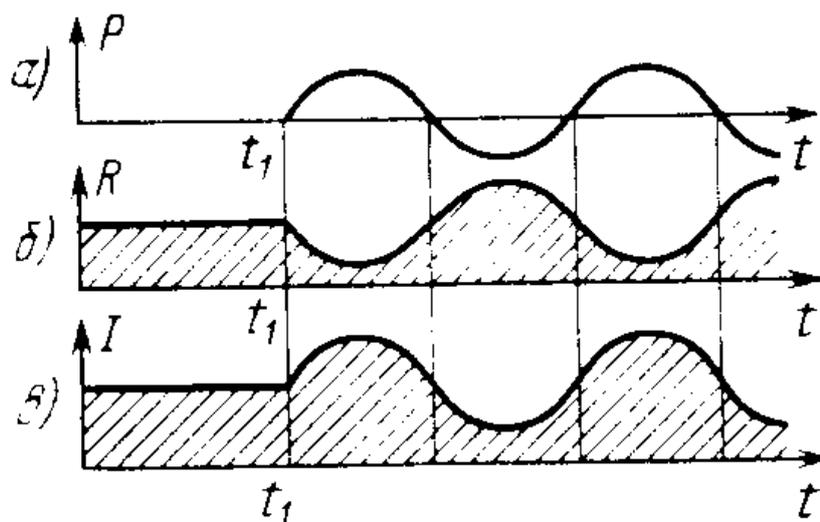


Рис. 5. Графики изменения звукового давления (а), сопротивления угольного порошка (б) и тока (в) в цепи

При отсутствии звуковых колебаний ($P = 0$) мембрана находится в состоянии покоя, сопротивление порошка не изменяется, а в цепи микрофона протекает неизменяющийся ток I . С появлением звуковых колебаний, т. е. началом изменения звукового давления (с момента t_1 , ток начинает изменяться по закону изменения давления).

К вспомогательным устройствам относятся вызывные приборы, предназначенные для приема сигналов вызова: звонок, зуммер и др. Вспомогательным, но обязательным является также устройство для передачи адресной информации, называемое номеронабирателем. Номеронабиратели бывают дисковые и тастатурные (кнопочные).

Все элементы аппаратуры передачи речи конструктивно объединяются в прибор, называемый телефонным аппаратом (ТА). Структурная схема ТА приведена на рис. 6.

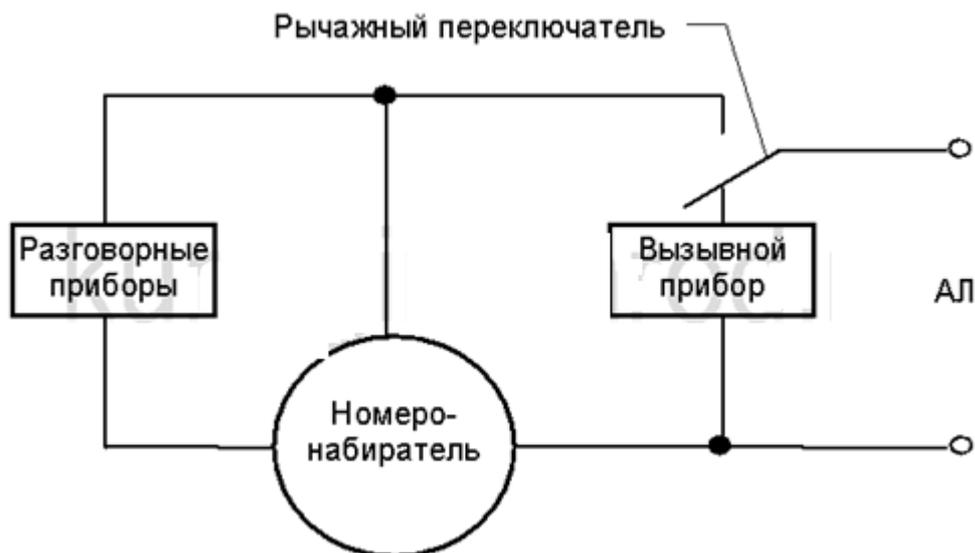


Рис. 6. Структурная схема телефонного аппарата

Когда микрофонная трубка ТА не снята, она нажимает на рычажный переключатель, удерживая его в нижнем положении, как показано на рис. 6. При этом к АЛ подключен вызывной прибор, который сработает при поступлении сигнала вызова. При снятии микрофонной трубки с ТА переключатель поднимается вверх и подключает к линии разговорные приборы и номеронабиратель, подготавливая ТА к ведению переговоров.

По способу электропитания разговорных и вспомогательных приборов различают ТА с местной батареей (МБ) и центральной батареей (ЦБ). ТА МБ оборудован батареей постоянного тока с напряжением 3 В. ТА ЦБ получает питание своей схемы по проводам АЛ от ЦБ, размещаемой на АТС. Напряжение ЦБ обычно составляет 24, 48 или, чаще всего, 60 В.

4. Коммутационные приборы

Для осуществления коммутации (соединения) линий (или каналов) и управления процессами установления соединения применяются коммутационные приборы.

Коммутационным прибором называется устройство, обеспечивающее замыкание, размыкание или переключение электрических цепей, подключенных к его входам и выходам, при поступлении в прибор управляющего сигнала. Замыкание, размыкание и переключение электрических цепей в коммутационном приборе осуществляется *коммутационным элементом* (КЭ), который в простейшем случае представляет собой один контакт на замыкание.

К коммутационному прибору могут подключаться линии с различной проводностью (двух-, трех- и т. д. проводные), поэтому их коммутация осуществляется несколькими КЭ, объединенными в *коммутационную группу*, коммутационные элементы которой переключаются одновременно под влиянием поступающего управляющего сигнала.

В коммутационном приборе в зависимости от его конструкции может быть установлено различное число коммутационных групп. Совокупность коммутационных групп называется *коммутационным полем прибора*. Местоположение коммутационной группы в коммутационном поле прибора (или в коммутационном блоке, построенном из нескольких приборов) называется *точкой коммутации*.

Коммутационные приборы различаются между собой структурными и электрическими параметрами, обусловленными их конструкцией.

К *структурным параметрам* относятся: число входов n , число выходов m , доступность D входов по отношению к выходам, проводность коммутируемых линий l , свойство памяти.

Производными от этих параметров являются общее число точек коммутации T , число коммутационных групп и число коммутационных элементов, а также максимальное число одновременных соединений.

К *электрическим параметрам* коммутационных приборов относятся:

— сопротивление коммутационного элемента в разомкнутом (закрытом) состоянии R_3 , и замкнутом (открытом) состоянии R_0 , отношение которых

называется коммутационным коэффициентом $k = \frac{R_3}{R_0}$;

— время переключения КЭ из одного состояния в другое;

— вносимое затухание в разговорный тракт;

— уровень шумов;

— напряжение питания;

— величина тока, необходимого для переключения КЭ;

— потребляемая мощность.

Коммутационные приборы характеризуются также *сроком службы* или *долговечностью*, под которыми понимается допустимое число переключений или допустимое время работы, и интенсивностью отказов (повреждений), т. е. вероятностью отказов в единицу времени.

Некоторые коммутационные приборы обладают *свойством памяти*, т. е. способностью сохранять рабочее состояние после прекращения управляющего воздействия. Это позволяет сократить расход электроэнергии для поддержания рабочего состояния прибора. Для возвращения прибора в исходное состояние требуется новое управляющее воздействие.

Используемые в настоящее время коммутационные приборы по структурным параметрам можно разделить на четыре типа.

1. Коммутационные приборы типа (1×1) , имеющие один вход и один выход. Число входов и выходов прибора указывается в круглых скобках, где первая цифра — число входов n , а вторая — число выходов m . Прибор имеет два состояния, в одном из которых соединение между входом и выходом отсутствует, а в другом — соединение установлено. Переход коммутационного элемента (или коммутационной группы) из одного состояния в другое осуществляется под воздействием сигнала, поступающего на управляющий вход из устройства управления.

2. Коммутационные приборы типа $(1 \times m)$, имеющие один вход $n=1$ и m выходов. В приборе можно установить соединение входа с любым из m выходов, следовательно, доступность прибора $D=m$. Одновременно в приборе может быть установлено только одно соединение.

3. Коммутационные приборы типа $n(1 \times m)$, имеющие n входов и nm выходов. Каждому входу из n доступно только m определенных выходов, следовательно, доступность прибора $D=m$ из общего числа выходов nm . В приборе одновременно может быть установлено n соединений.

4. Коммутационные приборы типа $(>n \times m)$, имеющие n входов и m выходов. Каждому из n входов доступен любой из m выходов, следовательно, $D=m$. В приборе одновременно может быть установлено n соединений, если $n \leq m$ или m соединений, если $n > m$.

Широко распространенным прибором является электромагнитное реле. Электромагнитное реле — это прибор типа (1×1) . В телефонной технике применяются в основном электромагнитные реле постоянного тока с открытыми и герметизированными контактами.

Реле с открытыми контактами (рис. 7, а) состоит из обмотки с сердечником, якоря с пружиной и контактов, укрепленных на плоских пружинных пластинах. При отсутствии тока в обмотке якорь под действием пружины оттянут от сердечника и контакты разомкнуты. При появлении тока в обмотке якорь притягивается к сердечнику и, поворачиваясь на оси, вторым плечом нажимает на контактную пластину, замыкая контакты.

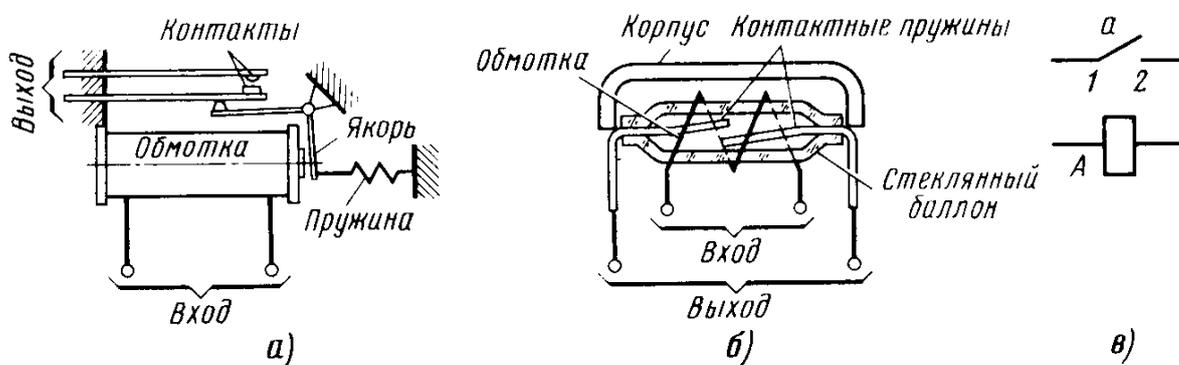


Рис. 7. Электромагнитные реле: а — с открытыми контактами; б — с герметизированными контактами

Реле с герметизированными контактами (герконы) имеют контактные пружины, полностью изолированные от окружающей среды, так как помещены в заполненный инертным газом стеклянный баллон (рис. 7, б). Геркон помещается внутри обмотки и корпуса, выполненного из магнитного материала. При отсутствии тока в обмотке контактные пластины под действием сил упругости отходят друг от друга, размыкая выходную цепь. При появлении тока в обмотке образуется магнитный поток, притягивающий к друг другу контактные пластины.

Основными достоинствами герконовых реле являются: быстродействие, хорошее качество контактов и малые габариты.

В коммутационной технике широко применялись и находятся в эксплуатации в настоящее время *электромеханические искатели* — коммутационные приборы типа $(1 \times m)$ со свойством памяти.

В состав электромеханических искателей обычно входят:

— контактное поле (статор — неподвижный узел), состоящее из изолированных ламелей, к которым подключаются выходы m ;

Ламели — это раскроенные заготовки продольной формы толщиной 3—10 мм и минимальной шириной 25 мм.

— ротор со щетками, последовательно перемещающийся между ламелями. К щеткам подключается коммутируемая линия (вход);

— привод, обеспечивающий движение ротора.

Искатели классифицируют:

— по принципу действия привода (шаговые и моторные с индивидуальным приводом, машинные с общим приводом);

— по количеству и виду движений ротора (вращательные, подъемно-вращательные);

— по структуре контактного поля (декадное и недекадное).

На [рис. 8](#) приведены устройство шагового (ШИ) и декадно-шагового искателей (ДШИ).

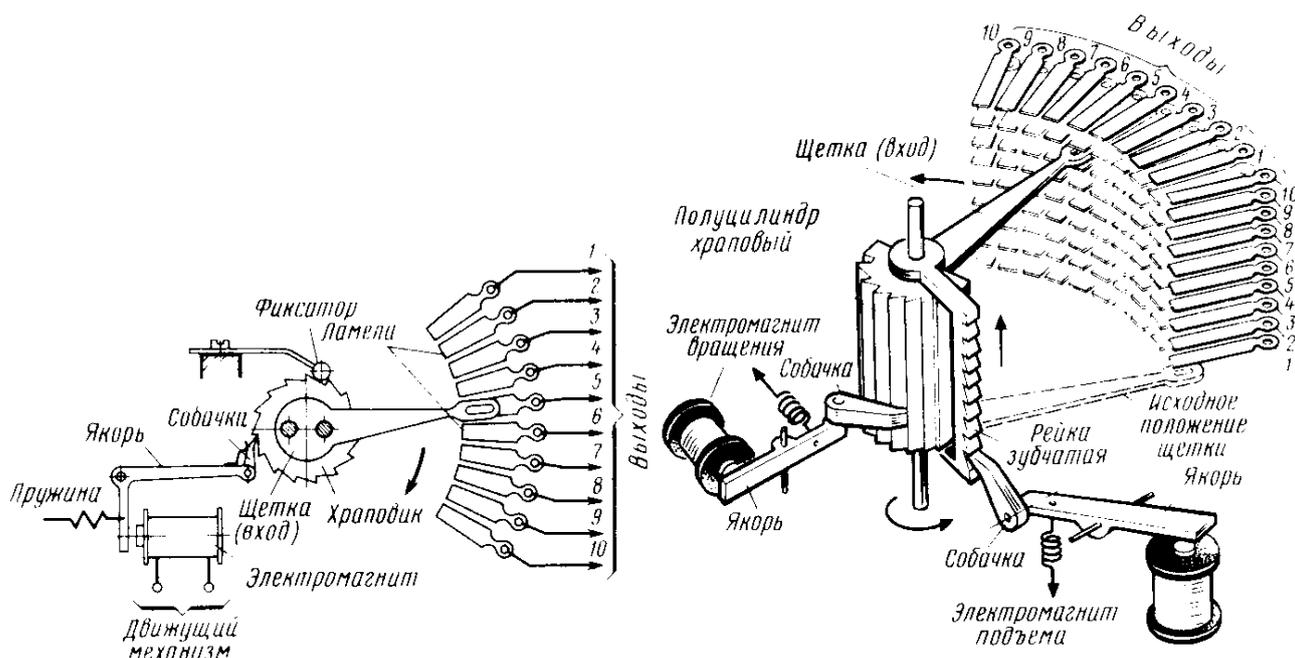


Рис. 8. Устройство шагового и декадно-шагового искателей

Широкое применение в современных АТС имеют коммутационные приборы, называемые *многократными координатными соединителями* (МКС). МКС представляет собой многопозиционный электромагнитный коммутационный прибор типа $n(1 \times m)$. Коммутационными элементами МКС являются металлические контакты релейного типа, выполненные из благородных металлов. Принцип работы МКС основан на принципе координатной сетки ([рис. 9](#)). К вертикальным шинам сетки подключаются входы, а к горизонтальным — выходы, и в местах пересечения шин создаются коммутационные точки, позволяющие соединить вход с любым выходом.

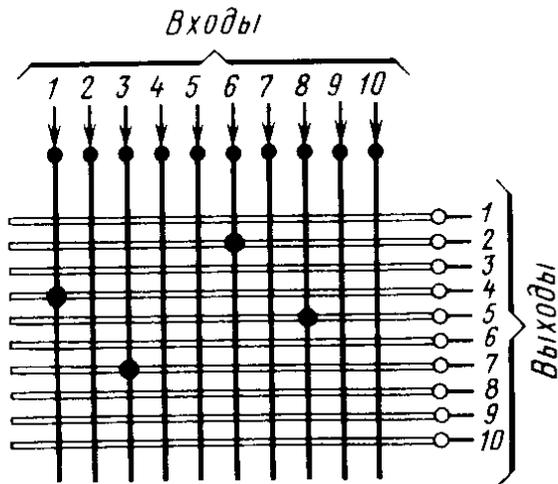


Рис. 9. Принцип устройства и работы МКС

Конструктивно МКС представляет собой коллективное реле с большим числом контактных пружин (рис. 10). Основными элементами его являются *вертикальные блоки*, или просто *вертикали*. Каждая вертикаль содержит контактные струны (шины) и m групп контактных пружин, составляющих контактное поле вертикали (рис. 11). Состояние контактов в группах вертикали обусловлено работой двух электромагнитов с рейками: удерживающего УЭ с рейкой УР и выбирающего ВЭ с рейкой ВР (см. рис. 10). Каждая вертикаль имеет свой УЭ, а число ВЭ равно числу контактных групп m .

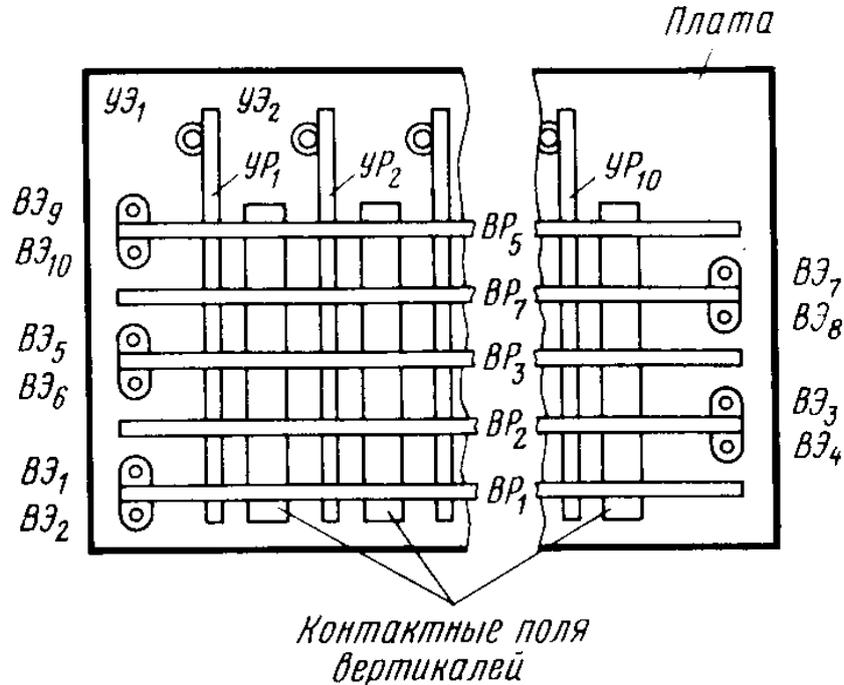


Рис. 10. Размещение элементов на плате МКС

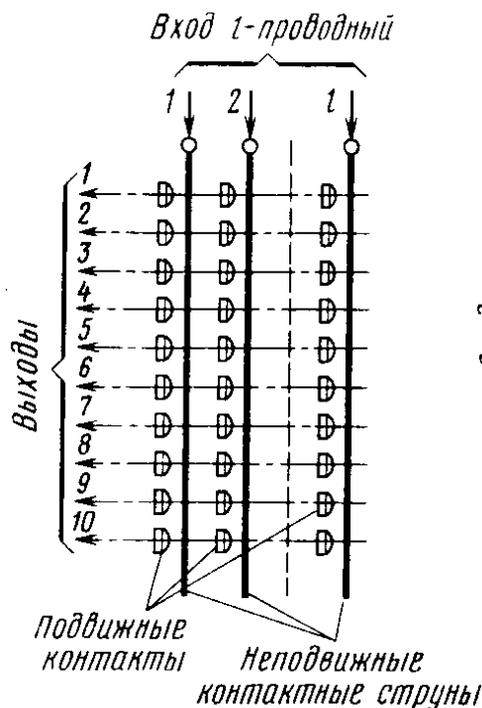


Рис. 11. Схема контактного поля вертикали

Многokrатные соединители характеризуются малым временем установления соединения, высокой надежностью, унифицированностью конструкции.

Все рассмотренные выше коммутационные приборы реализуют принцип *пространственной коммутации*, когда точки коммутации разнесены в пространстве.

Электронная (бесконтактная) коммутация в современных электронных АТС осуществляется на основе принципа *временной коммутации*, заключающегося в следующем. Аналоговые (телефонные) сигналы преобразуются в цифровые, в результате чего образуются цифровые потоки, аналогичные потокам цифровых систем передачи. Коммутация осуществляется изменением номера канального интервала для данного сигнала.. На выходе станции производится обратное преобразование цифровых сигналов в аналоговые.

Автоматические телефонные станции могут быть реализованы на различных коммутационных приборах. Станции, реализованные на шаговых и декадно-шаговых искателях, называются *декадно-шаговыми*. Станции, реализованные на МКС, называются *координатными*. Станции, использующие герконовые коммутационные приборы, называются *квазиэлектронными* (почти электронными), а использующие электронные приборы — *электронными*. В историческом плане вначале появились АТС декадно-шаговые, затем координатные, потом квазиэлектронные и последними электронные.

5. Управляющие устройства автоматических телефонных станций

Процесс коммутации состоит из нескольких этапов, выполняемых в определенной последовательности. На каждой ступени происходит электрическое соединение определенных входящих и исходящих линий коммутационных приборов. Для выполнения этой операции предварительно необходимо

определить (найти): входящую линию, по которой поступил вызов, нужную исходящую линию и убедиться, свободна ли последняя. Все эти операции осуществляются управляющими устройствами АТС.

Управляющее устройство (УУ) управляет процессом установления соединения на коммутационном узле путем взаимодействия с приборами коммутационного поля, линейными и станционными комплектами.

Основными функциями УУ являются:

- прием сигналов управления от ЛК, СК и приборов КП;
- распределение принятых сигналов по функциональным блокам УУ;
- определение состояния коммутационных приборов и линий;
- выбор соединительного пути между входом и выходом КП;
- включение коммутационных приборов, соответствующих выбранному пути;
- выдача команд на посылку абонентам акустических сигналов.

УУ могут быть индивидуальными и общими (групповыми). В первом случае каждое УУ обслуживает один коммутационный прибор и занимается на время установления соединения и ведения переговоров между абонентами. Во втором случае каждое УУ обслуживает в определенной последовательности группу коммутационных приборов. Такие УУ занимают только на время установления соединения.

В зависимости от способа использования сигналов, несущих адресную информацию, различают УУ с непосредственным и регистровым (косвенным) управлением. Непосредственное управление применяется на АТС с индивидуальными УУ. В таких устройствах импульсы набора номера, посылаемые абонентами, непосредственно используются для работы коммутационных приборов. Процесс коммутации осуществляется одновременно с набором номера вызываемого абонента. Если АТС имеет несколько ступеней искания, то УУ разных ступеней работают последовательно по мере набора цифр номера.

При косвенном управлении импульсы набора номера запоминаются регистром. Проанализировав полученные импульсы, регистр формирует и передает сигналы на УУ всех ступеней искания, которые обеспечивают срабатывание коммутационных приборов. В результате будет установлено соединение. После этого регистр освобождается и может быть использован для обслуживания других вызовов. Косвенное управление может применяться как в индивидуальных, так и групповых УУ.

При регистровом управлении процесс приема импульсов набора номера вызываемого абонента и процесс установления соединений на ступенях искания разделены во времени. Регистр и управляющие устройства обслуживают вызовы с момента их появления до установления соединения. Чем меньше это время, т. е. чем выше быстродействие элементов управляющих устройств, тем большее число коммутационных приборов может быть обслужено.

Наибольшим быстродействием обладают УУ, реализованные на электронных элементах. Электронные УУ способны обслуживать сразу группу коммутационных приборов или даже всю коммутационную систему АТС. В последнем случае УУ станции состоит из периферийных управляющих устройств ПУУ и электронной управляющей машины ЭУМ (рис. 12). ПУУ предназначены для приема импульсов

набора номера, определения состояний абонентских и соединительных линий и т. п. Вся эта информация из ПУУ передается в ЭУМ для анализа и выработки команд. Команды возвращаются на ПУУ и используются для управления работой коммутационных приборов.

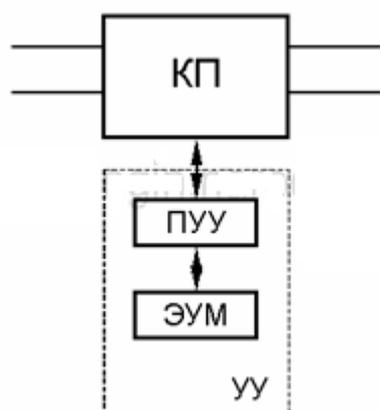


Рис. 12. Функциональная схема АТС с электронным управляющим устройством

Применение электронных УУ и ЭУМ не только многократно ускоряет процесс коммутации, но и значительно расширяет возможности станции, повышает эффективность использования станционных и линейных сооружений, делает сеть более гибкой и обеспечивает предоставление абонентам новых высококачественных услуг. Кроме того, ЭУМ позволяют автоматизировать учет переговоров, контроль за состоянием элементов станции, выявление неисправностей, сбор и обработку различных статистических данных и др. Электронные УУ используются в квазиэлектронных и электронных АТС.

6. Телефонная сигнализация

Совокупность электрических сигналов, используемых на сети для управления установлением соединения, называется *системой телефонной сигнализации*.

В систему телефонной сигнализации обычно входят следующие виды сигналов.

Линейные сигналы отмечают основные этапы установления соединения (занятие, отбой, разъединение и др.).

Сигналы управления передаются между УУ коммутационных узлов и станций и между УУ и ТА абонента. Основные сигналы управления — сигналы наборы номера, так называемая *адресная информация*. В ряде систем также передаются сигналы о категории вызова, запроса аппаратуры автоматического определения номера (АОН) вызывающего абонента при междугородной связи, виде устанавливаемых соединений, способе передачи управляющей информации и т. д.

Информационные акустические сигналы передаются от АТС к ТА и служат для информирования абонента о состоянии устанавливаемого соединения. К ним относятся:

- Ответ станции;
- Занято;
- Посылка вызова;

— Контроль посылки вызова.

В АТС с электронными УУ может передаваться сигнал предупреждения о междугородном вызове.

Состав сигналов системы сигнализации зависит от типа используемого коммутационного оборудования, типа используемых систем передачи, структуры сети и т. п.

Различают следующие основные типы систем сигнализации:

— системы абонентской сигнализации, которые определяют порядок обмена сигналами между абонентской установкой (телефонным аппаратом, факсом и т. п.) и АТС;

— системы межстанционной сигнализации, которые определяют порядок обмена сигналами между станциями. Для местных, внутрizonовых, междугородных и международных сетей используются различные системы межстанционной сигнализации.

Системы абонентской сигнализации. Как известно, оконечные абонентские установки телефонии (телефонные аппараты — ТА) подключаются к АТС с помощью двухпроводной абонентской линии. Отдельных проводов для целей сигнализации не предусматривается по экономическим соображениям. АЛ используется для передачи и речевых сигналов и сигнализации.

В настоящее время широко применяется передача *линейных сигналов* от абонента шлейфным методом (loop-start). Основные сигналы (занятие, ответ, отбой) формируются путем изменения сопротивления АЛ постоянному току.

Передача *адресной информации* (номера вызываемого абонента) может осуществляться двумя способами:

1. С помощью *дискового номеронабирателя* путем замыкания и размыкания шлейфа на короткое время (так называемый *шлейфовый* или *импульсный способ набора* — «pulse»). Количество циклов замыканий и размыканий соответствует передаваемой цифре плюс один стартовый цикл. Длительность одного цикла составляет 100 мс: 60 мс АЛ находится в замкнутом состоянии и 40 мс в разомкнутом.

Данный способ прост в технической реализации и широко распространен. Однако он является медленным и неудобным при необходимости набора номера значительной длительности (например, междугородного или международного).

2. Второй способ получил название *многочастотного* или *тонального набора* («tone») и применяется в ТА с тастатурными номеронабирателями. Передача каждой цифры осуществляется за 40 мс с помощью многочастотного кода «2 из 7», т. е. передаче одной цифры соответствует одновременная передача двух гармонических сигналов определенных частот ([табл. 1](#)). Этот код обеспечивает 16 комбинаций сигнальных частот, 10 из которых используются для набора номера. Межсерийная пауза составляет также 40 мс. В зарубежных источниках данный код обозначается как DTMF — Dual Tone Multi Frequency.

Таблица 1

		Частоты второй группы, Гц		
Частоты первой группы, Гц		1209	1336	1477
	697	1	2	3
	770	4	5	6
	852	7	8	9
	941	*	0	#

Клавиши * и # используются для дополнительных услуг. Возможность посылки тональных сигналов абонентом используется для построения систем с удаленным управлением и речевым ответом типа речевой почты и т. п.

Типичный порядок обмена сигналами системы абонентской сигнализации показан на [рис. 13, а](#).

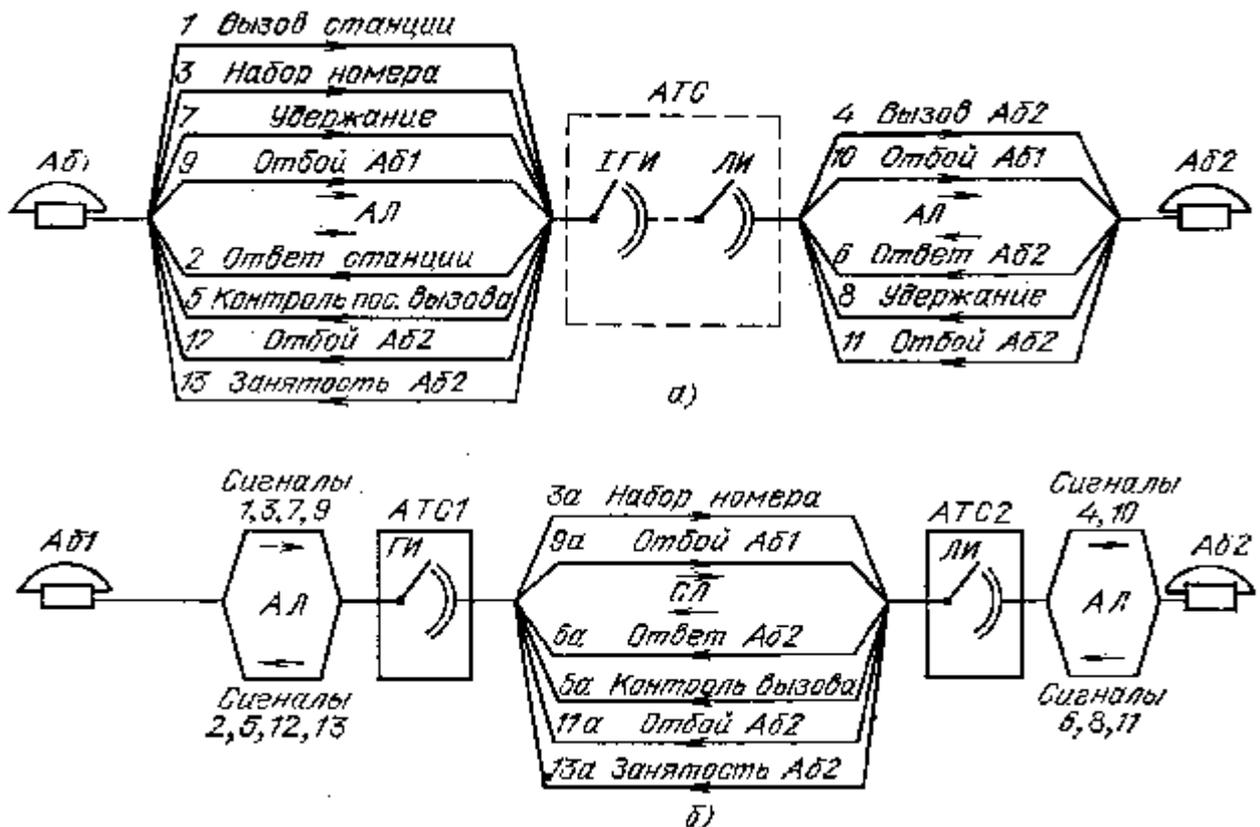


Рис. 13. Типичный порядок обмена сигналами систем абонентской (а) и межстанционной (б) сигнализации

Системы межстанционной сигнализации. В системах межстанционной телефонной сигнализации применяются следующие основные способы передачи линейных сигналов:

— по физическим двухпроводным цепям (в том числе АЛ) шлейфным методом (loop-start). Для взаимодействия АТС и учрежденческих АТС (УАТС) также применяются методы с заземлением (ground-start) и E&M (от англ. Ear (ухо) и mouth (рот)). Метод E&M использует отдельную пару проводов для передачи линейных сигналов;

— частотный метод по выделенному сигнальному каналу вне полосы частот канала ТЧ на частоте 3825 Гц при использовании аналоговых систем передачи с частотным разделением каналов;

— способом наложения по выделенному сигнальному каналу при использовании ЦСП.

Допускается применение батарейного способа по двух- и трехпроводным физическим цепям. На сельских телефонных сетях допускается индуктивный способ.

Для передачи сигналов управления применяются разные реализации многочастотного способа (Multi Frequency — MF). В основном используется код «2 из 7». В современных системах используются различные, но достаточно близкие номиналы частот в полосе канала ТЧ. Международные системы сигнализации R1 и R2 используют частоты с интервалом 120 Гц в диапазоне 1380—1980 Гц в прямом и 540—1140 Гц в обратном направлении (MF—R1 и MF—R2). Широко применяемая на ОАКТС система сигнализации использует частоты в диапазоне 700—1700 Гц с шагом 200 Гц.

Типичный порядок обмена сигналами систем межстанционной сигнализации при установлении телефонного соединения показан на рис. 13, б.

Все рассмотренные выше системы сигнализации исторически возникли первыми и относятся к классу так называемых внутриканальных (in-band), поскольку вся сигнализация осуществляется по тому же каналу, по которому ведется передача информации пользователя.

В результате развития систем коммутации появился класс систем сигнализации по общему каналу сигнализации (ОКС), непосредственно связывающему управляющие устройства АТС. Первая система подобного класса — система сигнализации № 6 МСЭ-Т предназначалась для передачи всех видов управляющей информации по каналам ТЧ аналоговых систем передачи на скоростях 2,4—4,8 кбит/с. Система обладала хорошими эксплуатационными параметрами и получила широкое распространение в Европе, Японии и особенно в США, где она эксплуатируется до сих пор.

Появление и быстрое внедрение ЦСП предопределило появление системы сигнализации № 7 МСЭ-Т (SS7), ориентированной на применение в цифровых сетях. Один канал SS7 со скоростью 64 кбит/с позволяет передавать сигнальную информацию для пучка из одной-двух тысяч (!) каналов ТЧ.

По существу SS7 образует сеть передачи данных — сеть сигнализации, при этом все сигналы собираются в пакеты и снабжаются заголовком, устанавливающим принадлежность каждого из сигналов определенному каналу ТЧ.

Принцип работы телефонных аппаратов с автоматическим определением номера вызывающего абонента. Появившиеся в конце 80-ых

годов телефонные аппараты, выполненные на основе недорогих микропроцессорных комплектов (Intel 8080, 8085, Z80 и т. п.), быстро завоевали популярность у абонентов благодаря предоставлению услуги автоматического определения номера вызывающего абонента.

Для уяснения принципа действия таких аппаратов рассмотрим подробнее процесс обмена сигналами при установлении междугородного (международного) соединения на ОАКТС.

Как известно, оплата междугородного (международного) разговора ведется по принципу учета продолжительности разговора, и оплату осуществляет вызывающий абонент. Для определения номера вызывающего абонента (с целью последующего учета длительности разговора и начисления стоимости) городские АТС и автоматические междугородные телефонные станции АМТС оборудуются соответствующей аппаратурой. Собственно аппаратура автоматического определения номера (АОН) устанавливается на городских АТС.

При установлении междугородного (международного) соединения (рис. 14) вызывающий абонент городской АТС набирает код выхода на междугородную сеть «8», в результате чего устанавливается соединение между АТС и АМТС по соединительной линии СЛ. АМТС посылает АТС сигнал запроса номера вызывающего абонента. АТС с помощью аппаратуры АОН определяет номер абонентской линии, требующей установления междугородного соединения, и многочастотным кодом «2 из 6» передает АМТС ее номер. АМТС оборудована приемниками данного кода и фиксирует его. При необходимости (в случае обнаружения ошибок) АМТС может повторить запрос (до трех раз). В случае успешной фиксации номера вызывающего абонента, ему передается сигнал готовности АМТС («длинный гудок») и абонент набирает необходимый код страны, города и номер вызываемого абонента. После установления соединения (ответа вызываемого абонента) включается счетчик продолжительности разговора.

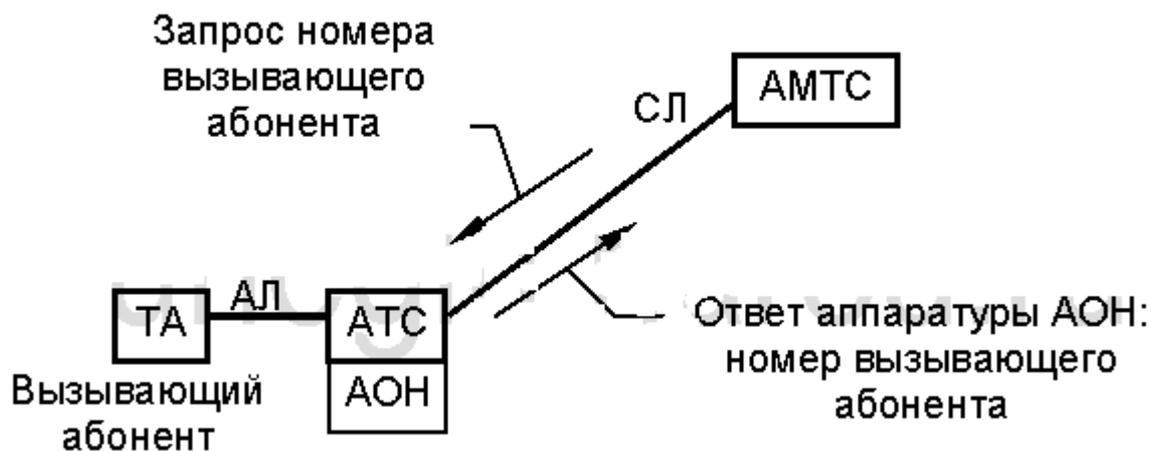


Рис. 14. Обмен сигналами между АТС и АМТС при установлении междугородного соединения

Рассмотрим процесс обмена сигналами при наличии у одного из абонентов телефонного аппарата с автоматическим определением номера вызывающего абонента (рис. 15). Пусть вызывающий абонент (назовем его А) имеет обычный

телефонный аппарат, а вызываемый абонент (назовем его Б) имеет телефонный аппарат с автоматическим определением номера вызывающего абонента.

При поступлении вызова от абонента А телефонный аппарат абонента Б посылает запрос аппаратуре АОН, расположенной на АТС абонента А. АТС абонента А считает, что данный запрос поступил от АМТС, и обрабатывает его обычным образом, выдавая в СЛ, с которой поступил запрос, номер вызывающего абонента многочастотным кодом. ТА абонента Б оборудован приемником многочастотного кода «2 из 6». Принятый код преобразуется в обычные десятичные цифры, которые отображаются на дисплее аппарата абонента Б в виде номера абонента А.

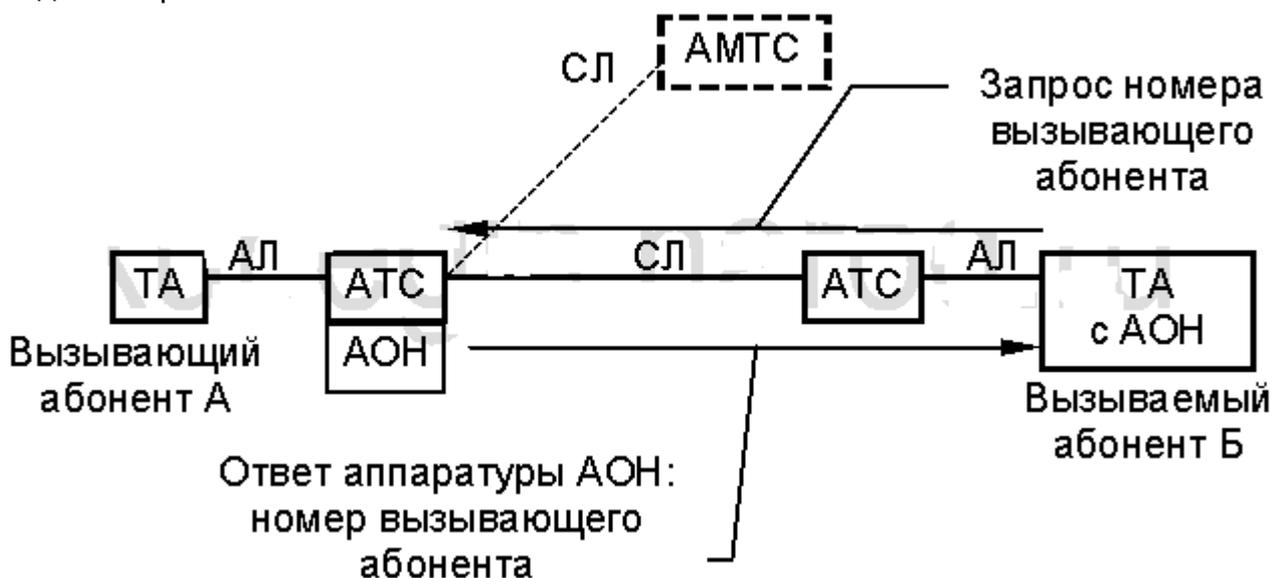


Рис. 15. Обмен сигналами при наличии у вызываемого абонента телефонного аппарата с автоматическим определением номера вызывающего абонента

Обычно процесс определения номера вызывающего абонента протекает достаточно быстро (от долей до единиц секунд).

Из принципа действия аппаратов с автоматическим определением номера вызывающего абонента ясно, что может быть определен номер только того вызывающего абонента, АТС которого оборудована аппаратурой АОН. На Московской городской телефонной сети (МГТС) практически все автоматические телефонные станции оборудованы аппаратурой АОН.

Широкое распространение телефонных аппаратов с автоматическим определением номера вызывающего абонента нежелательно. Это объясняется тем, что аппаратура АОН АТС была рассчитана на обслуживание относительно малой нагрузки междугородных (международных) вызовов. Резкое возрастание нагрузки на данную аппаратуру при обслуживании внутригородских вызовов может привести к отказам в предоставлении междугородного разговора ввиду занятости аппаратуры АОН.

Надежность определения номера в значительной мере зависит от качества реализации приемника многочастотного кода (что не всегда достижимо ввиду малой производительности дешевых микропроцессоров), а также от качества соединительных и абонентских линий.

Лекция № 16 Модемы. Факсы

- 1) Применение телефонных сетей для передачи данных
 - 2) Классификация модемов
 - 3) Режимы работы модема
 - 4) Устройство модемов
 - 4.1 Состав модема для аналоговых телефонных каналов
 - 4.2 Устройство цифрового модема
1. Устойчивость работы модемов
 2. Факсимиле (факс). Принцип работы факсимильного аппарата

1. Применение телефонных сетей для передачи данных

Устройством, обеспечивающим возможность передачи данных посредством телефонных сетей, в том числе и через ОАКТС, является модем. При необходимости передачи данных на телефонной сети устанавливается обычное соединение, а затем осуществляется собственно передача данных посредством модемов.

Основным параметром модема является обеспечиваемая скорость передачи данных. Ограниченность эффективно пропускаемой полосы частот (ЭППЧ) канала ТЧ (3100 Гц) является основной преградой в использовании телефонной сети для высокоскоростной передачи данных. Скорость передачи информации по каналу с ЭППЧ не может превосходить ее ширины, т. е. 3100 бод в случае канала ТЧ. Но как же тогда быть с модемами, передающими информацию со скоростями 14400, 28800 бит/с и даже больше? Ответ напрашивается сам: бод и бит/с не одно и то же.

Модуляция состоит в изменении одного из параметров (амплитуды, частоты или фазы) несущей или совместно нескольких параметров в зависимости от значений информационных бит.

На временной диаграмме несущего сигнала можно выделить равные по длительности отрезки времени, на которых несущий сигнал имеет определенные постоянные значения своих параметров. Эти отрезки времени называют бодовыми интервалами. Число бодовых интервалов в единицу времени определяет модуляционную скорость (еще ее называют линейной или бодовой). Модуляционная скорость измеряется в бодах.

Если кодируемый элемент соответствует одному биту информации (0 или 1), то на бодовом интервале параметры сигнала соответственно могут принимать одну из двух определенных совокупностей значений амплитуды, частоты и фазы. В этом случае модуляционная скорость равна информационной, т. е. 1 бод = 1 бит/с. Кодируемый элемент может соответствовать не одному, а, например, двум битам информации. В этом случае информационная скорость будет вдвое превосходить бодовую, а параметры сигнала на бодовом интервале могут принимать одну из четырех совокупностей значений, соответствующих 00, 01, 10 или 11.

Если на бодовом интервале кодируется N бит, то информационная скорость будет превосходить бодовую в N раз. Количество возможных состояний сигнала

в трехмерном пространстве — амплитуда, частота, фаза — будет равно 2^N . Это значит, что демодулятор модема, получив на бодовом интервале некий сигнал, должен будет сравнить его с 2^N эталонными сигналами и безошибочно выбрать один из них для декодирования искомым N бит. С увеличением емкости кодирования и ростом информационной скорости относительно бодовой, расстояние в сигнальном пространстве между двумя соседними точками сокращается в степенной прогрессии. А это, в свою очередь, накладывает все более жесткие требования к качеству канала. Теоретически возможная скорость в реальном канале определяется формулой Шеннона:

$$C = F \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right),$$

где F — ширина полосы пропускания канала; $\frac{P_S}{P_N}$ — отношение мощности сигнала к мощности шума.

Второй сомножитель определяет возможности канала с точки зрения его зашумленности по достоверной передаче сигнала, несущего не один бит информации в бодовом интервале. Так, например, если отношение сигнал/шум соответствует 20 дБ, т. е. мощность сигнала, доходящего до удаленного модема, в 100 раз превосходит мощность шума, и используется полная полоса канала тональной частоты (3100 Гц), максимальная граница по Шеннону равна 20640 бит/с.

Проблема организации одновременной двусторонней связи (дуплекс) заключается в возможности демодулятора модема распознать входной сигнал на фоне отраженного собственного выходного сигнала, который фактически становится для модема шумом. При этом его мощность может быть не только сравнима, но в большинстве случаев значительно превосходить мощность принимаемого полезного сигнала.

Одним из способов обеспечения двусторонней связи является метод ЧРК. Вся полоса пропускания канала разделяется на два частотных подканала, по каждому из которых производится передача в одном направлении. Выбор подканала передачи осуществляется на этапе установки соединения и, как правило, однозначно связан с ролью модема в сеансе связи: вызывающий или отвечающий.

Очевидно, что этот метод не позволяет использовать возможности канала в полном объеме ввиду значительного сужения полосы пропускания. Для исключения взаимного влияния направлений передачи вводится значительный защитный интервал, в результате чего частотные подканалы становятся меньше половины полной полосы канала. Данный метод обеспечения дуплексной связи ограничивает скорость передачи информации. Существующие протоколы физического уровня, использующие ЧРК, обеспечивают симметричную дуплексную связь со скоростями, не превышающими 2400 бит/с.

Ряд протоколов обеспечивают и более скоростную связь, но в одном направлении, в то время как обратный канал — значительно медленнее. Разделение частот в этом случае осуществляется на неравные по ширине полосы пропускания подканалы. Эта разновидность дуплексной связи называется асимметричной.

Другим методом обеспечения симметричного дуплекса, который используется во всех высокоскоростных протоколах, является технология эхоподавления (эхокомпенсации). Суть ее заключается в том, что модемы, обладая информацией о собственном выходном сигнале, могут использовать это знание для фильтрации «собственного» шума (эхосигнала) из принимаемого сигнала. На этапе вхождения в связь каждый модем, посылая зондирующий сигнал, определяет параметры эхосигнала: количество отражений, время запаздывания и мощность каждого отраженного сигнала и пр. В процессе сеанса связи эхокомпенсатор модема вычитает из принимаемого входного сигнала свой собственный выходной сигнал, скорректированный в соответствии с полученными параметрами эхосигнала.

Эта технология позволяет использовать для дуплексной передачи информации всю ширину полосы пропускания канала, однако требует при реализации значительных вычислительных ресурсов на сигнальную обработку.

Наконец, стоит отметить, что многие протоколы и не пытаются обеспечить дуплексную связь. Это так называемые полудуплексные протоколы. В частности, все протоколы, предназначенные для факсимильной связи — полудуплексные. В этом случае в каждый момент времени информация передается только в одну сторону. По окончании приема/передачи некоторой порции информации оба модема (факса) синхронно переключают направление передачи данных. Ввиду отсутствия проблем с взаимным проникновением подканалов передачи, а также с эхо, полудуплексные протоколы в общем случае характеризуются большей помехоустойчивостью и возможностью использования всей ширины полосы пропускания канала.

Однако, в этом случае эффективность использования канала для передачи данных по сравнению с дуплексными протоколами ниже. Связано это прежде всего с тем, что практически все протоколы передачи данных, как канального уровня (MNP, V.42), так и уровня передачи файлов (X, Y, Zmodem, не говоря уже о протоколах типа BiDirectional), требуют двустороннего обмена, по крайней мере для подтверждения принятой информации. А любое переключение направления передачи, помимо невозможности в данный момент передавать очередную порцию пользовательской информации, требует дополнительных накладных расходов по времени на взаимную пересинхронизацию приемной и передающей сторон.

2. Классификация модемов

Потребности связи между удаленными компьютерами привели к использованию существующей телефонной сети для передачи данных. Телефонные линии были разработаны, чтобы передавать аналоговую голосовую информацию, в то время как компьютеры и их устройства работают в цифровой

форме. Следовательно, чтобы использовать аналоговую среду, необходим преобразователь между двумя системами. Этот преобразователь — МОДЕМ, который выполняет МОДуляцию и ДЕМОдуляцию переданных данных.

При передаче модем принимает последовательность двоичных данных из устройства, модулирует один или несколько параметров аналогового сигнала (амплитуду, частоту или фазу) и посылает сигнал в аналоговую среду. При приеме модем демодулирует принятый аналоговый сигнал и передает цифровые данные в компьютер или устройство.

Организации по стандартизации используют аббревиатуры АПД (DCE) для обозначения модема и ООД (DTE) для обозначения ЭВМ, терминала или любого другого устройства, подключенного к модему.

Модемы можно классифицировать:

- по типу используемой линии (коммутируемые телефонные каналы, выделенные телефонные каналы, линии с гальванической связью);
- по методу синхронизации данных (синхронные и асинхронные);
- по режиму работы (полудуплекс, дуплекс, симплекс);
- по виду модуляции (амплитудная, частотная, фазовая и их комбинации);
- по скорости передачи, бит/с;
- по конструктивному исполнению (внешние, внутренние).

Модемы с коммутируемым каналом связи могут устанавливать двухточечные соединения через телефонные станции. Качество соединения не гарантируется.

Выделенные каналы служат для использования «арендованной линии». Используются или два модема (в простом двухточечном соединении) или несколько (на многоточечной сети). Гарантируются амплитудные, фазово-частотные и шумовые характеристики канала, причем качество выше и стабильнее, чем для коммутируемых линий.

В линиях с гальванической связью между абонентами имеется физическое соединение. В настоящее время сравнительно мало используемый вариант. Телефонные станции обычно готовы предоставлять такую дорогостоящую услугу в пределах одной станции. Такие линии организуются в виде специальной прокладки кабелей и оборудуются высокоскоростными модемами (от сотен Кбит/с до первых Мбит/с).

Симплексный режим используется, когда передача данных должна осуществляться только в одном направлении, например в системах контроля, в которых информация с датчиков передается в управляющий компьютер через регулярные промежутки времени.

Полудуплексный применяется, когда два взаимодействующих объекта обмениваются информацией поочередно, т. е. канал используется поочередно для передачи данных в обоих направлениях. В таком режиме каждый объект должен иметь возможность переключаться от состояния передачи к состоянию приема.

Дуплексный используется для обмена данными между двумя взаимодействующими объектами в обоих направлениях одновременно.

3. Режимы работы модема

Модем может работать в двух режимах: командном режиме и режиме передачи данных. В командном режиме модем интерпретирует данные, полученные с интерфейса (от компьютера), как «команды», и посылает обратно результаты действия как ответ. В режиме передачи данных модем модулирует данные, полученные с интерфейса (от компьютера), для передачи их в линию и, наоборот, посылает демодулированные данные на интерфейс как полученные данные.

Командный режим модема устанавливается:

- при включении питания;
- при первоначальной инициализации модема;
- после неудачной попытки соединения с удаленным модемом;
- при прерывании с клавиатуры нажатием комбинации клавиш «положить трубку»;
- при выходе из режима передачи данных через ESCAPE-последовательность (ручная смена режима).

В командном режиме модем воспринимает AT-команды, используемые для управления модемом. Название этого набора объясняется тем, что каждая командная строка имеет префикс AT (от слова Attention — внимание). Все команды современных модемов можно классифицировать.

Префикс AT не ставится только перед командой A/ и Escape-последовательностью (+++). Команда A/ означает повторение последней команды. Escape-последовательность используется для переключения модема в командный режим из режима передачи данных.

На рис. 1 представлена структура команд модемов.

При выполнении команды модем посылает компьютеру ответ (табл. 1).



Рис. 1. Структура команд модемов

Таблица 1
 Ответы модемов

Отклик модема	Описание
<i>BUSY</i>	Занято
<i>OK</i>	Выполнение команды
<i>ERROR</i>	Ошибка
<i>NO CARRIER</i>	Пропала несущая или соединение не установлено
<i>NO DIALTONE</i>	Нет длинного гудка
<i>CONNECT</i>	Соединение установлено

Режим передачи данных (on-line) устанавливается после посылки модемом сообщения CONNECT в случаях:

- при удавшейся попытке установления связи с удаленным модемом;
- при выполнении модемом самотестирования.

4. Устройство модемов

Модем состоит из следующих блоков (рис. 2):

- канального и компьютерного интерфейсов;
- универсального, сигнального и модемного процессоров;
- постоянного (ПЗУ), постоянного перепрограммируемого (ППЗУ), оперативного (ОЗУ) запоминающих устройств и схемы индикаторов состояния модема.

Порт интерфейса компьютера обеспечивает взаимодействие с компьютером.

Порт канального интерфейса обеспечивает согласование электрических параметров с используемым каналом связи. Канал может быть аналоговым или цифровым.

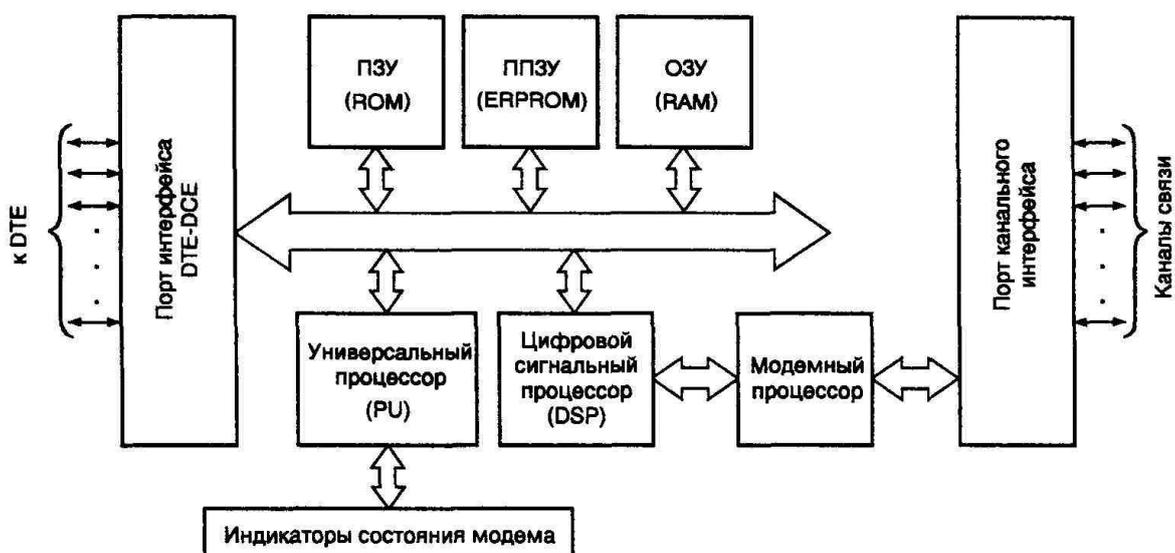


Рис. 2. Устройство модемов

Универсальный процессор выполняет функции управления взаимодействием с компьютером и схемами индикации состояния модема. Он выполняет посылаемые компьютером АТ-команды и управляет режимами работы остальных частей модема. Также универсальный процессор реализует операции компрессии/декомпрессии передаваемых данных.

Интеллектуальные возможности модема определяются в основном типом используемого универсального процессора и микропрограммой управления модемом, хранящейся в ПЗУ.

Схема ППЗУ позволяет сохранять установки модема в профилях модема.

Память ОЗУ используется для временного хранения данных и выполнения промежуточных вычислений универсальным и цифровым сигнальным процессорами.

Сигнальный процессор реализует основные функции протоколов модуляции (кодирование, скремблирование и т. д.), за исключением операций модуляции/демодуляции, которые выполняются модемным процессором.

4.1 Состав модема для аналоговых телефонных каналов

Большинство современных модемов для телефонных каналов обеспечивают синхронную передачу данных по каналу.

При синхронном режиме передачи старт-стопные биты между каждой парой байт отсутствуют, и весь блок или кадр данных передается как одна цепочка битов без каких-либо задержек между 8-битными элементами (рис. 3). Чтобы приемник обеспечивал различные уровни синхронизации, необходимо выполнение следующих требований:

- передаваемая цепочка битов должна быть закодирована так, чтобы приемник мог осуществлять побитовую синхронизацию. Для обеспечения побитовой синхронизации используют самосинхронизирующиеся коды;

- каждому кадру должен предшествовать один или более зарезервированных байтов или символов, благодаря чему приемник может надежно разделить полученную цепочку битов по границам байтов или символов (побайтная или посимвольная синхронизация);

- содержимое каждого кадра обрамляется парой зарезервированных байтов или символов.

Благодаря, последнему требованию приемник оповещается о поступлении кадра данных и об окончании кадра.

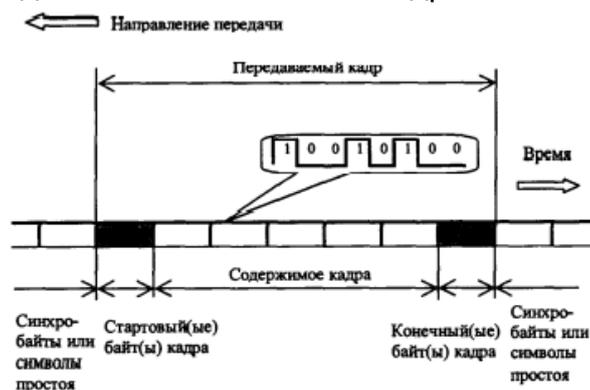


Рис. 3. Синхронный режим передачи данных

Синхронный модем содержит приемник, передатчик, компенсатор электрического эха, схему управления (рис. 4).

Схема управления исполняется в виде микропроцессора универсального назначения, и предназначена для обеспечения связи с компьютером и управления работой приемника, передатчика и эхо-компенсатора.



Рис. 4. Схема синхронного модема

Эхо-компенсатор предназначен для ослабления вредного влияния помехи в виде электрического эха (собственного отраженного сигнала) на прием сигнала от удаленного модема.

Передаваемые компьютером данные поступают в передатчик модема, который выполняет операции скремблирования, кодирования, синхронизации. Схема передатчика приведена на рис. 5.



Рис. 5. Схема передатчика синхронного модема

Схема синхронизации передатчика получает сигнал опорной частоты от внутреннего генератора или получает его от DTE.

Скремблер предназначен для придания свойств случайности передаваемой последовательности данных с целью облегчения выделения тактовой частоты приемником удаленного модема.

Приемник синхронного модема содержит демодулятор, декодер, дескремблер и схему синхронизации (рис. 6).



Рис. 6. Схема приемника синхронного модема

Декодер и дескремблер выполняют операции, обратные выполняемым в передатчике.

Схема синхронизации выделяет тактовую частоту из принимаемого сигнала и подает его на узлы приемника.

4.2 Устройство цифрового модема

По выполняемым функциям цифровые модемы похожи на модемы для аналоговых каналов связи. В качестве примера цифрового модема рассмотрим устройство CSU/DSU (Channel Service Unit/Data Service Unit) (рис. 7).

Модули обслуживания канала CSU обеспечивают согласование с используемым цифровым каналом и частотную коррекцию линии. На CSU устанавливаются световые индикаторы, сигнализирующие об обрыве местных линий, потери связи со станцией, а также о работе в режиме проверки.

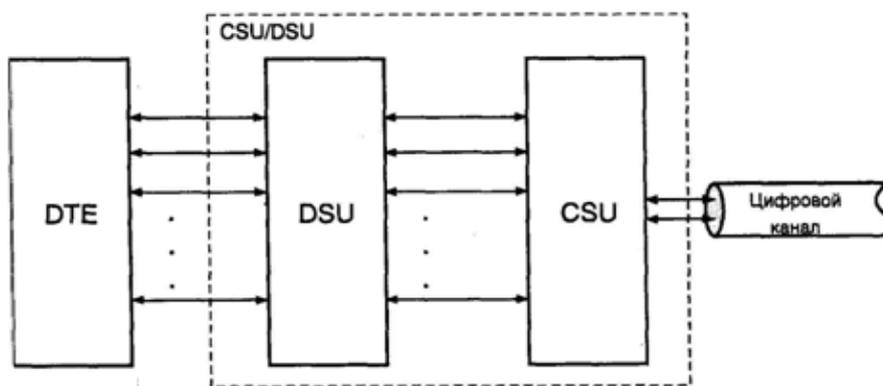


Рис. 7. Схема устройства CSU/DSU

Модули обслуживания данных DSU включаются в цепь между CSU и компьютером. Основной задачей DSU является приведение потока цифровых данных, поступающих от компьютера в соответствие со стандартом, принятым для данной цифровой линии.

В CSU/DSU могут встраиваться схемы сжатия передаваемых данных и функции защиты от ошибок.

5. Устойчивость работы модемов

Выделяют факторы, влияющие на устойчивость работы модемов по каналам тональной частоты:

— наличие импульсных помех на уровне 3—10 дБ выше уровня принимаемого сигнала является одной из причин частых «зависаний» модема;

— перерывы связи длительностью около 1 мс объясняют факты срывов сеансов;

— модемы плохо переносят скачки фазы и амплитуды, превышающие пороговые значения 10—20 градусов и 2—6 дБ. Последствием таких скачков может быть пересогласование параметров либо зависание модема.

При использовании протяженных линий связи возникают эхо отражения передаваемого и принимаемого сигналов (рис. 8).

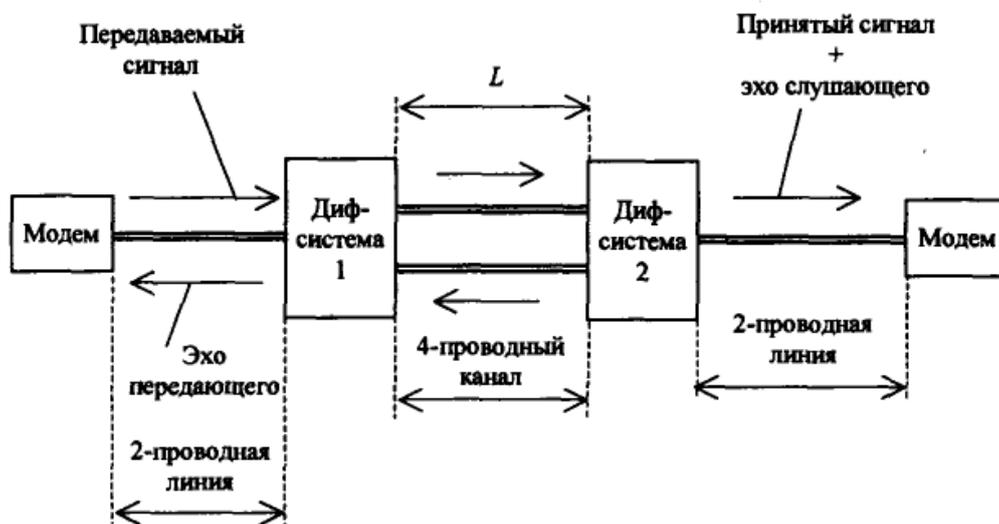


Рис. 8. Возникновение эхо-сигналов

Эхо-сигнал передающего образуется при отражении сигнала передающей стороны от удаленной системы разделения направлений передачи (дифсистема 2). Задержка T , мс, прямо пропорциональна удвоенной длине канала L , км и обратно пропорциональна скорости распространения сигнала C , км/мс:

$$T = \frac{2L}{C}$$

Эхо-сигнал слушающего образуется при двойном отражении — сигнал передающей стороны отражается от удаленной разделительной системы (дифсистема 2), возвращается обратно, отражается от ближней разделительной системы (дифсистема 1) и, поступая на вход принимающей стороны, складывается с переданным сигналом. Задержка эхо-сигнала слушающего относительно основного переданного сигнала определяется той же формулой.

Так при использовании спутниковых каналов (при высоте геостационарной орбиты спутника $L = 36000$ км) задержки эхо передающего (говорящего) и принимающего (слушающего) составят:

$$T_{\Gamma} = T_C = \frac{2 \cdot 36000}{300} = 240 \text{ мс.}$$

Места возникновения эха условно подразделяются на «ближнее» эхо (влияние собственной дифсистемы) и «дальнее» эхо (воздействие удаленной дифсистемы).

Теоретически технология ИКМ модемов способна обеспечить скорость 64 кбит/с (передачу за каждую секунду 8000 символов по 8 бит в каждом

($8000 \cdot 8 = 64000$)), однако на практике такого быстродействия добиться невозможно по двум причинам:

1. В некоторых системах уплотнения используются 8-битные АЦП/ЦАП, что при передаче сигнала, кодированного 256 уровнями (8 бит) ($2^8 = 256$), приводит к появлению шума в последнем бите. Существует аппаратура уплотнения, в которой применяются АЦП/ЦАП большей разрядности, но используются только 8 старших бит. Это позволило избежать появления шума в младшем бите.

2. Из-за того, что при разговоре по телефонной линии сигнал значительно меняет амплитуду (можно говорить шепотом, а можно кричать), для корректной передачи тихих звуков на входе аппаратуры уплотнения применяют нелинейное преобразование, а на выходе — обратное ему, что вызывает дополнительные шумы из-за неточности преобразований.

В результате этого было принято решение не использовать младший бит для передачи данных. Из-за этого теоретически возможная скорость соединения снизилась до $7 \cdot 8 = 56$ кбит/с.

На самом деле и эта скорость практически не достижима, так как при работе на скорости 56 кбит/с мощность сигнала от модема провайдера превышает стандарты для телефонных линий. Из-за снижения мощности сигнала до допустимых пределов максимальная скорость соединения снизилась до 53 кбит/с.

6. Факсимиле (факс). Принцип работы факсимильного аппарата

Факсимиле (факс) является средством передачи текста и рисунков сигналами, распространяющимися по проводам или радиоканалам.

Передающий факсимильный аппарат содержит (рис. 9):

— анализирующую систему, служащую для преобразования изображения оригинала в видеосигнал;

— модулятор, предназначенный для преобразования видеосигнала в форму, удобную для передачи по каналу связи.

Анализирующая система включает:

— светооптическое устройство, формирующее узкий световой пучок, который образует на поверхности оригинала «точечное» световое пятно;

— развертывающее устройство, которое направляет световой пучок поочередно (в заданной последовательности) на все элементарные площадки, в результате чего от поверхности отражается световой поток, модулированный по интенсивности с отражающей способностью площадок;

— фотоэлектрический преобразователь, преобразующий отраженный световой поток в пропорциональный ему электрический ток (видеосигнал).

Приемный факсимильный аппарат содержит:

— демодулятор преобразующий принимаемые модулированные колебания;

— синтезирующую систему, формирующую копию передаваемого изображения. Она состоит из развертывающего и записывающего устройства.

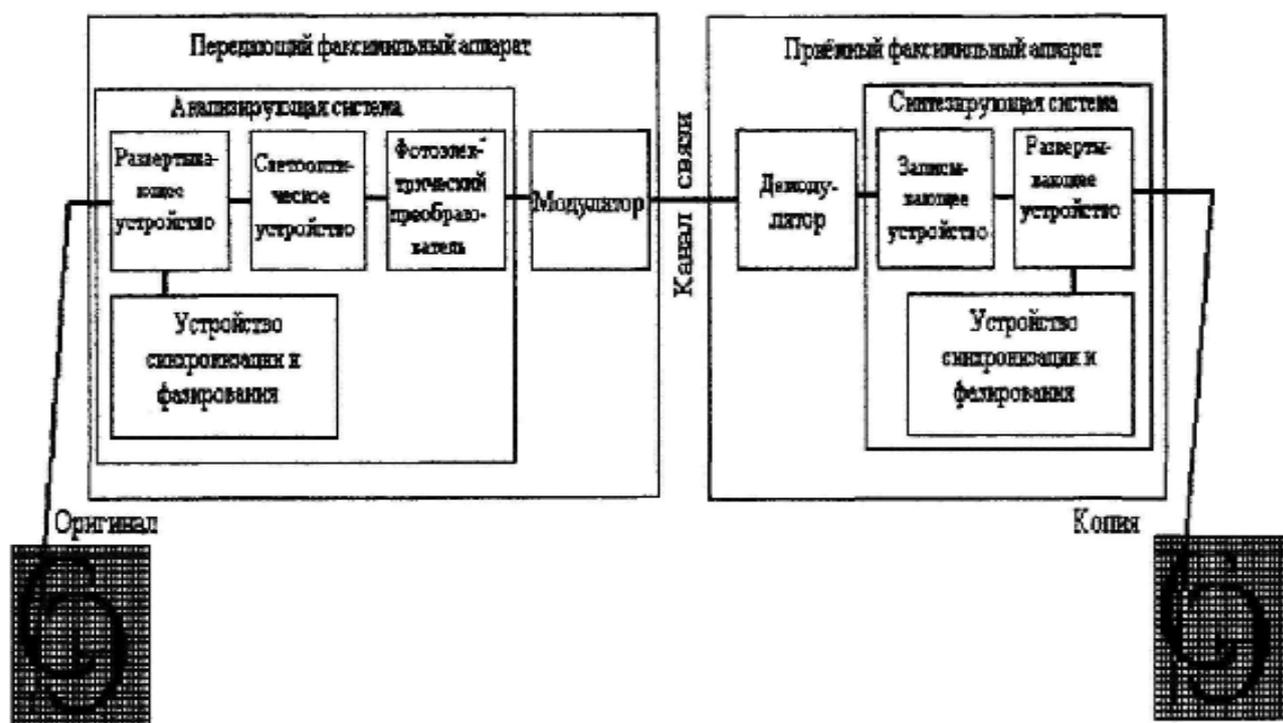


Рис. 9. Структурная схема передачи и приема факсимильной информации

На передающем аппарате происходит считывание информации, ее кодировка и отправка, на принимающем — прием, декодировка и вывод. Считывание информации происходит по-линейно. Высоким значением считается 200 линий на дюйм (1 дюйм = 25 мм), низким — 100 линий (при 100 линиях получается 4 линии на 1 мм).

В передающей части факсимильного аппарата световой луч просматривает (сканирует) неподвижное изображение и образует на светочувствительном приемнике его электрическую копию (рис. 10).

Каждой точке (ячейке) изображения оригинала соответствует электрический сигнал. В процессе считывания он превращается в последовательность «0» и «1». Цифровые комбинации преобразуются далее в аналоговые сигналы.

На приемной стороне процесс происходит в обратном порядке. Аналоговые сигналы демодулируются и преобразуются в оцифрованное изображение.

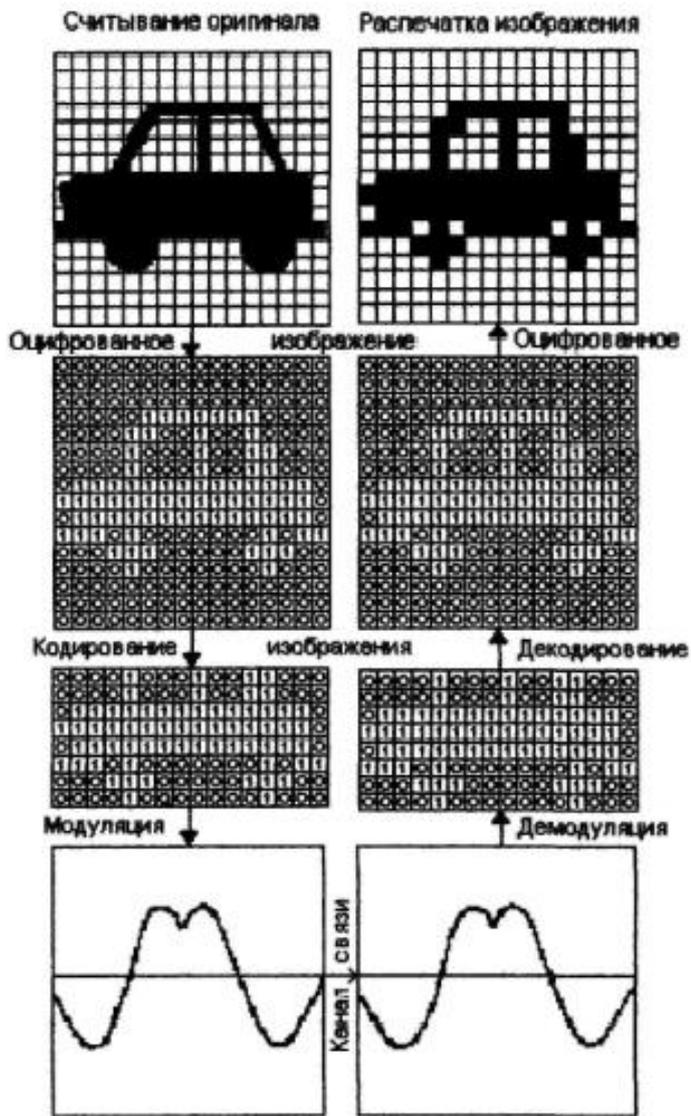


Рис. 10. Процесс факсимильной передачи и приема

Лекции № 17 Телематические службы. Телевизионные системы. Сеть Internet

- 1. Телематические службы**
- 2. Телевизионные системы**
- 3. Сеть Internet**
 - 3.1 Подключение к Internet. Протоколы TCP/IP**
 - 3.2 Система имен (адресов) в Internet**
 - 3.3 Прокси-сервер**
 - 3.4 Электронная почта. Телеконференции**
 - 3.5 Обеспечение безопасности электронных платежей через сеть Internet**
 - 3.6 IP-телефония**

1. Телематические службы

Появление телематических служб явилось результатом взаимопроникновения новых технологий вычислительной техники и средств связи.

По определению МСЭ-Т: телематические службы — службы электросвязи (кроме телефонной, телеграфной и служб передачи данных), которые организуются с целью обмена информацией через сети электросвязи.

Первая телематическая служба Телетекс появилась в начале 80-х годов. Телетекс — буквенно-цифровая система передачи деловой корреспонденции, предназначенная для обслуживания учреждений и предприятий. Эта система несколько напоминает систему Телекс (абонентский телеграф (АТ)), но отличается от нее сохранением формы текста, значительно большим набором знаков, большей скоростью передачи, высокой достоверностью (одна ошибка на 400 страниц печатного текста), возможностью редактировать подготавливаемую к передаче документацию. Принципиальное преимущество Телетекса перед Телексом — отсутствие необходимости дважды работать на клавиатуре — при подготовке письма и при его передаче; это достигается благодаря тому, что подготовленный текст запоминается ОЗУ абонентского терминала, откуда сообщение автоматически передается по сети связи.

Абонентский терминал Телетекса состоит из персональной ЭВМ (ПЭВМ), модема, работающего по телефонной сети со скоростью 1200—2400 бит/с, и специального программного обеспечения. Некоторые типы терминалов Телетекса предназначены для работы по сетям данных с коммутацией пакетов.

Для расширения услуг службы Телетекс и улучшения ее технико-экономических показателей на телефонной сети устанавливают специализированные ЭВМ-конверторы, память которых разделена на отдельные участки — боксы. Сообщения, направляемые абоненту службы Телетекс по присвоенному ему адресу, могут быть приняты в бокс конвертора, а затем запрошены абонентом в удобное для него время.

Конверторы позволяют также взаимодействовать абонентам служб Телетекс и Телекс. Непосредственное взаимодействие абонентских установок Телетекса и Телекса невозможно из-за различий в знаках, скоростях, кодах и методах

передачи, системах сигнализации и пр. Наличие на сети конверторов позволяет использовать для обмена письмами имеющиеся в организациях и на предприятиях персональные ЭВМ, присоединяя их через модем к телефонной сети только на время передачи и получения писем.

Телефакс — факсимильная служба общего пользования, предназначенная для передачи сообщений между абонентскими факсимильными аппаратами.

Факсимильная служба группы 1 осуществляет аналоговую передачу без сжатия данных и передачу факсимильных сообщений по ОАКТС. Страница текста передается примерно за 10 мин. Факсимильная служба группы 2 имеет ограниченные возможности сжатия данных, страница текста передается по ОАКТС за 3 мин. Факсимильная служба группы 3 позволяет передавать сигналы в цифровой форме с реализацией алгоритма сжатия данных. Страница текста передается по ОАКТС за время, меньшее 1 мин. Факсимильная служба группы 4 также предусматривает передачу сигналов в цифровой форме и сложный алгоритм сжатия данных. Информация может передаваться по цифровой сети (например, ISDN), причем страница текста — менее чем за 1 с.

Терминалы факсимильных служб автоматически выполняют следующие функции:

- установление соединений;
- передачу, прием и регистрацию сообщений;
- идентификацию правильности установления соединения;
- проставление оттиска штампа на оригинале и копии документа;
- регистрацию служебной информации на контрольной ленте (операционный журнал);
- накопление в запоминающем устройстве некоторого объема передаваемых и принятых сообщений.

Бюрофакс — служба общего пользования для передачи документов между факсимильными аппаратами, расположенными в отделениях связи, в которые клиенты сдают подлежащие передаче оригиналы. Доставка клиентам сообщений, принятых по службе Бюрофакс в отделениях связи, осуществляется так же, как телеграмм.

Телерукопись — служба передачи графической информации, которая отображается на приемном конце согласно движениям «пера», пишущего на передающем конце. Сообщения, которые могут представлять собой рукописный текст, рисунки, чертежи и т. п., наносятся отправителем на бумагу, лежащую на специальном планшете. На приемном конце сообщения воспроизводятся на бумаге или чаще всего — на экране дисплея. Во многих случаях телерукопись дополняет телефонную службу. При этом письменные сообщения передаются по телефонному каналу со скоростью 300 бит/с. Эта служба представляет особенно большой интерес для глухих и немых пользователей.

Видеотекс — информационно-справочная служба, дающая возможность пользователям с помощью оконечных терминалов и стандартных процедур доступа получать информацию из банков данных (БД) по сетям электросвязи. Служба Видеотекс предоставляет следующие услуги:

— информационный поиск — получение абонентами информации путем диалога с банком данных;

— транзакция — ввод или модификация абонентами информации, хранящейся в БД; для пользования этой услугой требуется выполнять специальные функции и процедуры подтверждения права доступа к ней;

— управление сообщениями — связь абонентов друг с другом путем накопления сообщений в общедоступном БД; накопленные сообщения могут быть получены по запросу абонента или предоставляться автоматически;

— обмен сообщениями между оконечными установками обмен информацией между абонентами в диалоговом режиме;

— обработка данных — использование памяти БД для обработки информации или использование программ и других данных из БД в соответствующем оконечном оборудовании службы Видеотекс;

— взаимодействие с другими телематическими службами доступ абонентов к услугам и/или абонентам других телематических служб.

При необходимости получать информацию из БД пользователь с помощью стандартного телефонном аппарата набирает номер БД и в ответ получает сигнал определенной частоты (2106 Гц), после чего нажатием кнопки на терминале отключает ТА и переводит терминал в режим диалога с БД. В подтверждение установления логического соединения терминала с БД на дисплее терминала пользователя появляется «кадр приветствия». Далее БД с помощью вводимого пользователем пароля идентифицирует абонента. При положительном решении пользователю предоставляется возможность получения интересующей информации с помощью специально разработанной системы меню. С этот момента абонент может работать с банком данных по правилу запрос - ответ.

В службе Видеотекс используются абонентские терминалы трех типов специализированные, на базе ПЭВМ, на базе бытового телевизора.

Специализированные терминалы представляют собой законченные изделия, объединяющие в одном корпусе мини-ЭВМ, дисплей, клавиатуру, модем.

Терминал второго типа содержит ПЭВМ, модем и программное обеспечение Видеотекса.

Терминал третьего типа, рассчитанный в основном на использование в быту, представляет собой приставку к телевизору и состоит из логического устройства, простейшей клавиатуры (тастатуры) и модема.

Служба обработки сообщений (электронная почта) предоставляет пользователям возможность передачи сообщений через промежуточные накопители (метод коммутации сообщений). В системе ЭП терминалы отправителя и получателя могут быть разного типа. Система обеспечивает необходимые преобразования.

Сообщения передаются и принимаются автоматически. ЭП выполняет ряд функций секретаря абонента — сортировка принятых сообщений, просмотр очереди подготовленных к отправке сообщений. Служба предоставляет возможность контроля за прохождением сообщения. Важной услугой ЭП является защита сообщений от НСД, обеспечение целостности информации, сохранение ее конфиденциальности, аутентификация пользователей.

Для ЭП обычно используется сеть передачи данных с коммутацией пакетов, а также телефонные сети и некоммутируемые каналы.

Телетекст в отличие от всех указанных выше служб является циркулярной, симплексной и не интерактивной. Информация хранится в виде блоков (страниц) в БД, аналогичных БД службы Видеотекст, но меньших по объему. Информация передается по сети ТВ вещания с циклическим повторением страниц.

Передача сообщений Телетекста может идти вместо ТВ программы или одновременно с ней. Терминалом служит ТВ приемник, снабженный специальной приставкой. В телевизоры пятого поколения такие приставки встроены. Абонент с помощью имеющейся в телевизоре или приставке тастатуры выбирает нужные ему страницы.

Справочная служба (СС) — единая для всех служб электросвязи; основная функция СС — нахождение адреса (номера) по имени пользователя (например, номера телефона фирмы по ее названию), а также выдача сведений о порядке пользования службами, их характеристиках, тарифах и т. п. Может также использоваться для аутентификации абонентов. Основа СС — распределенная база данных, с которой абоненты работают в интерактивном режиме (запрос — ответ).

Служба телеконференции позволяет проводить в реальном масштабе времени конференции между пользователями, расположенными в разных местах, с помощью терминалов и сетей электросвязи. Различают аудиографические и видеоконференции. В первых передаются звуковые сигналы и неподвижные изображения, во вторых — звуковые сигналы и подвижные изображения.

При вводе сообщения с терминала участника конференции оно воспроизводится на дисплеях всех других участников, терминалы которых включены в тот же канал. Распорядок работы конференции устанавливает ее ведущий, он предоставляет «слово для выступления» и имеет право лишить любого из участников возможности выступить. Участники конференции могут ознакомиться с «присутствующими» на ней, пригласить к обмену информацией абонента сети, обсудить назначение ведущего, переслать другим участникам частные сообщения.

Телеконференции бывают постоянно действующими и ограниченными по времени проведения. Первые образуют неформальные коллективы и группы по определенным интересам и предоставляют возможность обмена актуальной информацией по мере надобности, накопления распределенной базы данных по какой-то тематике. Служба телеконференций, работающая в реальном масштабе времени, выгодно отличается этим от компьютерных конференций, основанных на принципе промежуточного накопления информации.

В настоящее время в связи с бурным развитием глобального мирового сообщества сетей Internet роль части телематических служб постепенно падает, а часть телематических служб реализуется соответствующими сервисами Internet.

2. Телевизионные системы

Современная телевизионная система (ТВ) — это совокупность оптических, электронных и радиотехнических устройств, которые принимают и передают на

расстояние информацию о пространственно-излучательных характеристиках подвижных цветных объектов.

Изображение объекта преобразуется в электрический сигнал, который передается по каналу связи и в месте приема преобразуется в оптическое изображение (рис. 1).

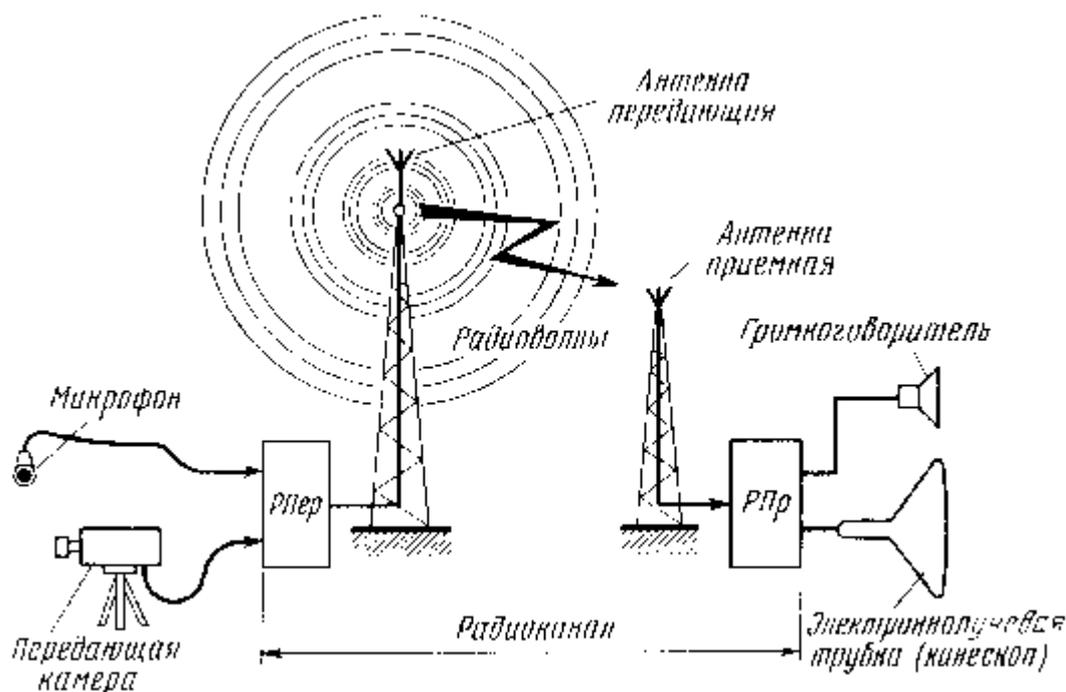


Рис. 1. Структурная схема системы телевизионного вещания

Упрощенная схема одного из типов передающих трубок (видикона) приведена на рис. 2. В стеклянном вакуумном баллоне трубки расположены два электрода — электронный прожектор и мишень. Прожектор создает электронный луч, направленный в сторону мишени. Поперечное сечение луча формируется фокусирующей системой ФС. Направление луча, определяющее место его встречи с мишенью, задается отклоняющей системой ОС. Источник питания П, прожектор, электронный луч, мишень и нагрузка R_H образуют электрическую цепь. Мишень имеет два слоя. Первый является прозрачным для света и обладает постоянной электропроводностью. Второй, обращенный к прожектору, изготавливается из вещества, обладающего внутренним фотоэффектом. Движущееся изображение проецируется на мишень при помощи объектива. При этом отдельные участки мишени будут освещены по-разному, а потому вследствие внутреннего фотоэффекта будут иметь разную электропроводность. Ток в цепи будет пропорционален электропроводности участка мишени, которого в данный момент касается электронный луч. Отклоняющая система трубки обеспечивает безинерционное перемещение электронного луча по горизонтали и вертикали. Тем самым обеспечивается последовательное преобразование лучистой энергии, отраженной от участков подвижного изображения, в сигнал, который принято называть видеосигналом.

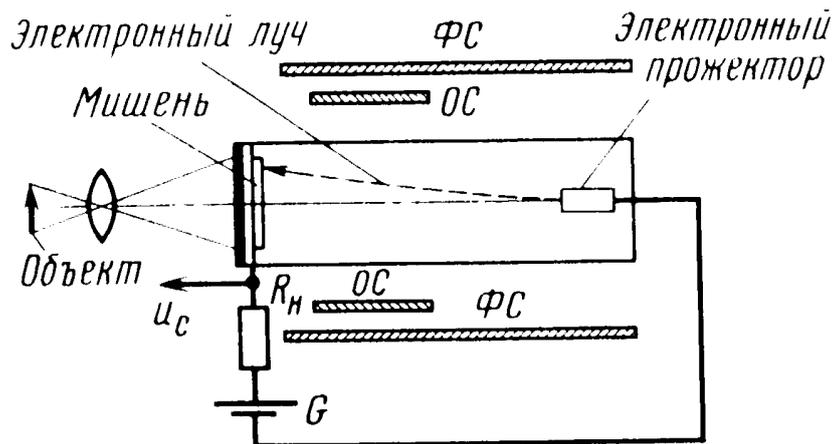


Рис. 2. Передающая телевизионная трубка (видикон)

Аналогично видикону работает и трехкомпонентная цветная передающая трубка (ЦПТ). Световой поток от передаваемой сцены светоразделительной оптикой (СРО) делится на 3 основные компоненты. Трехкомпонентная ЦПТ преобразует уровни световых интенсивностей каждой компоненты в соответствующие уровни электрических сигналов.

Для передачи по каналу кодирующее устройство формирует сигнал яркости U_Y и два цветоразностных сигнала U_{R-Y} и U_{B-Y} . В целях поддержания синхронизма развертки изображения в канал связи передаются сигналы синхронизации $U_{СИ}$.

Декодирующее устройство восстанавливает исходные сигналы и формирует сигнал развертки, которые синтезируют передаваемую сцену на экране телевизионной трубки.

Упрощенная схема, поясняющая устройство приемной телевизионной трубки (кинескопа), приведена на рис. 3. Слой люминофора нанесен на внутреннюю поверхность широкой части стеклянного баллона. Электронный луч создается прожектором, формируется и ускоряется специальными электродами (на рисунке не показаны). Интенсивностью электронного луча управляет видеосигнал. Луч направляется на люминофор и высвечивает поэлементно строку за строкой. Движение луча по горизонтали и вертикали задается отклоняющей системой (ОС).

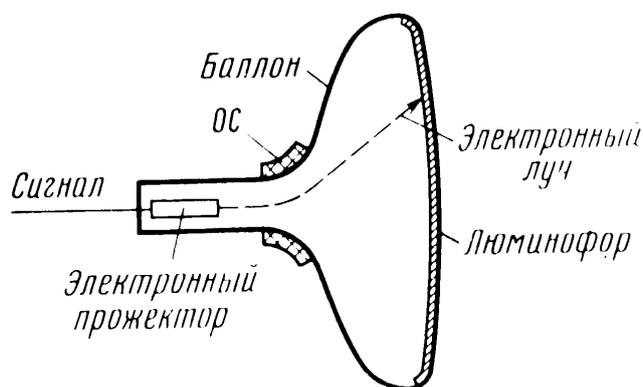


Рис. 3. Приемная телевизионная трубка (кинескоп)

Поскольку интенсивность луча изменяется в соответствии с изменением сигнала, яркость свечения каждой строки будет изменяться. Ввиду большой скорости перемещения луча по строкам и определенной инерционности зрения человек наблюдает на экране цельное оптическое изображение.

Принцип работы цветного кинескопа аналогичен рассмотренному. Для передачи каждого из трех цветов применяются три отдельные электронные пушки.

В ТВ под кадром понимают совокупность элементов, на которые разбивается изображение. Геометрическое место последовательно передаваемых элементов в кадре называют телевизионным растром.

В ТВ системах растр строится по принципу линейно-строчной развертки.

На время обратного хода луча в полном ТВ сигнале вводятся гасящие импульсы, в пределах которого передается синхронизирующая информация.

Параметры полного ТВ сигнала определяются свойствами зрения:

— угол разрешения зрения 1,5—2';

— число градаций яркости 70—90;

— критическая частота мерцаний 48—50 Гц;

— трехкомпонентная теория зрения. В соответствии с данной теорией любой цвет может быть представлен в виде композиции красного (R — red), зеленого (G — green) и синего (B — blue). Чувствительность человеческого глаза данным цветам различна. Сигнал яркости (используемый в совместимых цветных ТВ системах) может быть получен как $U_Y = 0,3U_R + 0,59U_G + 0,11U_B$;

— более низкая разрешающая способность для цветных элементов — в 4 раза меньше, чем к изменению яркости (мелкие цветные элементы воспринимаются как черно-белые).

Наибольший объем информации содержит сигнал яркости и, в основном, определяет полосу ТВ сигнала. Для передачи цветоразностных сигналов требуется полоса примерно в 4 раза уже, чем яркостного сигнала.

Для сокращения полосы ТВ сигнала применяют чересстрочную развертку, при которой полный кадр изображения передается и воспроизводится за два поля. В первом поле развертываются нечетные строки раstra, во втором — четные. Два поля образуют один кадр с полной четкостью.

В РФ и Европе частота полей принята 50 Гц, в США — 60 Гц.

Рассмотрим характеристики существующих телевизионных систем.

Система NTSC (National Television System Committee). Одновременная совместимая система цветного ТВ, в которой передается яркостной сигнал и расположенная в пределах его спектра поднесущая, квадратурно модулированная двумя цветоразностными сигналами. В приемнике осуществляется синхронное детектирование цветоразностных сигналов, для чего в пределах гасящего строчного импульса передается частота поднесущего колебания с опорной фазой.

Европейский вариант NTSC: число строк 525, частота полей 60 Гц, поднесущая цветности 4,42 МГц, ширина полосы $2 \times 1,3$ МГц, несущая звука 6,5 МГц. Американский вариант NTSC: число строк 525, частота полей 60 Гц,

поднесущая цветности 3,58 МГц, ширина полосы 1,3 и 0,5 МГц, несущая звука 4,5 МГц.

Система PAL (Phase Alternated Line). Квазисмешанная совместимая система цветного ТВ с квадратурной модуляцией поднесущей. Фаза одной из квадратурных компонент поднесущей переключается на 180° от строки к строке и сигналы цветности соседних строк в приемнике суммируются.

Основные характеристики системы PAL: число строк 525, частота полей 60 Гц, поднесущая цветности 4,433 618 МГц, ширина полосы $2 \times 1,3$ МГц, несущая звука 4,5 МГц.

Система SECAM. Квазисмешанная совместимая система цветного ТВ. Поднесущие, расположенные в спектре яркостного сигнала, модулируются по частоте двумя чередующимися от строки к строке цветоразностными сигналами. В приемнике цветоразностные сигналы для каждой строки восстанавливаются сложением с использованием линии задержки.

В системе SECAM сигналы цветности чередуются с частотой строк, т. е. цветовая четкость хуже в 2 раза. Однако это не ухудшает цветовосприятия. Основные характеристики системы SECAM: число строк 625, частота полей 50 Гц, поднесущая цветности $B-Y$ 4,25 МГц \pm 230 кГц, $R-Y$ 4,406 МГц \pm 280 кГц, несущая звука 6,5 МГц.

Цифровое телевидение. Основные характеристики цифрового ТВ сигнала нормированы МСЭ-Р для 525- и 625-строчных систем. Преобразование аналогового сигнала цветного ТВ осуществляется с частотой дискретизации яркостного сигнала 13,5 МГц и цветоразностных — 6,75 МГц. Это соотношение частот дискретизации обозначается 4:2:2. Для более сложных процессов обработки предусмотрен стандарт 4:4:4. Скорость передачи цифрового ТВ сигнала даже при использовании стандарта 4:2:2 получается высокой и составляет 216 Мбит/с.

Методами сжатия видеоданных удается снизить скорость передачи до 4 % от исходной. Различными организациями проводятся работы по стандартизации методов сжатия. В настоящее время разработаны следующие стандарты:

- Indeo (Intel Video) — разработан фирмой Intel;
- JPEG — разработан группой экспертов в области фотографии Joint Photographic Experts Group для неподвижных изображений;
- MPEG — разработан группой экспертов в области движущихся объектов Motion Picture Experts Group для подвижных изображений. Например, видеокادر в стандарте NTSC формата 512×400 точек 24 разряда на точку с первоначального размера 22 Мбайт может быть сжат до 0,45—17 Мбайт. В настоящее время широко применяется вторая версия стандарта.

К перспективным системам телевидения можно отнести телевидение высокой четкости и многопрограммное цифровое телевидение.

ТВ высокой четкости (ТВЧ). ТВЧ предполагает изменение формата изображения от 4:3 к 16:9 и увеличение числа строк свыше 1000. В Японии разработана и введена в эксплуатацию в 1989 году система 1125 строк, 60 полей. В рамках ЕС разработана система 1250 строк, 50 полей.

Передача полноформатного сигнала ТВЧ цифровыми методами (1024×768, 32 бита, 30 кадров/с) требует скорости 755 Мбит/с.

Многопрограммное цифровое ТВ (МПТВ-6-7-8). МПТВ предполагает передачу по стандартным каналам сжатых цифровых сигналов нескольких ТВ программ вместо одной программы стандартного ТВ или ТВЧ. В настоящее время удается передать от 4 до 10 ТВ программ в одном стандартном ТВ канале.

3. Сеть Internet

Internet — представляет собой совокупность соединенных между собой компьютерных сетей, в которых используются единые согласованные правила обмена данными между компьютерами.

3.1 Подключение к Internet. Протоколы TCP/IP

Организации объединяют свои компьютеры в локальную сеть, которая через устройство, называемое шлюзом, соединяется по выделенной линии связи с сетью провайдера Internet (есть организации, предоставляющей соединение с Internet).

Провайдеры обладают высокоскоростными каналами: кабельными, оптоволоконными, спутниковыми, которые объединяются в структуру глобальной сети.

Отдельный компьютер (например, установленный дома у пользователя) может подсоединиться к провайдеру с использованием телефонных каналов (коммутируемыми линиями). Для того чтобы передать информацию между компьютерами по коммутируемой линии, используются модемы.

Сеть Internet отличается от других сетей своими протоколами TCP/IP.

Протокол — это набор правил, определяющий характер взаимодействия пользователей, последовательность выполнения ими действий при обмене информацией.

Свое название протокол TCP/IP получил от двух типов протоколов связи:

Transmission Control Protocol (TCP)
Internet Protocol (IP)

Протокол IP отвечает за поиск маршрута: в Internet от одного компьютера к другому через множество промежуточных сетей, шлюзов и маршрутизаторов и передачу блоков данных по этим маршрутам.

Протокол TCP обеспечивает надежную доставку, безошибочность и правильный порядок приема передаваемых данных.

В Internet существует семь уровней взаимодействия между компьютерами:

- физический;
- канальный;
- сетевой;
- транспортный;
- уровень сеансов связи;
- представительский;

— прикладной.

Протоколы физического уровня определяют вид и характеристики линий связи между компьютерами.

Протоколы канального уровня разрабатываются для каждого типа линий связи и регламентируют управление передачей информации по каналам.

Протоколы сетевого уровня отвечают за передачу данных между устройствами в разных сетях, осуществляют маршрутизацию пакетов в сети.

Протоколы транспортного уровня управляют передачей данных из одной программы в другую.

Протоколы уровня сеансов связи обеспечивают установку, поддержание и уничтожение соответствующих каналов.

Протоколы представительского уровня обеспечивают обслуживание прикладных программ.

3.2 Система имен (адресов) в Internet

Каждый компьютер в Internet должен иметь свой собственный адрес, позволяющий связаться с ним любому другому компьютеру сети. Индивидуальный адрес каждого компьютера в Internet называется IP-адрес.

IP-адреса имеют две формы записи:

- цифровой (числовой) адрес;
- доменный адрес.

Оба адреса применяются равноценно.

Цифровой адрес имеет длину 32 бита; для удобства он разделяется на четыре блока по 8 бит в каждом, которые можно записывать в десятичном виде (1 байт = 8 бит, $2^8 = 256$, значения от 0 до 255). Цифровой адрес включает в себя три компонента:

- адрес сети;
- адрес подсети;
- адрес компьютера в подсети.

Например, IP-адрес может иметь вид: 142.25.6.170, где 142.25 — адрес сети; 6 — адрес подсети; 170 — адрес компьютера. Цифровой адрес содержит полную информацию, необходимую для идентификации компьютера.

Цифровая форма адреса используется компьютерами и специальным оборудованием обслуживания сети; для пользователей цифровой адрес неудобен, плохо запоминается и несет мало смысловой информации. В связи с этим была изобретена доменная система имен компьютеров, представленных в Internet.

Доменное имя состоит из нескольких слов или сокращений, разделенных точками, например: it.mtuci.ru. Доменное имя несет полезную информацию о местонахождении компьютера.

Доменное имя имеет многоуровневую структуру. Крайняя правая часть имени обозначает домен верхнего, уровня, то есть самую большую группу компьютеров, в которой находится данный компьютер. В данном примере это ru — сокращение от Russia; этот домен объединяет компьютеры, подключенные к Internet в России.

Внутри доменов верхнего уровня есть поддомены — области меньших размеров. Крайняя левая часть доменного имени обозначает имя компьютера внутри своего поддомена.

URL — составной код, который сообщает браузеру клиента:

— правила, которые пользователь должен использовать, чтобы достигнуть сайта;

— адрес Internet, который уникально определяет сервер;

— расположение в пределах файловой системы сервера данного элемента.

Пример URL — <http://citforum.ru/seminars/cis99.html>. В данном URL:

- ✓ ***http://*** — указание браузеру применить сетевой протокол HTTP, предназначенный для работы с WWW. Большинство браузеров способно также к воспроизведению файлов с форматами других частей Internet, например FTP, но HTTP является наиболее часто применяемым, и во многих браузерах указание "http://" можно опускать;
- ✓ ***citforum.ru*** — доменное имя компьютера в Internet (сервера WWW), на котором находится искомый документ;
- ✓ ***/seminars/cis99.html*** — путь к искомому файлу с указанием каталогов (директорий) и имени файла.

3.3 Прокси-сервер

Прокси-сервер включается между локальной сетью и Internet. Одной из функций прокси-сервера является *кэширование Web-документов* для группы компьютеров. Браузер с компьютера локальной сети обращается со своим запросом сначала к прокси-серверу, который ищет требуемый документ в своем кэше. Если прокси-сервер не имеет в кэше нужного документа, он от своего имени запросит его с оригинального сервера. Получив документ по сети, прокси-сервер скопирует его в кэш и отправит к клиенту, делавшему запрос. В любом случае браузер получит ответ от прокси-сервера.

Назначение *Web-сервера* состоит в том, чтобы преобразовать URL в имя файла и передать этот файл обратно по сети либо преобразовать URL в имя программы, выполнить ее и передать полученный результат обратно.

В современных сетевых технологиях на Web-серверы приходится все большая нагрузка и *Web-сервер должен*:

— быть надежным;

— иметь средства защиты от несанкционированного доступа и разрушения данных;

— быть многозадачным, чтобы работать одновременно с несколькими запросами;

— позволять администратору оперативно корректировать содержимое сайтов, не останавливая работы сервера;

— иметь средства аутентификации запрашиваемых абонентов, которые могут иметь различные права доступа;

- иметь средства регистрации всех внешних обращений;
- реагировать на ошибки внешних запросов и выдавать диагностические сообщения;
- поддерживать различные кодировки набора символов языка;
- поддерживать различные графические форматы.

3.4 Электронная почта. Телеконференции

Электронная почта. Концепция электронной почты заключается в передаче информации от компьютера к компьютеру (независимо от их местонахождения) с помощью сетевых технологий.

Сообщение может быть послано по любому сетевому адресу в удаленный компьютер. Пример адреса электронной почты: misha@xlibris.ru.

Справа от символа @ находится доменное имя компьютера или целой сети, в которой зарегистрирован пользователь; слева от символа @ помещается имя пользователя (точнее, его почтового ящика).

В Internet для работы с электронной почтой используются *прикладные протоколы SMTP, POP IMAP*.

Протокол SMTP позволяет размножить копии сообщения для передачи в разные адреса и формировать списки рассылки.

POP дает пользователю доступ к пришедшим к нему электронным сообщениям, то, есть осуществляет связь между компьютером пользователя и почтовым сервером, на котором зарегистрирован почтовый ящик пользователя, пересылая все сообщения на компьютер пользователя.

Кроме протокола POP, для доступа пользователя к почтовому серверу может использоваться *протокол IMAP*. Это более сложный протокол, позволяющий пользователю *каталогизировать и хранить почту* непосредственно на сервере.

Для отправки и получения сообщений по *E-mail* используются *специальные почтовые программы*:

Microsoft Internet Explorer;
The Bat;
Microsoft Outlook Express;
Netscape Navigator;
универсальная система обмена информацией программа Microsoft Exchange.

Принцип работы электронной почты состоит в том, что пользователь с терминала в любой организации или из дома может передавать сообщение, указав список адресов лиц или организаций, кому оно предназначено. Это сообщение направляется в компьютер, который после необходимой сортировки сообщений в соответствии с адресами направляет его в электронный почтовый ящик адресата или адресатов.

Телеконференции. Кроме электронной почты, существует похожая на нее сетевая услуга — телеконференции. Эта служба представляет собой публичную электронную доску объявлений, куда каждый может отправить сообщение и каждый может прочесть, что отправили другие.

Для удобства пользования введено разделение электронной доски объявлений на группы по темам (интересам).

Наиболее используемыми способами организации электронных конференций являются:

- списки почтовой рассылки;
- группы новостей.

Оба эти способа основаны на принципе пересылки электронных почтовых сообщений на определенные адреса. Списки рассылки отличаются от групп новостей тем, что каждый подписчик получает по электронной почте отдельный экземпляр любого сообщения, которое появляется в конференции. В случае же групп новостей все сообщения поступают на отдельную машину, а участники конференций могут их читать и при желании сохранять на своей локальной машине.

3.5 Обеспечение безопасности электронных платежей через сеть Internet

Виды электронной торговли. Под термином «электронная торговля» понимают предоставление товаров и платных услуг через глобальные информационные сети. Наиболее распространенные виды электронной коммерции:

- продажа информации, например подписка на базы данных, функционирующие в режиме on-line;

- электронные магазины, представляющие собой Web-site, в котором имеется оперативный каталог товаров, виртуальная тележка покупателя, на которую собираются товары, а также средства оплаты по предоставлению номера кредитной карточки по сети или по телефону. Отправка товаров покупателям осуществляется по почте или, в случае покупки электронных товаров (например, программного обеспечения), по каналам электронной почты;

- электронные банки. Достоинства электронных банков: низкая себестоимость организации такого банка (не нужно арендовать престижные здания, не нужны хранилища ценностей и т. д.) и широкий охват клиентов. Поэтому электронный банк может предоставлять клиентам более выгодные, чем у обычного банка, проценты. Электронный банк имеет системы — специальные карты — генераторы случайных паролей, синхронизируемых с паролем на банковском сервере (это позволяет создавать уникальный пароль при каждом обращении клиента к банковскому серверу).

Автоматизированное мошенничество — использование фильтров для всех сообщений, проходящих через какую-либо сеть, с целью извлечения номеров счетов кредитных карточек из потока данных.

Методы защиты информации в сфере электронных платежей. Традиционный способ электронной торговли оплата товаров и услуг кредитной карточкой по телефону. В этом случае покупатель заказывает на Web-сервере список товаров, которые он хотел бы купить, и потом сообщает по телефону номер своей кредитной карточки продавцу коммерческой фирмы. Затем

происходит авторизация карты, а списание денег со счета покупателя производится лишь в момент отправки товара по почте или с курьером.

Для того чтобы покупатель — владелец кредитной карточки мог без опасений расплатиться за покупку через сеть, необходимо иметь надежный механизм защиты передачи электронных платежей. Такой подход заключается в немедленной авторизации и шифровании финансовой информации в сети Internet с использованием протокола SET.

Протокол "Безопасные электронные транзакции" SET (Secure Electronic Transactions), разработанный компаниями Visa и Master Card, предполагает шифрование исключительно финансовой информации.

Протокол SET гарантирует соблюдение следующих условий:

- конфиденциальность информации;
- полная сохранность данных. Участники электронной торговли должны быть уверены в том, что при передаче от отправителя к адресату содержание сообщения останется неизменным. Сообщения, отправляемые владельцами карточек коммерсантам, содержат информацию о заказах, персональные данные и платежные инструкции. Если в процессе передачи изменится хотя бы один из компонентов, то данная транзакция не будет обработана надлежащим образом. Одним из таких средств является использование цифровых подписей;

- аутентификация (установление подлинности) счета владельца карточки. Использование сертификатов владельца карточки гарантирует аутентификацию счёта владельца карточки и подтверждение того, что владелец карточки является законным пользователем данного номера счета.

Участники системы расчетов и криптографические средства защиты транзакций. Электронная транзакция начинается с владельца карточки, а не с коммерсанта или эквайера.

Коммерсант предлагает товар для продажи или предоставляет услуги за плату.

Эквайером (получателем) является финансовое учреждение, которое открывает счет коммерсанту и обрабатывает авторизации и платежи по кредитным карточкам.

Финансовые учреждения создают ассоциации банковских кредитных карточек, которые создают и вводят в действие правила использования кредитных карточек, организуют сети для связи финансовых учреждений друг с другом.

Основное отличие кредитных карт в сети Internet заключается в том, что в соответствии со стандартом SET для защиты транзакций электронной торговли используются процедуры шифрования.

В коммерческих Internet-приложениях используют криптосистемы с открытыми ключами. Шифрование с использованием открытых ключей предполагает, что у коммерсанта и покупателя имеются по два ключа:

- открытый, который может быть известен третьим лицам;
- частный (секретный), известный только получателю информации.

Правила SET предусматривают первоначальное шифрование сообщения с использованием случайным образом сгенерированного ключа, который, в свою очередь, шифруется открытым ключом получателя сообщения. В результате образуется так называемый электронный конверт. Получатель сообщения расшифровывает электронный конверт с помощью своего частного (секретного) ключа, чтобы получить ключ отправителя. Далее ключ отправителя используется для расшифровки присланного сообщения.

Использование сертификатов. Центр сертификации создает сообщение, содержащее имя владельца карточки и его открытый ключ, после предъявления владельцем карточки доказательств идентификации личности (водительские права или паспорт). Такое сообщение называется сертификатом. Сертификат снабжается подписью центра сертификации.

Сертификаты владельцев карточек функционируют как электронный эквивалент кредитных карточек. Они снабжаются цифровой подписью финансового учреждения и поэтому не могут быть изменены третьей стороной. Эти сертификаты содержат номер счета и срок действия, которые шифруются. Если номер счета и дата окончания действия известны, то связь с сертификатом можно подтвердить, однако эту информацию невозможно получить путем изучения данного сертификата.

Сертификаты передаются коммерсантам вместе с запросами о покупке и зашифрованными платежными инструкциями.

Сертификаты коммерсантов являются электронным аналогом фирменной картинки, которая выставляется в витрине электронного магазина. Эти сертификаты снабжены цифровой подписью финансового учреждения коммерсанта. Сертификаты служат гарантией того, что коммерсант имеет действующее соглашение с эквайером.

Сертификаты платежных межсетевых интерфейсов выдаются эквайерам. Ключ шифрования конкретного интерфейса, который владелец карточки получает из этого сертификата, используется для защиты информации о счете владельца карточки.

Протокол SET определяет протоколы транзакций, которые используют криптографические средства для безопасного ведения электронной коммерции:

- регистрация владельца карточки;
- регистрация коммерсанта;
- запрос о покупке;
- авторизация платежа;
- получение платежа.

3.6 IP-телефония

Понятие IP-телефонии. IP-телефония — технология, позволяющая использовать сеть с коммутацией IP-пакетов (Internet), в качестве средства организации и ведения телефонных разговоров и передачи факсов в режиме реального времени между удаленными абонентами.

Различие между обычной телефонной связью и сетевой состоит в следующем:

— в традиционно обеспечиваемой телефонной связи каждому абоненту в монопольное распоряжение выделяется линия связи;

— при IP-телефонии (коммутации пакетов) несколько пользователей одновременно используют один и тот же канал. Уплотняя трафик путем разбиения на пакеты непрерывного разговора и эффективно заполняя ими доступный канал, можно понизить стоимость использования дорогого цифрового канала для каждого отдельного пользователя.

Обобщенная схема IP-телефонии. Под IP-телефонией понимают такую технологию, в которой голосовой трафик частично передается через телефонную сеть общего пользования, а частично через сети с IP-коммутацией (в частности Internet).

Основным элементом IP-телефонии является связка шлюз — сеть — шлюз.

Шлюз представляет собой компьютер-сервер, дополненный соответствующим программным обеспечением. Он служит интерфейсом между передающим звук устройством пользователя (телефоном, компьютером и т. п.) и сетью с коммутацией пакетов.

Шлюз обеспечивает прием и преобразование данных в форму, пригодную для пересылки по сети (и обратное преобразование). Шлюз, имеющий выход в Internet, передаст по сети данные на другой такой же шлюз, ближайший к вызываемому абоненту. После этого, претерпев обратное преобразование, звук достигнет абонента и соединение осуществится.

Соединение «телефон — телефон». Техническая последовательность установления соединения «телефон — телефон» посредством IP-телефонии:

- необходимо набрать телефонный номер шлюза провайдера IP-телефонии;
- переключив телефонный аппарат в тоновый режим, набрать номер вызываемого абонента;
- набрать идентификационный номер и, возможно, пароль.

Для связи в режиме «телефон — телефон» не нужен ни компьютер, ни модем. Подключение к сети с коммутацией пакетов (Internet) тоже не потребуются. До шлюза сигнал идет по телефонной сети общего пользования. При этом в него (как и в любой другой телефонный сигнал) могут добавляться помехи.

На уровень задержек и, следовательно, на качество разговора в режиме «телефон — телефон» влияние оказывает пропускная способность линий связи провайдера IP-телефонии и загруженность сети на маршруте следования пакетов.

Проблема качества звука может решаться путем оптимизации задержек на пути следования сигнала. Из нескольких возможных маршрутов система выбирает наименее загруженные, а там, где это допустимо, повышает приоритет голосовых пакетов. За счет этих мер паузы в разговоре удастся сделать практически незаметными даже в часы максимальной загрузки.

Одной из услуг IP-телефонии является **режим «факс — факс»**. Так как факсовый сигнал отличается от голосового, для него выделяется отдельная телефонная линия доступа. В этом случае факсимильный аппарат абонента взаимодействует с модемом на шлюзе провайдера IP-телефонии.

Соединение «компьютер — компьютер». Два компьютера, подключенные к сети с коммутацией пакетов, могут общаться без посредников: в общей схеме

отсутствует шлюз, поскольку необходимость преобразования сигнала отпала (в качестве шлюза выступает программа — IP-телефон, запущенная на обоих компьютерах). Данные сразу передаются по стандартным протоколам сети с коммутацией пакетов, поэтому помехи проникнуть в пакет данных не могут. Все, на что помехи способны — это задержать пакеты в пути.

При таком разговоре можно не только слышать собеседника, но и видеть его, обмениваться файлами и т. д. Связь «компьютер — компьютер» позволяет обойтись без услуг провайдера IP-телефонии. Однако в этом случае пользователь лишается ряда полезных функций. Например, ни абонент не сможет позвонить на обыкновенный телефон, ни ему невозможно будет позвонить с обычного телефона.

Соединение «компьютер — телефон» («телефон — компьютер»). Установив на свой компьютер программу IP-телефонии, пользователь не утратит возможность связаться с человеком у которого компьютера нет.

Сервер IP-телефонии обеспечивает преобразование номеров абонентов сети связи общего пользования в «электронные адреса» IP-телефонии и обратно. На шлюз провайдера возлагается задача организации взаимодействия сети с коммутацией пакетов и АТС, обеспечивающих подключение абонентов.

Лекция № 18 Системы радиосвязи

1. Радиолинии и системы передачи сообщений с радиоканалами
2. Радиопередающие устройства и радиоприемные устройства
3. Антенны и фидеры
4. Радиорелейные системы передачи
5. Тропосферные радиорелейные системы передачи
6. Радиосистемы передачи на декаметровых волнах
7. Радиосистемы, использующие ионосферное рассеяние

1. Радиолинии и системы передачи сообщений с радиоканалами

В тех случаях, когда возникают трудности прокладки проводных линий связи, используются радиолинии. Принципиальное отличие радиосистем передачи информации заключается в том, что условия распространения радиоволн в радиолинии нестационарны, т. е. подвержены непрерывным изменениям, зависящим от времени и частоты. Однако, передача с помощью радиоволн в некоторых случаях является единственным методом связи (например, связь с подвижными объектами).

Для обеспечения односторонней радиосвязи (рис. 1) в пункте, из которого ведется передача сигналов, размещают радиопередающее устройство, содержащее радиопередатчик РПер и передающую антенну АПЕР, а пункте, в котором ведется прием сигналов — радиоприемное устройство, содержащее приемную антенну АПр и радиоприемник РПр. Антенны подключаются к приемопередающему оборудованию при помощи фидерных трактов Ф. Для двухстороннего обмена сигналами нужно иметь два комплекта оборудования. Двухсторонняя радиосвязь может быть симплексной или дуплексной. При симплексной радиосвязи передача и прием ведутся поочередно. Радиопередатчики в конечных пунктах в этом случае могут работать на одинаковой частоте, на эту же частоту настроены и радиоприемники. Радиопередатчик включается только на время передачи.

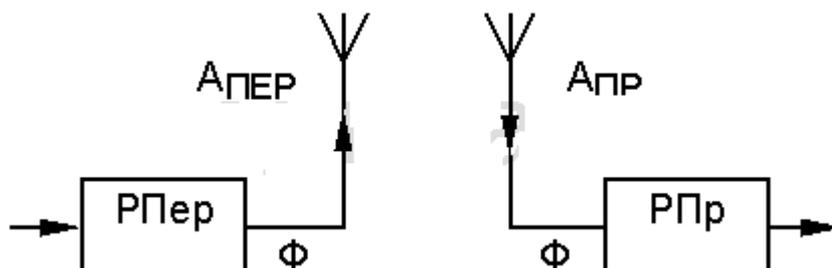


Рис. 1. Структура системы радиосвязи

При дуплексной радиосвязи передача осуществляется одновременно с приемом. Для связи должны быть выделены две разные частоты для передачи в разных направлениях. Радиопередатчики и радиоприемники абонентов включены в течение всего сеанса связи.

2. Радиопередающие устройства и радиоприемные устройства

Радиопередающие устройства. В функциональном смысле под радиопередающим устройством понимается комплекс оборудования, предназначенный для формирования и излучения радиочастотного сигнала (радиосигнала). В качестве функциональных узлов в состав радиопередатчика входят генератор несущей и модулятор. Как правило, генератор несущей и модулятор строятся по многокаскадной схеме. Кроме того, в состав радиопередающих устройств (особенно мощных) входит много другого оборудования: источники питания, средства охлаждения, автоматического и дистанционного управления, сигнализации, защиты и блокировки и пр.

Основные показатели радиопередающих устройств условно могут быть разделены на три группы: энергетические, показатели электромагнитной совместимости и качественные.

Важнейшими энергетическими показателями радиопередающего устройства являются номинальная мощность и промышленный коэффициент полезного действия. Под номинальной мощностью радиопередающего устройства P понимают среднее за период радиочастотного колебания значение энергии, подводимой к антенне.

Коэффициент полезного действия КПД представляет собой отношение номинальной мощности P к общей $P_{\text{общ}}$, потребляемой от сети переменного тока

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{общ}}} 100\%$$

радиопередающим устройством

Основными показателями электромагнитной совместимости являются диапазон рабочих частот, нестабильность частоты колебаний и внеполосные излучения. Диапазоном рабочих частот называют полосу частот, в которой радиопередающее устройство обеспечивает работу в соответствии с требованиями стандарта. Под нестабильностью частоты радиопередатчика понимают отклонение частоты колебаний на его выходе за определенный промежуток времени относительно установленной частоты. Малая нестабильность (высокая стабильность) частоты позволяет ослабить помехи радиоприему. Внеполосными называют такие излучения, которые расположены вне полосы, отведенной для передачи полезных сообщений. Внеполосные излучения являются источником дополнительных помех радиоприему. В случае подавления внеполосных излучений качество передачи сигнала не ухудшается.

По назначению радиопередающие устройства делятся на связные, радиовещательные и телевизионные. По диапазону рабочих частот радиопередающие устройства подразделяются в соответствии с классификацией видов радиоволн. В зависимости от номинальной мощности радиопередающие устройства делятся на маломощные (до 100 Вт), средней мощности (от 100 до 10 000 Вт), мощные (от 10 до 500 кВт) и сверхмощные (свыше 500 кВт).

Специфика эксплуатации позволяет выделить стационарные и подвижные радиопередающие устройства (автомобильные, самолетные, носимые и т. д.).

Радиоприемные устройства. Радиоприем — это выделение сигналов из радиоизлучения. В том месте, где ведется радиоприем, одновременно существуют радиоизлучения от множества естественных и искусственных источников. Мощность полезного радиосигнала составляет очень малую долю мощности общего радиоизлучения в месте радиоприема. Задача радиоприемного устройства сводится к выделению полезного радиосигнала из множества других сигналов и возможных помех, а также к воспроизведению (восстановлению) передаваемого сообщения.

Основными (в смысле универсальности) показателями радиоприемных устройств являются диапазон рабочих частот, чувствительность, избирательность и помехоустойчивость.

Диапазон рабочих частот определяется диапазоном возможных частот настройки. Другими словами, это область частот настройки, в пределах которой радиоприемное устройство может плавно или скачкообразно перестраиваться с одной частоты на другую.

Чувствительность является мерой способности радиоприемного устройства обеспечивать прием слабых радиосигналов. Количественно оценивается минимальным значением ЭДС сигнала на входе радиоприемного устройства, при котором имеет место требуемое отношение сигнал-шум на выходе при отсутствии внешних помех.

Свойство радиоприемного устройства, позволяющее отличать полезный радиосигнал от радиопомехи по определенным признакам, свойственным радиосигналу, называется избирательностью. Иначе, это способность радиоприемного устройства выделять нужный радиосигнал из спектра электромагнитных колебаний в месте приема, снижая мешающие радиосигналы.

Различают пространственную и частотную избирательности. Пространственная избирательность достигается за счет использования антенны, обеспечивающей прием нужных радиосигналов с одного направления и ослабление радиосигналов с других направлений от посторонних источников. Частотная избирательность количественно характеризует способность радиоприемного устройства выделять из всех радиочастотных сигналов и радиопомех, действующих на его входе, сигнал, соответствующий частоте настройки радиоприемника.

Помехоустойчивостью радиоприемного устройства называется его способность противодействовать мешающему действию помех. Количественно помехоустойчивость оценивается тем максимальным значением уровня помехи в антенне, при котором еще обеспечивается прием радиосигналов.

Радиоприемные устройства можно классифицировать по различным признакам. Например, по схемным решениям радиоприемные устройства могут быть прямого усиления и супергетеродинные. По назначению можно выделить радиовещательные (обычно называемые как радиоприемники или приемники), телевизионные (телевизоры), профессиональные, специальные радиоприемные устройства. К профессиональным относятся магистральные радиоприемные устройства декаметрового диапазона, радиорелейных и спутниковых ЛС. Среди

радиоприемных устройств специального назначения следует назвать, например, радиолокационные, радионавигационные, самолетные и т. д.

3. Антенны и фидеры

Антенна представляет собой элемент сопряжения между передающим или приемным оборудованием и средой распространения радиоволн. Антенны, имеющие вид проводов или поверхностей, обеспечивают излучение электромагнитных колебаний при передаче, а при приеме они «собирают» падающую энергию.

Антенны, состоящие из проводов небольшого поперечного сечения по сравнению с длиной волны и продольными размерами, называют *проволочными*. Антенны, излучающие через свой раскрыв — апертуру (апертура в антенной технике — излучающая или принимающая излучение поверхность сложных **АНТЕНН**), называют *апертурными*. Иногда их называют дифракционными, рефлекторными, зеркальными. Электрические токи таких антенн протекают по проводящим поверхностям, имеющим размеры, соизмеримые или много больше по сравнению с длиной волны.

Сравнивать и оценивать свойства антенн любых типов можно по их параметрам. Самым главным определяющим параметром передающей антенны как нагрузки для генератора или фидера является ее входное сопротивление. Параметром антенны как излучателя электромагнитных волн является коэффициент полезного действия, а также амплитудная характеристика направленности.

Входное сопротивление антенны определяется отношением напряжения высокой частоты на ее зажимах к току питания.

Не вся мощность, подводимая к антенне, излучается в окружающее пространство. Часть ее расходуется не на излучение, а теряется на нагревание как самой антенны, так и находящихся поблизости предметов. Отношение мощности, излученной антенной, к мощности, подводимой к ней, называют *коэффициентом полезного действия* антенны и выражают в процентах:

$$\eta = \frac{P_{\text{изл}}}{P_{\text{под}}} 100\% .$$

Электромагнитные волны излучаются антенной в различных направлениях неравномерно. Антенн, излучающих электромагнитные волны равномерно во все стороны, не существует. Распределение в пространстве напряженности электрического поля, созданного антенной, характеризуется *амплитудной характеристикой направленности*. Она определяется зависимостью амплитуды напряженности создаваемого антенной поля (или пропорциональной ей величины) от направления на точку наблюдения в пространстве. Направление на точку наблюдения определяется азимутальным φ и меридиональным θ углами сферической системы координат, как показано на **рис. 2**. При этом амплитуда напряженности электрического поля измеряется на одном и том же (достаточно большом) расстоянии r от антенны. Графическое изображение характеристики направленности называют *диаграммой направленности*. Пространственная

диаграмма направленности изображается в виде поверхности $f(\varphi, \theta)$. Построение такой диаграммы неудобно, поэтому на практике обычно строят диаграмму направленности в какой-нибудь одной плоскости, в которой она изображается плоской кривой $f(\varphi)$ или $f(\theta)$ в полярной или декартовой системе координат.

На рис. 2 в начале координат показана простейшая проволочная антенна — диполь Герца, пространственная диаграмма направленности которой приведена на рис. 3, а. Диаграммы направленности в азимутальной и меридиональной плоскостях, построенные в полярной системе координат, представлены на рис. 3, б и в.

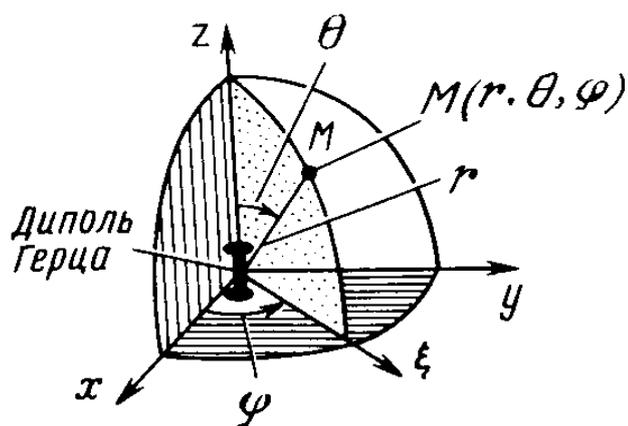


Рис. 2. Сферическая система координат

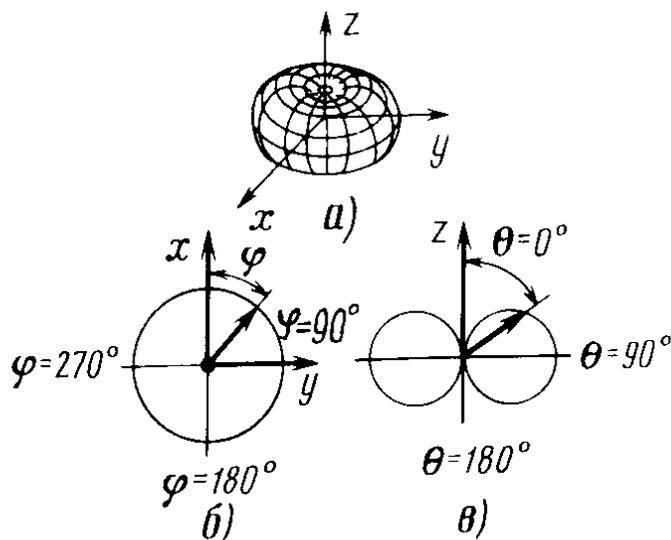


Рис. 3. Диаграммы направленности: а — объемная; б, в — в азимутальной и меридианальной плоскостях

Помимо рассмотренных основных электрических параметров антенн существует целый ряд дополнительных специфических параметров как электрических, так и экономических, конструктивных, эксплуатационных.

Что касается приемных антенн, то оказывается, что количественно электрические параметры передающих и приемных антенн одни и те же, хотя физическое объяснение дается с точки зрения приема.

Приемная антенна имеет такие же значения входного сопротивления, коэффициента полезного действия и такую же диаграмму направленности, какие она имела бы при работе в качестве передающей. Существенным различием в работе передающей и приемной антенн является то, что в передающей антенне используются большие токи и напряжения, а в приемной — очень незначительные.

Особенности передающих антенн различных диапазонов. Километровые и гектометровые радиоволны широко используются для организации сети звукового радиовещания. Передающие антенны, как правило, устанавливаются в центре зон обслуживания, и поэтому должны создавать ненаправленное излучение вдоль поверхности Земли, т. е. иметь диаграмму направленности в горизонтальной плоскости в виде окружности. Таким условиям отвечают антенны-мачты и антенны-башни. Их высота обычно 150—250 м, а некоторые антенны имеют высоту до 350 и даже 500 м.

Для радиосвязи и радиовещания на значительные расстояния (тысячи километров) используются декаметровые радиоволны. Особенности их распространения таковы, что антенны должны сформировывать направленное излучение с максимумом излучения под некоторым углом к поверхности Земли. Самыми распространенными типами передающих антенн, отвечающими этим требованиям, являются *проволочные антенны*: вибраторные, ромбические и синфазные в виде решетки из вибраторов, возбужденных определенным образом. Простейшая из этих антенн — горизонтальный симметричный вибратор показана на [рис. 4](#).

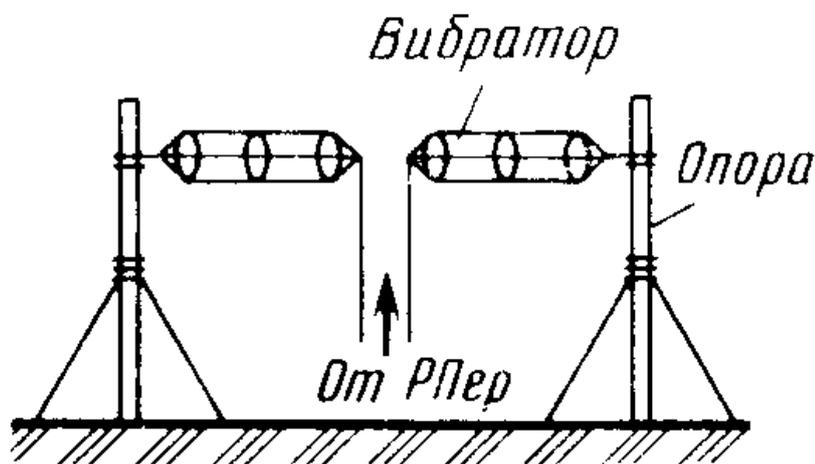


Рис. 4. Проволочная антенна — вибратор горизонтальный диапазонный

На местных радиолиниях протяженностью 50—100 км также используются в основном декаметровые радиоволны и простые антенны в виде вертикально подвешенного провода (Т- и Г-образные).

Диапазон метровых радиоволн используется главным образом для организации телевизионного и звукового вещания, а также для связи с подвижными объектами в пределах определенной зоны обслуживания. Передающие антенны, как правило, должны создавать ненаправленное излучение в горизонтальной плоскости.

Диапазоны дециметровых, сантиметровых и более коротких радиоволн применяются для организации радиорелейной связи. Антенны, устанавливаемые на радиорелейных линиях, должны обладать высокой направленностью, их диаграммы направленности должны иметь «игольчатую форму» (рис. 5). Наиболее распространены апертурные (зеркальные) антенны. Схема простейшей из них — *параболической антенны* — приведена на рис. 6. Особенность распространения метровых, дециметровых, сантиметровых и более коротких радиоволн такова, что антенны необходимо размещать на специальных опорах высотой десятки и даже сотни метров.

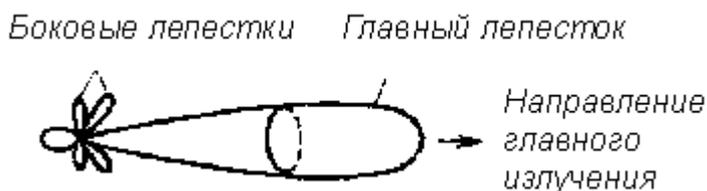


Рис. 5. Диаграмма направленности «игольчатой формы»

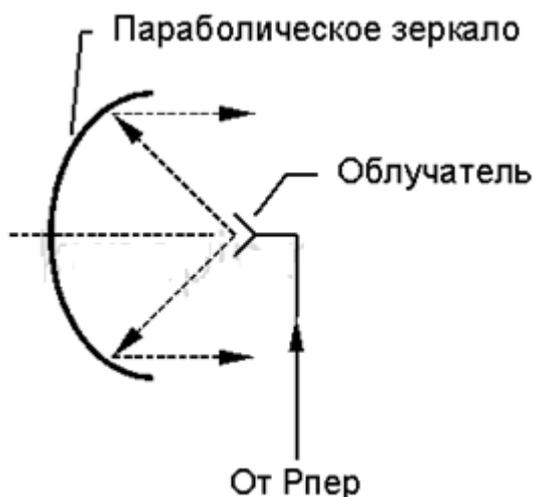


Рис. 6. Принцип построения однозеркальной параболической антенны

Особенности приемных антенн различных диапазонов. Антенна — устройство обратимое. Если антенна хорошо излучает радиоволны, то она хорошо их и принимает. Форма диаграммы направленности антенны не зависит от того, работает она на передачу или на прием. Содержание понятия «диаграмма направленности» для приемной антенны несколько отличается от приведенного выше для передающей антенны. Это график зависимости напряжения на входе радиоприемника от направления прихода принимаемой электромагнитной волны.

В качестве приемных антенн в километровом и гектометровом диапазонах используется *рамочная антенна*. В декаметровом диапазоне наиболее распространена *антенна «бегущая волна»*. *Антенна «волновой канал»* является типичной для диапазона метровых волн, в частности для приема телевизионных сигналов. В диапазоне дециметровых и сантиметровых волн антенны являются обычно приемопередающими.

Электрическая цепь и вспомогательные устройства, с помощью которых энергия радиочастотного сигнала подводится от радиопередатчика к антенне или от антенны к радиоприемнику, называется *фидером*. Передающие антенны,

используемые в километровом и гектометровом диапазонах радиоволн, соединяются с радиопередатчиком с помощью многопроводных коаксиальных фидеров. В декаметровом диапазоне фидеры обычно выполняются в виде проволочных двух- или четырехпроводных линий.

К антеннам метровых радиоволн энергия обычно подводится с помощью коаксиального кабеля. На более коротких волнах, в частности в сантиметровом диапазоне, фидер выполняется в виде полый металлической трубы — волновода прямоугольного, эллиптического или круглого сечения.

В связи с наблюдающейся тенденцией упрочнения передающих радиостанций, работающих в диапазонах километровых, гектометровых и декаметровых радиоволн, очень важным представляются вопросы конструирования антенн и фидеров с повышенной электрической прочностью, т. е. разработка конструкций, способных работать со сверхмощными радиопередатчиками.

Значительный интерес представляет разработка устройств, обеспечивающих возможность подключения к одной антенне нескольких мощных радиопередатчиков, работающих на разных частотах.

Для радиоприема на декаметровых волнах перспективным представляется создание устройств, позволяющих управлять диаграммой направленности приемных антенн в соответствии с изменением направления угла прихода радиоволны. Следует ожидать, что в дальнейшем антенны с электрически управляемыми характеристиками займут доминирующее положение во многих областях антенной техники. Антенны радиорелейных линий совершенствуются в части увеличения концентрации энергии в главном направлении и снижения излучения в направлениях, несовпадающих с главным.

4. Радиорелейные системы передачи

Радиосистема передачи, в которой сигналы электросвязи передаются с помощью наземных ретрансляционных станций, называется радиорелейной системой передачи (рис. 7).

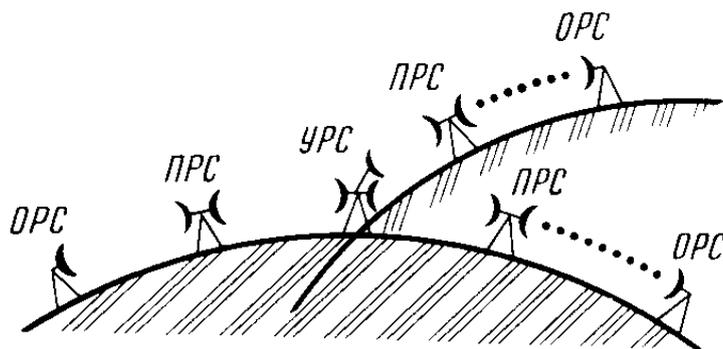


Рис. 7. Принцип радиорелейной связи

На частотах ОВЧ- и СВЧ-диапазона надежная связь с низким уровнем помех может быть получена только в условиях прямой видимости между антеннами, излучающими радиоволны. Расстояние между антеннами радиорелейных систем зависит от структуры земной поверхности и высоты антенн над ней. Типичные расстояния составляют 40—50 км при высотах башен и мачт, на которых

устанавливаются антенны, около 100 м. Ограниченность расстояния прямой видимости не следует рассматривать как недостаток. Именно за счет невозможности свободного распространения радиоволн на большие расстояния устраняются взаимные помехи между радиорелейными системами передачи внутри одной страны и разных стран. Кроме того, в указанных диапазонах практически отсутствуют атмосферные и промышленные помехи.

Антенны могут работать в режиме передачи и приема для одновременной передачи в противоположных направлениях с использованием двух частот: f_1 и f_2 . При этом, если станция передает сигнал на частоте f_1 и принимает на частоте f_2 , то соседние с ней станции передают на частоте f_2 , а принимают на частоте f_1 . Эта пара частот, соответствующая двухчастотному плану частот МСЭ-Р, образует радиочастотный ствол.

Радиорелейные линии (РРЛ) занимают диапазоны ОВЧ и СВЧ, причем граница между аналоговыми и цифровыми радиорелейными системами (РРС) лежит вблизи частоты 11 ГГц.

Аналоговые РРС предназначены в основном для передачи многоканальных телефонных сигналов в аналоговой форме и сигналов данных с низкой и средней скоростью по каналам ТЧ, а также сигналов телевидения. Цифровые РРС используются для организации цифровых трактов со скоростями от 2 до 140 Мбит/с.

Большинство станций РРЛ составляют промежуточные радиостанции (ПРС), играющие роль активных ретрансляторов. На всех станциях РРЛ целесообразно иметь однотипную, унифицированную приемопередающую аппаратуру (ППА), удовлетворяющую требованиям заданного частотного плана.

Перспективным вариантом построения ППА является вариант с усилением на СВЧ и преобразованием частоты (рис. 8). Недостатком подобной схемы является необходимость обработки сигнала на СВЧ.

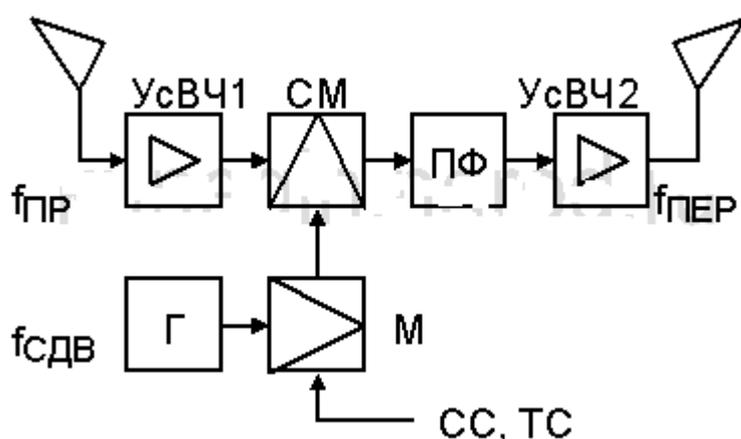


Рис. 8. Приемопередающая аппаратура с усилением на СВЧ и преобразованием частоты

Наиболее часто используются ППА, в которой обработка сигналов производится на промежуточной частоте $f_{пч}$ (рис. 9). Номинальное значение $f_{пч}$

выбирается в соответствии с рекомендациями МСЭ-Р и обычно составляет 70 МГц.

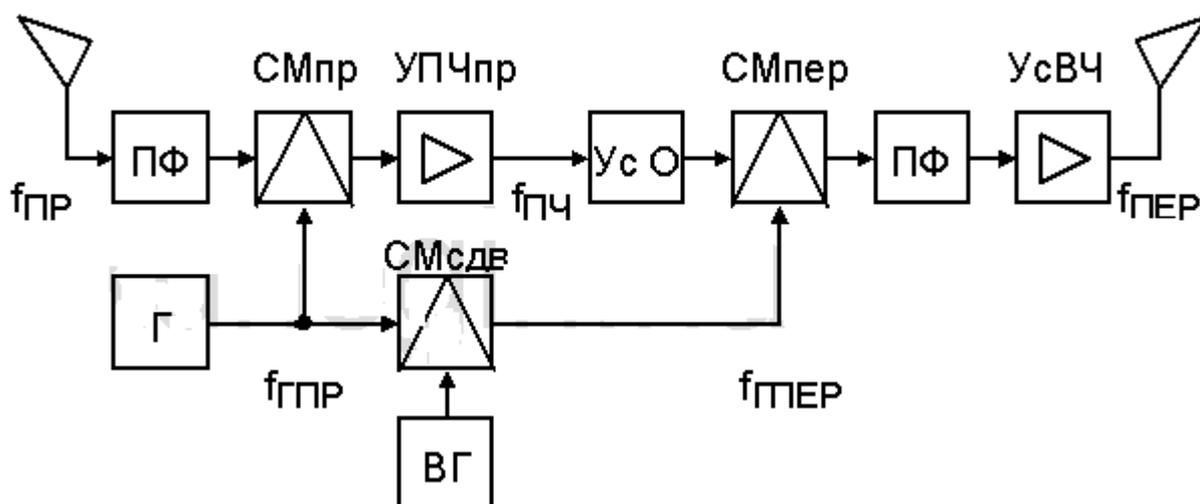


Рис. 9. Приемопередающая аппаратура с обработкой на промежуточной частоте

Применение промежуточной частоты для обработки сигнала позволяет унифицировать аппаратуру усиления сигнала, а также ввода и вывода информационных сигналов на промежуточных, узловых и оконечных станциях.

5. Тропосферные радиорелейные системы передачи

Тропосфера — нижняя часть атмосферы Земли. В тропосфере всегда есть локальные объемные неоднородности, вызванные различными физическими процессами, происходящими в ней. Волны диапазона 0,3—5 ГГц способны рассеиваться этими неоднородностями. Механизм образования тропосферных радиоволн условно показан на рис. 10.

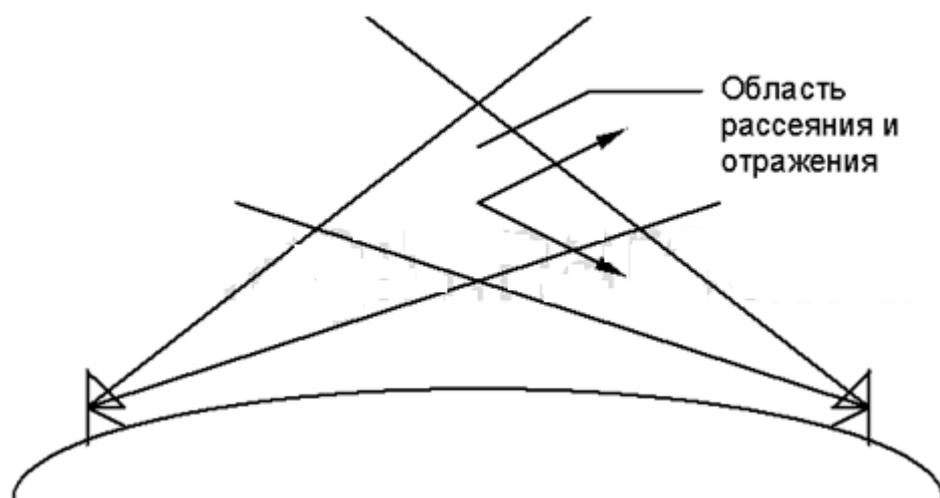


Рис. 10. Принцип тропосферной радиосвязи

Учитывая, что неоднородности находятся на значительной высоте, нетрудно представить, что рассеянные ими радиоволны могут распространяться на сотни километров. Это дает возможность разнести станции на расстояние 200—400 км друг от друга, что значительно больше расстояния прямой видимости.

Линии на основе *тропосферных радиорелейных систем передачи* строятся, как правило, в труднодоступных и удаленных районах.

Значительные расстояния между станциями, безусловно, выгодны при организации протяженных линий, поскольку требуется меньшее число станций. Однако за счет глубоких замираний из-за неустойчивости пространственно-временной структуры тропосферы и крайне малой мощности радиосигнала в точке приема организация хорошего качества связи и значительного количества каналов затруднена.

6. Радиосистемы передачи на декаметровых волнах

Радиосистема передачи, в которой используется отражение декаметровых волн от ионосферы, называется *ионосферной системой передачи на декаметровых волнах*.

В ионосфере происходит, строго говоря, не отражение радиоволны, а поворот ее траектории за счет неоднородности диэлектрических свойств вертикального профиля ионосферы. Траектория распространения радиоволн от одной точки на поверхности Земли к другой с одним отражением от ионосферы называется *ионосферным скачком*. Расстояние между пунктами приема и передачи, измеренное вдоль поверхности Земли, составляет около 2000 км. Траектория распространения радиоволн может быть образована несколькими ионосферными скачками. Условия распространения радиоволн, а следовательно, и качество радиосвязи зависят от состояния ионосферы, определяемого временем года, суток и циклом солнечной активности.

В результате ионосферные системы передачи на декаметровых волнах не позволяют организовать большого числа каналов, и обычно количество каналов не превышает одного-двух телефонных или нескольких телеграфных.

7. Радиосистемы, использующие ионосферное рассеяние радиоволн и отражение от следов метеоров

Радиосистема передачи, в которой используется рассеяние метровых волн на неоднородностях ионосферы, называется *ионосферной системой передачи на метровых волнах*. Образование ионосферных волн в метровом диапазоне во многом сходно с образованием тропосферных волн. Разница заключается в том, что рассеяние происходит не в тропосфере, а в ионосфере на высоте 75—95 км. Предельная дальность связи в этом случае 2000—3000 км, наиболее подходящие частоты 40—70 МГц. При ионосферном рассеянии в пункт приема приходит только ничтожная часть излучаемой энергии, что вынуждает использовать мощные радиопередатчики и большие по размеру антенны. Такие системы позволяют организовать с удовлетворительным качеством до трех телефонных каналов.

В атмосферу Земли непрерывно проникают потоки мелких космических частиц — метеоров. Большинство из них сгорает на высоте 80—120 км, образуя ионизированные следы. Протяженность следа 10—25 км, а время существования от 5 мс до 20 с. Радиосистемы, использующие отражения от следов метеоров,

работают в диапазоне 30—70 МГц. Время прохождения радиосигналов при метеорной связи составляет только 2—4 ч в сутки.

Обычно с помощью этих радиосистем организуется передача телеграфных сигналов, причем таких, для которых задержка в передаче не играет существенной роли. Метеорные системы передачи применяются для дублирования ионосферных систем на декаметровых волнах в полярных широтах, для связи в метеорологической службе и некоторых других целей.

Лекция № 19 Системы радиосвязи с подвижными объектами

- 1. Профессиональные системы подвижной радиосвязи**
- 2. Системы персонального радиовызова**
- 3. Спутниковые системы связи**
- 4. Сотовые системы связи**
- 5. Стандарты сотовой связи**
- 6. Системы беспроводных телефонов**

Используемые системы радиосвязи с подвижными объектами делятся на следующие классы:

- профессиональные (частные) системы подвижной радиосвязи (PMR, PAMR);
- системы персонального радиовызова (Paging Systems);
- спутниковые системы связи;
- сотовые системы связи (Cellular Radio Systems).

1. Профессиональные системы подвижной радиосвязи

Профессиональные (частные) системы подвижной радиосвязи (PMR — Professional Mobile Radio, PAMR — Public Access Mobile Radio) исторически появились первыми. Системы, обеспечивающие взаимодействие с телефонными сетями общего пользования, получили название частных (PAMR), а не обеспечивающие такого взаимодействия — профессиональных (PMR), т. е. обеспечивающих связью замкнутую группу абонентов.

В первых профессиональных системах передатчик и приемник проектировались для работы на определенной фиксированной частоте. Каждый радиоканал был закреплен за сравнительно небольшой группой абонентов, которые использовали его как общедоступную линию связи (рис. 1, а). Если число абонентов превышало возможности одного канала, образовывали другую группу, за которой закрепляли другой радиоканал.

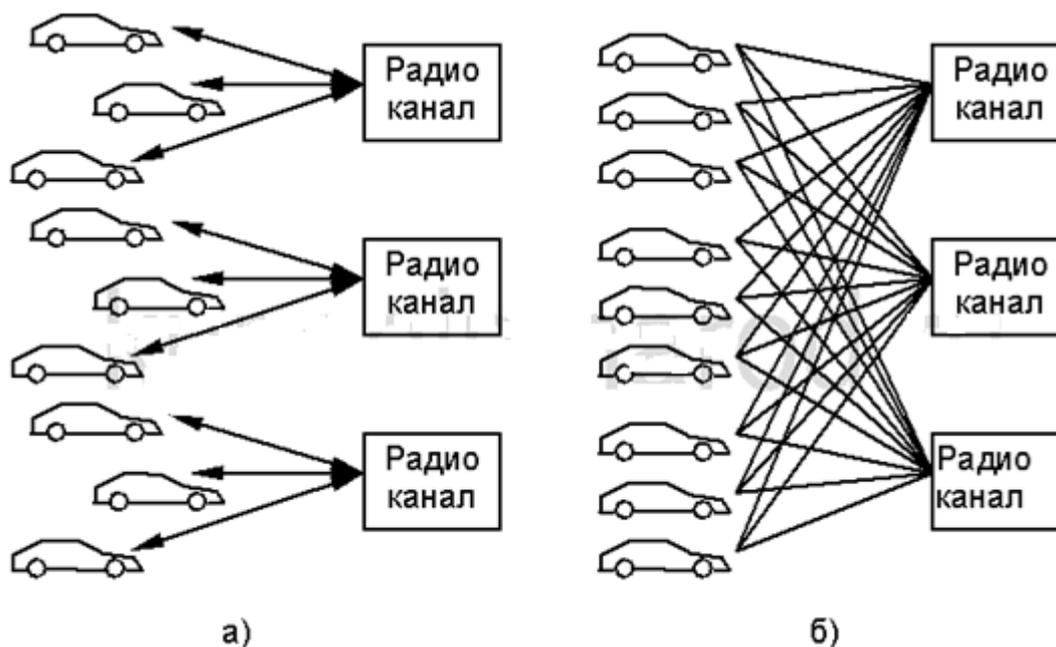


Рис. 1. Профессиональные (частные) системы подвижной радиосвязи

В системе с общедоступным пучком каналов (транкинговые системы) (рис. 1, б) всем абонентам сети доступна целая группа каналов. При поступлении вызова за парой абонентов закрепляется один из свободных в этот момент каналов. После отбоя канал освобождается и может быть предоставлен любой другой паре абонентов.

Технически это выполняется:

- последовательным поиском радиостанцией свободного канала (например, по специальному маркерному сигналу незанятости). Однако такие системы характеризуются значительным временем установления соединения и могут применяться при небольшом количестве каналов (до 5—8);

- специально выделенным общим каналом сигнализации, на который настроены все радиостанции сети в режиме дежурного приема. Такие системы являются наиболее распространенными.

Пропускная способность системы с общедоступным пучком каналов существенно выше, чем системы с закрепленными каналами.

Например, единственный канал при вероятности блокировки (т. е. непредоставления канала из-за его занятости) 10 % и средней продолжительности разговора 2,5 мин на одного абонента в ЧНН позволит обслужить не более двух-трех абонентов. Двадцать таких каналов, используемых порознь, позволят обслужить около 50 абонентов. При тех же условиях система с общедоступным пучком каналов, использующая те же 20 каналов, сможет обслужить уже 420 абонентов, т. е. ее пропускная способность возрастает более чем в 8 раз.

Сети профессиональной радиосвязи проектируются по аналогии с вещательными сетями: достаточно мощный передатчик работает через высоко подвешенную антенну, охватывая территорию в пределах прямой видимости радиусом до 40—50 км. При этом на площади обслуживания в 5—8 тысяч кв. км абонентам может быть доступно несколько десятков радиоканалов.

На изложенном транкинговом принципе действия в 60-х годах была создана отечественная система подвижной связи «Алтай», которая в модернизированном виде функционирует и по настоящее время в диапазоне 330 МГц. Хотя общие тенденции развития отечественных профессиональных систем подвижной радиосвязи отвечали современному мировому уровню, однако, они разрабатывались в соответствии со стандартами России и не были ориентированы на западные стандарты, где уже наметилась тенденция международной стандартизации и унификации оборудования.

Наиболее распространенным видом транкинговых систем являются системы с выделенным каналом управления, использующие международные стандарты МТР 1327, МТР 1317, МТР 1343 и МТР 1347, разработанные первоначально в Великобритании на диапазоны частот 174—225 МГц и распространенные позже на другие диапазоны.

Известны также транкинговые системы с совмещенным каналом управления, когда для передачи сигналов управления используется участок информационной полосы звуковых частот, расположенный ниже спектра частот речевого сигнала — в полосе до 150 Гц. Системы этого вида были разработаны фирмой E. F. Johnson (США) и получили обозначение LTR.

Общей тенденцией развития профессиональных систем подвижной радиосвязи является переход от аналоговых корпоративных или национальных стандартов к цифровым международным стандартам с обеспечением конфиденциальности связи и роуминга абонентов. Эти тенденции прежде всего связаны с внедрением общеевропейского стандарта на транкинговые системы подвижной радиосвязи TETRA, разработанного в рамках ETSI. Системы стандарта TETRA обеспечивают передачу речевых сообщений в цифровой форме, передачу данных и т. д. TETRA обеспечивает прямую связь абонентов без участия базовых станций. Внедрение систем стандарта TETRA в Европе планируется с 1997 года, первоначально в интересах служб безопасности, полиции и охраны границ.

Однако, эффективность транкинговых систем с радиальной структурой сети оказывается недостаточной для удовлетворения массового спроса на услуги подвижной связи в густонаселенных районах.

Так, для Москвы с ее 10-миллионным населением обеспечение только 0,1 % жителей подвижной связью при стандартных условиях качества обслуживания (средняя длительность переговоров 1,5 мин, вероятность блокировки 5 %) потребует выделения примерно 250 радиоканалов или при ширине полосы одного канала в 25 кГц соответственно двух полос частот по 6,25 МГц каждая.

Проблему организации подвижной связи для густонаселенных районов удалось решить путем построения сетей подвижной связи по сотовому принципу.

2. Системы персонального радиовызова

Персональный вызов (пейджинг) — услуга электросвязи, обеспечивающая беспроводную одностороннюю передачу информации в пределах обслуживаемой зоны. По назначению *системы персонального радиовызова* (СПРВ) можно разделить на частные (ведомственные) и общего пользования.

Частные СПРВ обеспечивают передачу сообщений в локальных зонах или на ограниченной территории в интересах отдельных групп абонентов. Как правило, передача сообщений в таких системах осуществляется с пультов управления диспетчерами без взаимодействия с телефонной сетью общего пользования (ТФОП).

Под СПРВ *общего пользования* понимается совокупность технических средств, через которые через ТФОП происходит передача в радиоканале сообщений ограниченного объема. Развитие СПРВ происходит путем внедрения техники автоматического взаимодействия с ТФОП, применения цифровых способов передачи вызовов (адресов) и сообщений в буквенно-цифровом коде, повышения пропускной способности и помехоустойчивости, через миниатюризацию и уменьшение потребления электроэнергии оконечными устройствами.

В настоящее время различными фирмами США, Великобритании, Японии и других стран разработаны многочисленные типы национальных и частных СПРВ. Ключевым фактором в развитии СПРВ явилась стандартизация радиointерфейса.

В 1978 году был впервые опубликован стандарт на код *POCSAG* (Post Office Code Standartization Group) и были сделаны предложения по его широкому внедрению для передачи тональных сообщений. В 1979 году был опубликован код *POCSAG* для передачи цифровых и буквенно-цифровых сообщений со скоростью 512 бит/с, позже скорость была доведена до 1200 и 2400 бит/с. Код *POCSAG* был утвержден МККР в 1982 году (рекомендация 584). Сегодня код *POCSAG* применяется в большинстве существующих СПРВ.

Требования к функциональному развитию сетей СПРВ, увеличению скорости передачи сообщений, а также интеграции национальных сетей СПРВ в транснациональные привели к необходимости разработки в рамках ETSI общеевропейского стандарта на СПРВ, получившего название *ERMES* (European Radio MEssaging System). Стандарт был одобрен в 1992 году.

К основным достоинствам СПРВ *ERMES* относятся:

- общая сеть для всех европейских стран и общеевропейский роуминг;
- общий радиointерфейс, обеспечивающий высокую емкость сети при передаче различных видов сообщений, включая текстовые, в узкой полосе частот;
- общая спецификация на приемники персонального радиовызова.

Предусмотрена возможность интеграции с СПРВ *POCSAG*. Ожидается, что к 2000 году услугами СПРВ *ERMES* будут пользоваться около 100 млн. абонентов.

Новым направлением в развитии СПРВ является разработанный фирмой *Motorola* код *FLEX* и СПРВ на его основе. Основными достоинствами кода и СПРВ *FLEX* по отношению к СПРВ *POCSAG* являются: повышенная скорость передачи сообщений, большая емкость системы, улучшенные характеристики помехоустойчивости канала и обеспечение более экономичного режима работы пейджера. Фирмой представлены пейджеры, поддерживающие все три стандарта — *POCSAG*, *ERMES* и *FLEX*.

Начало внедрения СПРВ в нашей стране относится к 1980 году, когда в Москве в период летних Олимпийских игр была открыта СПРВ на основе оборудования фирмы Multi-Tone (Великобритания).

Второй этап развития СПРВ в России относится к осени 1993 года, когда практически одновременно начали работу компании «Вессо-Линк», «Радио-Пейдж» и «Информ-Эском». В настоящее время услугами СПРВ в Москве пользуются более 60 тысяч абонентов.

3. Спутниковые системы связи

23 апреля 1965 года был запущен на высокую эллиптическую орбиту первый отечественный спутник связи «Молния-1», который ознаменовал становление в нашей стране спутниковой радиосвязи. Почти одновременно в США был запущен на геостационарную орбиту первый спутник коммерческой связи Intelsat-1.

Таким образом, была реализована заманчивая идея резкого увеличения дальности радиосвязи благодаря размещению ретранслятора высоко над поверхностью Земли, что позволило обеспечить одновременную радиовидимость расположенных в разных точках обширной территории радиостанций. Преимуществами систем спутниковой связи (СС) являются большая пропускная способность, глобальность действия и высокое качество связи.

Конфигурация систем СС зависит от типа искусственного спутника Земли (ИСЗ), вида связи и параметров земных станций. Для построения систем СС используются в основном три разновидности ИСЗ (рис. 2) — на высокой эллиптической орбите (ВЭО), геостационарной орбите (ГСО) и низковысотной орбите (НВО). Каждый тип ИСЗ имеет свои преимущества и недостатки.

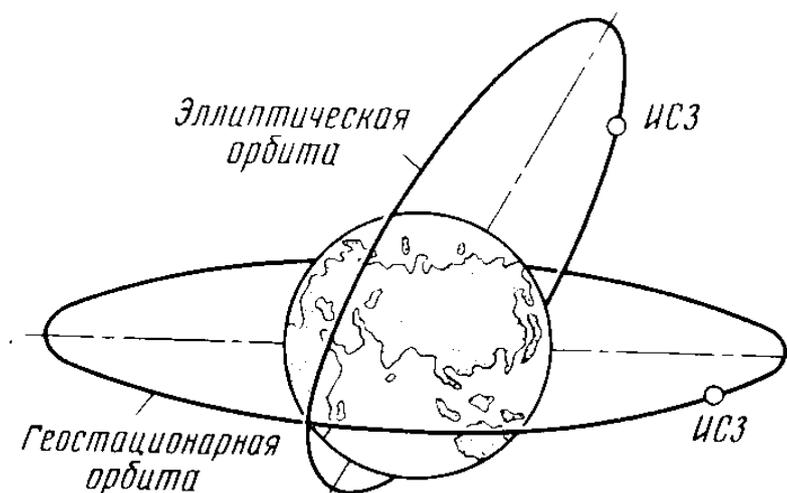


Рис. 2. Виды орбит ИСЗ

Примером ИСЗ с ВЭО могут служить отечественные спутники типа «Молния» с периодом обращения 12 часов, наклоном 63° , высотой апогея над северным полушарием 40 тысяч км. Движение ИСЗ в области апогея замедляется, при этом длительность радиовидимости составляет 6—8 ч. Преимуществом данного типа ИСЗ является большой размер зоны обслуживания при охвате большей части северного полушария. Недостатком ВЭО является необходимость слежения

антенн за медленно дрейфующим спутником и их переориентирования с заходящего спутника на восходящий.

Уникальной орбитой является ГСО — круговая орбита с периодом обращения ИСЗ 24 часа, лежащая в плоскости экватора, с высотой 35875 км от поверхности Земли. Орбита синхронна с вращением Земли, поэтому спутник оказывается неподвижным относительно земной поверхности. Достоинства ГСО: зона обслуживания составляет около трети земной поверхности, трех спутников достаточно для почти глобальной связи, антенны земных станций практически не требуют систем слежения. Однако в северных широтах спутник виден под малыми углами к горизонту и вовсе не виден в приполярных областях.

«Низколеты» запускаются на круговые орбиты, плоскость которых наклонена к плоскости экватора (полярные и квазиполярные орбиты) с высотой порядка 200—2000 км над поверхностью Земли. Запуск легкого ИСЗ на низкую орбиту может быть осуществлен с помощью недорогих пусковых установок. Однако скорость перемещения ИСЗ относительно поверхности Земли достаточно велика, в результате длительность сеанса от восхода спутника до его захода не превышает несколько десятков минут.

Диапазоны рабочих частот систем СС различны для участков Земля-ИСЗ и ИСЗ-Земля и лежат в пределах 2—40 ГГц.

Для систем СС существуют некоторые особенности передачи сигналов:

— запаздывание сигналов — для геостационарной орбиты около 250 мс в одном направлении. Является одной из причин появления эхосигналов при телефонных переговорах;

— эффект Доплера — изменение частоты сигнала, принимаемого с

движущегося источника. Для скоростей много меньших скорости света $\frac{v}{c} \ll 1$

$$f = \frac{f_0}{1 \pm \frac{v}{c}}$$

изменение частоты составляет $\frac{v}{c}$. Наиболее сильно эффект Доплера проявляется для ИСЗ, использующих негеостационарные орбиты.

В зависимости от назначения системы СС и типа земных станций различаются следующие службы:

— фиксированная спутниковая служба для связи между станциями, расположенными в определенных фиксированных пунктах, а также распределения телевизионных программ;

— подвижная спутниковая служба для связи между подвижными станциями, размещаемыми на транспортных средствах (самолетах, морских судах, автомобилях и пр.);

— радиовещательная спутниковая служба для непосредственной передачи радио и телевизионных программ на терминалы, находящиеся у абонентов.

Наиболее популярными российскими системами спутниковой связи являются Глобалсат, Гонец, Курьер, Паллада, Сигнал, Банкир, Ямал, Урал.

В зависимости от вида предоставляемых услуг системы спутниковой связи можно разделить на три основных класса:

- системы пакетной передачи данных (факсимильных сообщений, компьютерных данных, автоматизированного сбора данных о состоянии объектов, например транспортных средств);
- системы радиотелефонной связи (требуется непрерывная связь, осуществляемая в цифровом виде, с задержкой сигнала $< 0,3$ с);
- системы для определения местоположения (координат) потребителей (используется во всех видах навигации).

Структура спутниковых каналов передачи данных представлена на рис. 3. Наземная часть системы представлена комплексами, в состав которых входят центральная станция (ЦС) и абонентские пункты (АП).

Связь ЦС со спутником происходит по радиоканалу (пропускная способность 2 Мбит/с) через направленную антенну диаметром 1—3 м и приемопередающую аппаратуру. АП подключаются к ЦС с помощью многоканальной аппаратуры (возможна и связь через телефонные линии) или по радиоканалу. АП, которые соединяются по радиоканалу (это подвижные или труднодоступные объекты), имеют свои антенны, и для каждого АП выделяется своя частота.

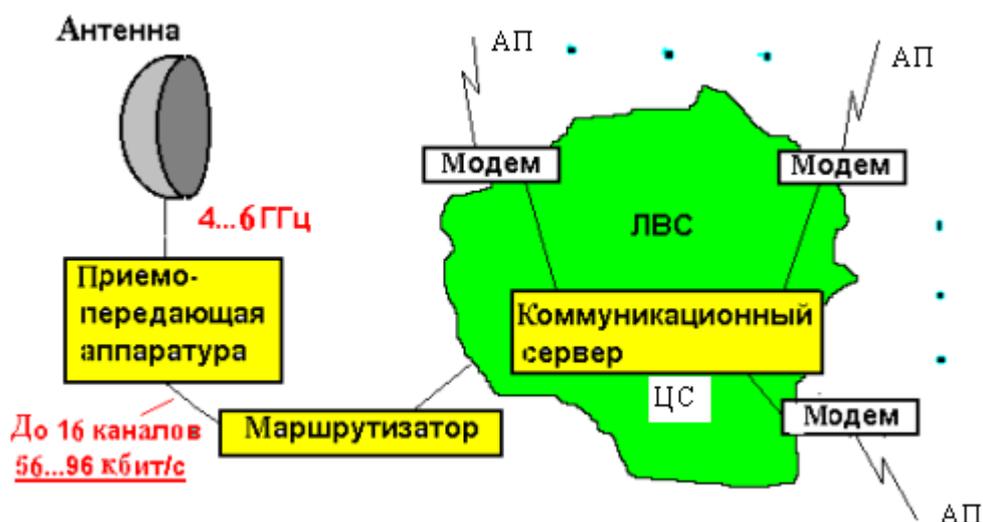


Рис. 3. Схема спутниковой связи

4. Сотовые системы связи

Наиболее стремительно развиваются системы сотовой связи. Их внедрение решило проблему экономичного использования выделенной полосы радиочастот путем передачи сообщений на одних и тех же частотах, и увеличило пропускную способность телекоммуникационных сетей. Свое название они получили в соответствии с сотовым принципом организации связи: зона обслуживания (территория города или региона) делится на ячейки (соты) радиусом, например, 1—2 км. Радиус ячейки зависит от мощности передатчика и определяется разработчиком системы, который в процессе проектирования должен выбрать подходящую размерность.

Принципом работы сотовой связи, является повторное использование частот в несмежных сотах, это определяет высокую эффективность использования частотного спектра в сотовых системах связи.

Каждая из сот обслуживается многоканальным приемопередатчиком, который называется базовой станцией и служит интерфейсом между сотовым телефоном и центром коммутации подвижной связи (рис. 4). Количество каналов базовой станции обычно кратно 8, например 8, 16, 32...

Один из каналов является управляющим (канал вызова). На нем происходит непосредственное установление соединения при вызове подвижного абонента сети, а сам разговор начинается только после того, как будет найден свободный в данный момент канал и произойдет переключение на него. Все эти процессы происходят очень быстро и потому незаметно для абонента.

Базовые станции, на которых допускается повторное использование выделенного набора частот, удалены друг от друга на расстояние, называемое защитным интервалом. Теоретически можно использовать одинаковые частоты и в соседних сотах. Но на практике зоны обслуживания могут перекрываться под действием различных факторов, например вследствие изменения условий распространения радиоволн. Поэтому в соседних сотах используются различные частоты.

Смежные базовые станции, использующие различные частотные каналы, образуют группу из C — станций (≈ 7 сот). Если каждой базовой станции выделяется m каналов с шириной полосы каждого F_k , то общая ширина полосы F , занимаемая данной системой сотовой связи, составит:

$$F = F_k m C,$$

где F_k — ширина полосы частот канала; m — количество каналов; C — количество станций.

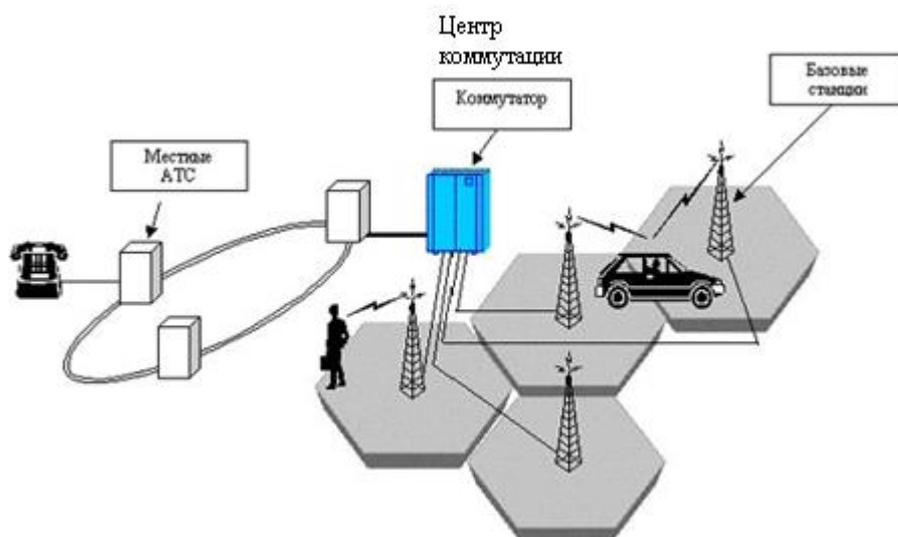


Рис. 4. Схема системы сотовой связи с подвижными объектами

При использовании сот меньших размеров можно увеличить повторяемость частот. Применение шестиугольных сот позволяет минимизировать ширину используемой полосы частот.

Базовые станции соединены с центром коммутации (коммутатором) по выделенным проводным каналам связи. Коммутатор — это автоматическая телефонная станция (АТС) системы сотовой связи, которая управляет сетью:

- осуществляет постоянное слежение за подвижными абонентами;
- организует их эстафетную передачу, в процессе которой достигается непрерывность связи при перемещении подвижного абонента из соты в соту. Разговор переключается на свободный канал другой базовой станции, в зоне которой оказался абонент;

- производит соединение подвижного абонента с тем, кто ему необходим в обычной телефонной сети.

Система сотовой связи работает по следующему алгоритму:

- режим ожидания (состояние «трубка положена» обычного телефона);
- набор номера — радиотелефон занимает один из свободных каналов, уровень сигнала базовой станции в котором в данный момент максимален;

- для вызова соответствующего абонента всеми базовыми станциями по управляющим каналам передается сигнал вызова;

- сотовый телефон вызываемого абонента при получении этого сигнала отвечает по одному из свободных каналов управления;

- базовые станции, принявшие ответный сигнал, передают информацию о его параметрах в центр коммутации, который переключает разговор на ту базовую станцию, где зафиксирован максимальный уровень сигнала сотового радиотелефона вызываемого абонента — происходит начало разговора;

- в случае если один (оба) абонента находятся в движении, при их удалении от базовой станции происходит автоматическое переключение на другой канал.

Полномасштабное развертывание сотовой сети с самого начала ее ввода в эксплуатацию представляется чрезвычайно дорогостоящим. Обычно ее развертывание начинается с небольшого числа крупных ячеек, которые через некоторое время постепенно трансформируются в большее число более мелких ячеек. Такой способ преобразования называется расщеплением. Когда в некоторой ячейке нагрузка достигает того уровня, при котором существующее в ней число каналов оказывается недостаточным для поддержания установленного качества обслуживания абонентов (т. е. вероятность непредоставления канала при поступлении вызова оказывается больше установленного значения, как правило, до 5 %), эта ячейка разделяется на несколько более мелких с пониженной мощностью передатчиков. При этом пропускная способность сети на территории расщепленной ячейки увеличивается в число раз, равное числу вновь образованных ячеек. Эта процедура может повторяться до тех пор, пока сеть не достигнет расчетного значения своей пропускной способности.

Ячейки небольших размеров требуются только в центральной части города со значительной плотностью абонентов. Ближе к окраинам плотность снижается, и размеры ячеек могут увеличиваться. Расщепление ячеек может производиться достаточно гибко как в пространстве, так и во времени. По замыслу разработчиков сотовой системы она должна явиться чрезвычайно удобным средством в руках проектировщиков для возможности повышения пропускной способности именно там и именно в то время, где и когда это необходимо.

5. Стандарты сотовой связи

Стандарт сотовой связи — это система технических параметров и соглашений для обеспечения функционирования системы сотовой связи.

В России сотовые сети развиваются на базе использования пяти основных стандартов: двух аналоговых (NMT-450, AMPS) и трех цифровых (GSM, D-AMPS, CDMA).

NMT-450i (Nordic Mobile Telephone) — аналоговый стандарт. Все российские NMT-Операторы образуют сеть CoТел (сотовый телефон России).

Считается, что качество NMT-связи плохое. Это не так. Качество связи — это понятие комплексное: зона покрытия, чувствительность, легкость дозвона, качество звука, устойчивость соединения и т. д., поэтому качество связи надо рассматривать по отдельным параметрам. Все эти параметры у NMT-450i не хуже, чем у цифровых стандартов.

NMT-звук более естественный по сравнению с цифровыми стандартами, нет цифрового «бульканья», «кваканья» и провалов при неправильной оцифровке звука. Если при плохой аналоговой связи как-то можно понять собеседника, даже сквозь треск и шум, а вот при плохой цифровой связи, при неправильной оцифровке звука понять нельзя ничего.

NMT-связь устойчивая, разрывает редко, имеет большую площадь покрытия.

К недостаткам стандарта NMT можно отнести «привязку» телефона к Оператору, маленький выбор телефонов, большой их размер, завышенные цены на них.

GSM (Global System for Mobile communications) — современный цифровой стандарт. В этом стандарте телефонный номер и вся другая информация об абоненте записана в SIM-карте (Subscriber Identity Module), которая выдаётся абоненту при заключении контракта и может вставляться в любой аппарат GSM нужного диапазона, что делает независимым сам аппарат от Оператора.

Стандарт GSM подразделяется на GSM-450/900/1800/1900 в зависимости от рабочей частоты.

Качество GSM-связи хорошее. Малая избыточность в алгоритмах сжатия GSM-звуча приводит к плохой помехозащищенности GSM — при помехах, даже небольших, правильная оцифровка звука нарушается.

Системы GSM работают в диапазоне около 900 МГц, который разбит на два поддиапазона шириной по 25 МГц (рис. 5): 890—915 МГц для передачи от портативных устройств к базовой станции и 935—960 МГц для приема, т. е. используется организация дуплексной связи с частотным разделением. Каждый частотный поддиапазон разбит на 124 частотных канала с разносом между соседними 200 кГц (ширина полосы каждого частотного канала не превышает 200 кГц). Речевой канал системы GSM использует пару частотных каналов с результирующим разносом 45 МГц независимо от абсолютных значений несущих частот в обоих поддиапазонах. Наличие разноса препятствует появлению переходных помех между направлениями приема и передачи.

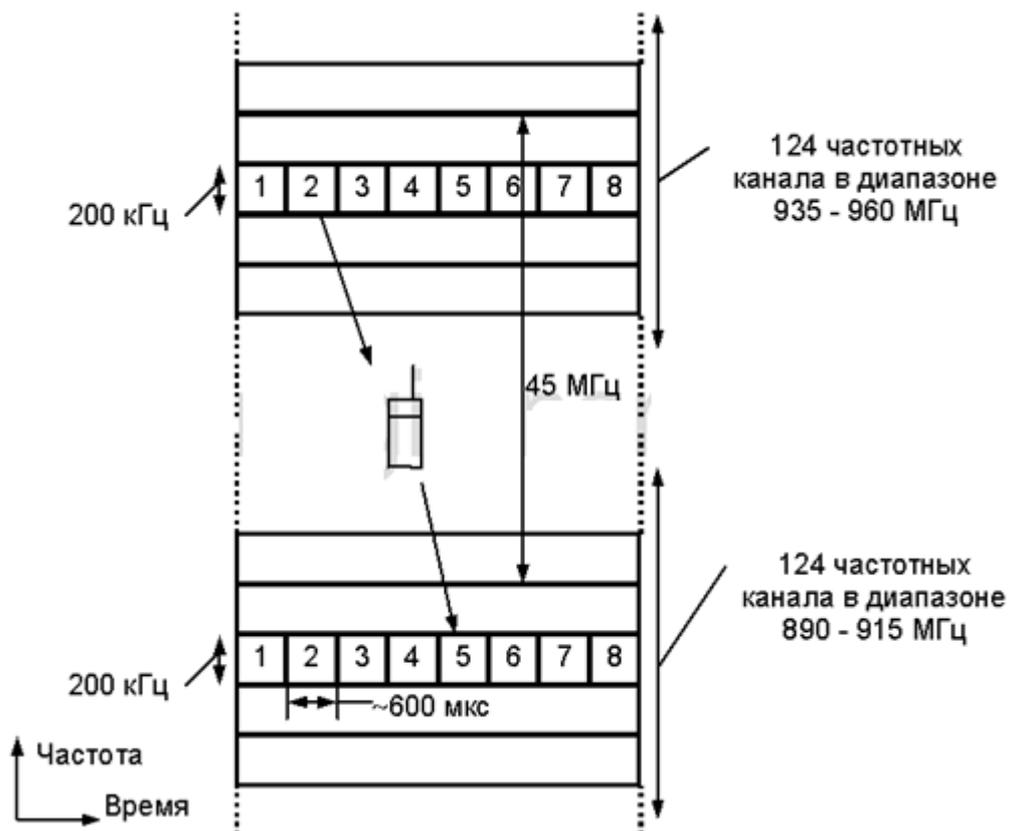


Рис. 5. Временная и частотная структура GSM

В каждом частотном канале данные передаются в 8 канальных интервалах (КИ), т. е. используется временное разделение каналов. Восемь КИ объединяются в цикл, а 26 циклов — в повторяющийся циклически сверхцикл длительностью 120 мс. Длительность КИ составляет около 600 мкс. Структура КИ показана на [рис. 6](#). Конкретное портативное устройство ведет передачу сигнала базовой станции в одном из КИ. В течении остальных КИ передача не ведется (передатчик «молчит»).



Рис. 6. Структура КИ GSM

В начале и конце КИ отводятся по 28 мкс на продолжительность переходных процессов, в ходе которых мощность излучения передатчика меняется (возрастает в начале и падает в конце КИ) на 70 дБ. Полезная продолжительность КИ составляет 546,12 мкс и служит для передачи 148 бит.

В одном из КИ, в котором передача не ведется, портативное устройство осуществляет прием сигнала от базовой станции, т. е. используется одна и та же антенна с разделением во времени.

Расстояния между портативным устройством и базовой станцией в пределах соты может достигать 30 км. В результате задержка распространения сигнала может достигать 100 мкс. Такая задержка серьезно влияет на работу базовой станции, поскольку переданный КИ может частично попасть на соседний. Поэтому базовая станция может посылать команды портативному устройству на опережение передачи, чтобы сигнал поступал на базовую станцию в своем КИ.

Также базовая станция в зависимости от расстояния до портативного устройства может осуществлять регулировку излучаемой мощности последнего с целью уменьшения расхода энергоресурса.

Одной из особенностей работы систем сотовой радиосвязи является прием сигналов в условиях многолучевого распространения (на входе приемника действует совокупность сигнала непосредственно пришедшего от передатчика и сигналов, многократно отразившихся от неровностей рельефа, зданий и т. п.). Многолучевое распространение приводит к таким нежелательным явлениям, как растянутая задержка сигнала, релеевские замирания и пр.

Избежать последствий многолучевого распространения позволяет механизм выравнивания сигналов. Он состоит в делении полезной длительности КИ на три части, в свою очередь разделенные битами флагов. В середине располагается специальная легко распознаваемая синхропоследовательность, по которой производится выравнивание принятого КИ. До и после синхропоследовательности располагаются по 57 бит информационной нагрузки.

Функция эстафетной передачи в GSM. В отличие от централизованного управления, характерного для систем первого поколения, в системе GSM принят принцип распределенного управления между центром коммутации подвижной связи, базовыми станциями и подвижными терминалами. В течение всего сеанса связи подвижные терминалы измеряют уровни сигналов от соседних базовых станций, и результаты измерений сообщают обслуживающей их базовой станции. Последняя определяет необходимость эстафеты и передает информацию о наиболее предпочтительной новой ячейке для обслуживания подвижного объекта системному контроллеру центра коммутации подвижной связи. Благодаря такому алгоритму распределенного управления большая часть работы выполняется не системным контроллером, а базовыми станциями и подвижными терминалами, что позволяет избежать перегрузки центрального звена и упростить процедуру эстафетной передачи.

CDMA (Code Division Multiple Access — множественный доступ с кодовым разделением) — современный цифровой стандарт, по многим техническим характеристикам превосходящий GSM. Одной из особенностей CDMA сетей является возможность «мягкого» перехода от одной базовой станции (БС) к другой (soft handoff). При этом, возможна ситуация когда одного абонента «ведут» сразу несколько БС. Абонент просто не заметит, что его «передали» другой БС. Естественно, чтобы такое стало возможным, необходима точная синхронизация БС. В коммерческих системах это достигается использованием сигналов времени

от GPS (Global Positioning System) американской спутниковой системы определения координат.

Качество связи CDMA — насыщенный звук, устойчивая связь. Недостатки: дорогие телефоны, ограниченная зона покрытия.

CDMA имеет несколько особенностей:

Первая — у каждого абонента свой код, который не может быть использован другими, независимо от того, разговаривает ли абонент, находится в режиме ожидания звонка или вообще выключил телефон. Поэтому, повременная оплата не имеет смысла. Это прямая конкуренция проводным линиям связи, не говоря уже о сотовых операторах.

Вторая — высокий уровень конфиденциальности CDMA. Подслушать из эфира разговор можно, но стоимость и сложность оборудования способного на такое значительно выше, чем для других стандартов. Причем дело усугубляется тем, что при незначительном удалении от БС мощность излучаемая телефоном крайне низка, поэтому подслушивающий должен находиться в непосредственной близости от объекта наблюдения, а при значительном удалении от БС вообще не понятно через какую БС работает телефон.

6. Системы беспроводных телефонов

Системы беспроводных телефонов (Cordless Telephony) общего пользования составляют значительную конкуренцию сотовым системам связи. Первоначально системы беспроводных телефонов были ориентированы на ограниченное по территории использование в условиях квартир и офисов. Позже они стали развиваться как системы общего пользования.

Рассмотрим подробнее *характеристики общеевропейской системы беспроводных телефонов DECT*. Стандарт DECT (Digital European Cordless Telecommunications) был опубликован ETSI в 1992 году, а первые коммерческие продукты, соответствующие этому стандарту, появились в 1993 году.

Первоначально они представляли собой в основном средства для построения беспроводных учрежденческих АТС, а также домашние беспроводные телефоны. Позднее появились другие приложения DECT. В их состав вошли: средства систем местной радиосвязи (RLL — Radio in the Local Loop); системы, обеспечивающие беспроводный доступ к ресурсам сетей общего пользования для абонентов с ограниченной мобильностью (CTM — Cordless Terminal Mobility); средства, позволяющие аппаратуре DECT работать с сотовыми сетями (например, GSM).

Особенностью стандарта DECT является гарантия возможности «сосуществования» систем связи на одной территории при отсутствии координации их работы и необходимости планирования частот, что необходимо в обычных сотовых сетях.

Стандарт DECT разрабатывался для удовлетворения сложной системы радиосвязи — беспроводной учрежденческих АТС. Среда беспроводной учрежденческой АТС характеризуется высокой плотностью трафика и строгими требованиями к качеству и конфиденциальности связи. Системы DECT в качестве алгоритма преобразования речи используют АДИКМ со скоростью передачи 32

кбит/с, что обеспечивает качество передачи речи такое же, как у стационарных стандартных телефонных сетей.

Системы DECT работают в диапазоне 1880—1900 МГц, который разбит на 10 частотных каналов. В каждом частотном канале данные передаются циклически в 24 канальных интервалах (КИ). В первой половине КИ осуществляется передача от базовой станции к портативным устройствам, а во второй половине — в обратном направлении, т. е. применяется организация дуплексной связи с временным разделением. Каждый из речевых каналов использует пару КИ, что означает возможность применения 120 речевых каналов (рис. 7).

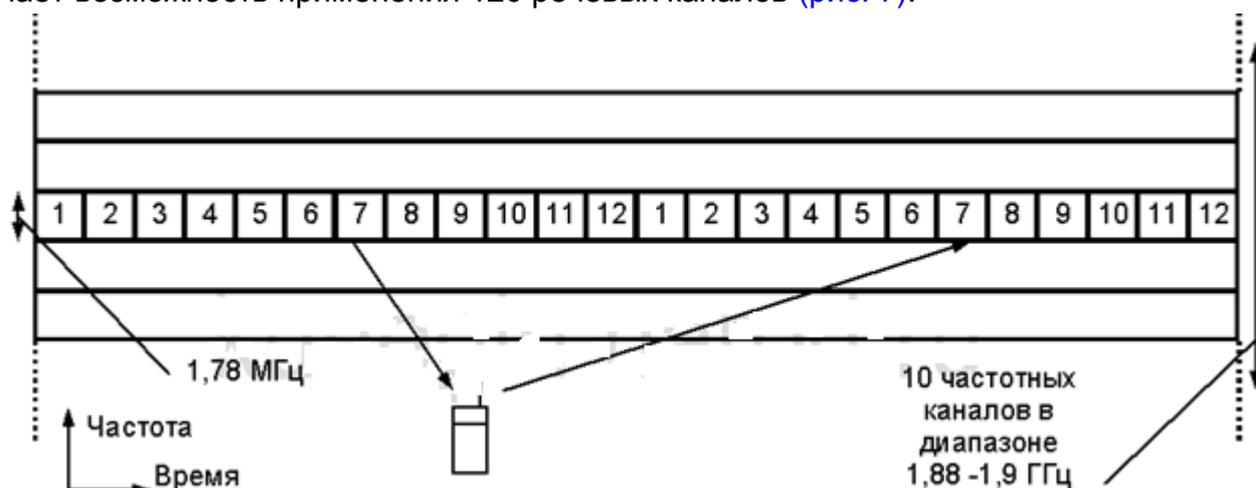


Рис. 7. Структура кадра системы DECT

Механизм выбора каналов, известный как *непрерывный динамический выбор канала* (Continuous Dynamic Channel Selection — CDCS), позволяет системам функционировать «бок о бок» при отсутствии координирования их работы. Любое из портативных устройств DECT в принципе имеет доступ к любому из 120 каналов. Когда необходимо установить соединение, портативное устройство DECT выбирает канал, обеспечивающий наиболее качественную связь. После того как соединение установлено, данное устройство продолжает анализировать диапазон, и если обнаруживается канал, гарантирующий лучшее качество связи, то переключает соединение на него. Старое и новое соединение перекрываются во времени, что обеспечивает возможность незаметного переключения. В системах DECT не требуется планирования частот: решение этой проблемы, фактически, перекладывается на портативное устройство связи.

Стандарт DECT предусматривает функции защиты, такие как шифрование и аутентификацию.

Вопросы

Раздел 1. Теория сигналов и основные понятия теории передачи данных

Понятие «сигнал»
Математическое описание и математические модели сигналов
Шумы и помехи
Классификация сигналов
Типы сигналов
Преобразования типа сигналов
Локальные и глобальные вычислительные сети
Модель открытых систем OSI
Основные понятия теории передачи данных
Классификация систем передачи данных
Аппаратура линий связи
Типы линий связи и стандарты кабелей
Проблема электромагнитной совместимости
Характеристики линий связи
Требования, предъявляемые к системам передачи данных

Восстановление искаженных сигналов
Фильтрация изображений
Энтропия источника информации. Информационная емкость сигналов
Модель дискретного канала
Классификация дискретных каналов
Пропускная способность дискретного канала передачи данных
Пропускная способность непрерывного канала передачи данных

Раздел 2. Методы передачи данных на физическом уровне и технологии передачи данных на канальном уровне

Модуляция
Методы аналоговой модуляции
Методы дискретной модуляции
Требования, предъявляемые к методам цифрового кодирования
Методы цифрового кодирования
Методы логического кодирования

Принципы помехоустойчивого кодирования
Модели ошибок
Обнаружение ошибок
Исправление ошибок
Информационный предел избыточности
Эффективное кодирование

Виды связи и режимы передачи данных
Передача с установлением логического соединения и без установления логического соединения
Методы обнаружения ошибок
Методы восстановления искаженных и потерянных кадров
Компрессия (сжатие) данных

Раздел 3. Методы коммутации и современные системы передачи данных

Принципы построения систем коммутации и структура коммутационного узла
Передача данных в системах с коммутацией каналов

Передача данных в системах с коммутацией пакетов
Передача данных в системах с коммутацией сообщений
Обеспечение дальности связи
Нумерация абонентских линий на телефонных сетях
Основы теории телефонного сообщения
Аппаратура передачи речи
Коммутационные приборы
Управляющие устройства автоматических телефонных станций
Телефонная сигнализация
Применение телефонных сетей для передачи данных
Классификация модемов
Режимы работы модема
Устройство модемов
Устойчивость работы модемов
Факсимиле (факс). Принцип работы факсимильного аппарата
Телематические службы
Телевизионные системы
Сеть Internet

Радиолинии и системы передачи сообщений с радиоканалами
Радиопередающие устройства и радиоприемные устройства
Антенны и фидеры
Радиорелейные системы передачи
Тропосферные радиорелейные системы передачи
Радиосистемы передачи на декаметровых волнах
Радиосистемы, использующие ионосферное рассеяние

Профессиональные системы подвижной радиосвязи
Системы персонального радиовызова
Спутниковые системы связи
Сотовые системы связи
Стандарты сотовой связи
Системы беспроводных телефонов

Методические указания к лабораторным работам

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИСКАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ

Цель работы: ознакомление с алгоритмами восстановления (сглаживания) информационных сигналов на этапе предварительной обработки данных.

Теоретические сведения

Сигнал, передаваемый по любой среде передачи, подвергается воздействию затухания, ограниченности полосы пропускания, задержки передачи и шумов. Линия связи искажает передаваемые сигналы из-за того, что ее физические параметры отличаются от идеальных. Если линия связи включает промежуточную аппаратуру, то она также может вносить дополнительные искажения, так как невозможно создать устройства, которые бы одинаково хорошо передавали весь спектр синусоид, от нуля до бесконечности. Кроме искажений сигналов, вносимых внутренними физическими параметрами линии связи, существуют и внешние помехи. Эти помехи создают различные электрические двигатели, электронные устройства, атмосферные явления и т. д.

Шумы постоянно присутствуют в реальном канале. В отсутствие передаваемого сигнала в идеальной линии связи должен быть нулевой уровень электрического сигнала. Однако на практике в линии имеют место случайные всплески даже тогда, когда никакой сигнал не передается. Эти всплески называют уровнем шумов в линии, и в пределе по мере затухания передаваемого сигнала его уровень становится сравнимым с уровнем шума. Важным параметром, связанным со средой передачи является отношение мощности полученного сигнала P_S к мощности уровня шумов P_N : $SNP = P_S / P_N$. Отношение S/N называют отношением сигнал-шум и обычно выражают в децибелах: $S/N = 10 \lg(SNP)$. Очевидно, что высокое значение отношения свидетельствует о высокой мощности сигнала по отношению к имеющемуся уровню шумов и поэтому характеризует сигнал хорошего качества. Наоборот, низкое значение отношения S/N свидетельствует о сигнале низкого качества.

Белый шум — подразумевает наличие сигнала на всех частотах, который к тому же меняется по амплитуде. Мощность в таком сигнале одинакова на всех частотах. Амплитуда на любой отдельно взятой частоте изменяется в широких пределах. Это изменение подчиняется закону распределения энергии в сигнале, известному как распределение Гаусса. На деле, это означает, что большую часть времени сигнал имеет «усредненный» уровень, но может существенно изменяться как в большую, так и в меньшую сторону по случайному закону.

Высокочастотные помехи — это неопределенный по амплитуде и длительности сигнал в диапазоне от 100 Гц до 100 МГц, который искажает синусоиду напряжения в сети и, таким образом, негативно влияет на работу любого электрооборудования. Источниками высокочастотных помех являются различные электрические устройства: электродвигатели, генераторы, сварочные аппараты и т. п. Помехи такого рода подавляются путем установки режекторного (заградительного) фильтра.

Степень искажения синусоидальных сигналов линиями связи оценивается с помощью таких характеристик, как амплитудно-частотная характеристика, полоса пропускания и затухание на определенной частоте.

Амплитудно-частотная характеристика показывает, как затухает амплитуда синусоиды на выходе линии связи по сравнению с амплитудой на ее входе для всех возможных частот передаваемого сигнала. Знание амплитудно-частотной характеристики реальной линии позволяет определить форму выходного сигнала практически для любого входного сигнала. Для этого необходимо найти спектр входного сигнала, преобразовать амплитуду составляющих его гармоник в соответствии с амплитудно-частотной характеристикой, а затем найти форму выходного сигнала, сложив преобразованные гармоники.

Полоса пропускания — это непрерывный диапазон частот, для которого отношение амплитуды выходного сигнала ко входному превышает некоторый заранее заданный предел, обычно 0,5. То есть полоса пропускания определяет диапазон частот синусоидального сигнала, при которых этот сигнал передается по линии связи без значительных искажений. Ширина полосы пропускания в наибольшей степени влияет на максимально возможную скорость передачи информации по линии связи.

Затухание определяется как относительное уменьшение амплитуды или мощности сигнала при передаче по линии сигнала определенной частоты. Таким образом, затухание представляет собой одну точку из амплитудно-частотной характеристики линии. Часто при эксплуатации линии заранее известна основная частота передаваемого сигнала, то есть та частота, гармоника которой имеет наибольшую амплитуду и мощность. Поэтому достаточно знать затухание на этой частоте, чтобы приблизительно оценить искажения передаваемых по линии сигналов.

Таким образом, амплитудно-частотная характеристика, полоса пропускания и затухание являются универсальными характеристиками, и их знание позволяет сделать вывод о том, как через линию связи будут передаваться сигналы любой формы.

В результате действия шумов и помех на этапе предварительной обработки полученной информации необходимо произвести восстановление искаженного исходного сигнала. Процедура восстановления, повышения достоверности данных, снижения уровня помех называется *сглаживанием*.

В качестве алгоритма предварительной обработки данных обычно используется *процедура сглаживания по методу скользящего среднего*. При проведении операции восстановления зашумленного сигнала по трем точкам значения сигнала в первой и последней точках интервала дискретизации приравниваются значениям искаженного сигнала в соответствующих точках:

$f_1^{(3)} = f_1$, $f_{last}^{(3)} = f_{last}$. Тогда значения восстановленного сигнала в остальных промежуточных точках определяется по следующей формуле:

$$f_i^{(3)} = (f_{i-1} + f_i + f_{i+1})/3.$$

При сглаживании зашумленного сигнала по *пяти точкам*:

$$f_1^{(5)} = f_1, \quad f_2^{(5)} = f_2,$$

$$f_{last-1}^{(5)} = f_{last-1}, \quad f_{last}^{(5)} = f_{last},$$

$$f_i^{(5)} = (f_{i-2} + f_{i-1} + f_i + f_{i+1} + f_{i+2})/5.$$

Также эффективного снижения уровня помех можно достичь применением *метода наименьших квадратов*, который обеспечивает аппроксимацию исходного сигнала суммой степенных или тригонометрических функций.

Для этого требуется найти коэффициенты C_0, C_1, \dots, C_m линейной комбинации:

$$L(t) = C_0 \varphi_0(t) + C_1 \varphi_1(t) + C_2 \varphi_2(t) + \dots + C_m \varphi_m(t),$$

таким образом, чтобы обеспечить близость кривой $L(t)$ и заданной функции. Коэффициенты определяются из следующего матричного уравнения:

$$C = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot f,$$

где f — заданная зашумленная функция; A — прямоугольная матрица размерностью $(n+1) \times (m+1)$; n — количество точек заданной функции f ; m — порядок функции, используемой для аппроксимации сигнала.

Матрица A имеет следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} \varphi_0(t_0) & \varphi_1(t_0) & \dots & \varphi_m(t_0) \\ \varphi_0(t_1) & \varphi_1(t_1) & \dots & \varphi_m(t_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_0(t_n) & \varphi_1(t_n) & \dots & \varphi_m(t_n) \end{bmatrix}.$$

При использовании для аппроксимации степенных функций $L(t)$ будет иметь вид: $L(t) = C_0 t^0 + C_1 t^1 + C_2 t^2 + \dots + C_m t^m$, а матрица A :

$$A = \begin{bmatrix} t_0^0 & t_0^1 & \dots & t_0^m \\ t_1^0 & t_1^1 & \dots & t_1^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_n^0 & t_n^1 & \dots & t_n^m \end{bmatrix}.$$

При использовании тригонометрических функций (параметр $T = 2$):

$$L(t) = C_0 + C_1 \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) + C_2 \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right) + C_3 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + C_4 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + \dots,$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \sin\left(\frac{\pi t_0}{T}\right) & \cos\left(\frac{\pi t_0}{T}\right) & \sin\left(\frac{2\pi t_0}{T}\right) & \cos\left(\frac{2\pi t_0}{T}\right) & \dots & \sin\left(\frac{m\pi t_0}{T}\right) & \cos\left(\frac{m\pi t_0}{T}\right) \\ 1 & \sin\left(\frac{\pi t_1}{T}\right) & \cos\left(\frac{\pi t_1}{T}\right) & \sin\left(\frac{2\pi t_1}{T}\right) & \cos\left(\frac{2\pi t_1}{T}\right) & \dots & \sin\left(\frac{m\pi t_1}{T}\right) & \cos\left(\frac{m\pi t_1}{T}\right) \\ \dots & \dots \\ 1 & \sin\left(\frac{\pi t_n}{T}\right) & \cos\left(\frac{\pi t_n}{T}\right) & \sin\left(\frac{2\pi t_n}{T}\right) & \cos\left(\frac{2\pi t_n}{T}\right) & \dots & \sin\left(\frac{m\pi t_n}{T}\right) & \cos\left(\frac{m\pi t_n}{T}\right) \end{bmatrix}$$

Задание.

1. Сформировать временную функцию $f(t)$, описывающую некоторый информационный сигнал и зашумленную высокочастотными помехами и белым шумом в следующем виде:

$$f(t) = f_{\text{пол}}(t) + f_{\text{пом}}(t) + f_{\text{ш}}(t),$$

$$f_{\text{пом}}(t) = \sum_{i=1}^3 A_i^{\text{пом}} \cdot \sin(\omega_i^{\text{пом}} \cdot t)$$

где $A_i^{\text{пом}}$ — высокочастотные помехи;

$f_{\text{ш}}(t) = A_{\text{ш}}(\text{rnd}(2) - 1)$ — белый шум; $\text{rnd}(2)$ — функция, генерирующая случайные числа в интервале от 0 до 2, тогда при использовании $(\text{rnd}(2) - 1)$ случайные числа выбираются из интервала от -1 до 1 .

На основе данной зависимости сформировать массив значений функций, состоящий из 40—60 точек, моделирующий результат измерения информационного сигнала.

Построить графики полезного и зашумленного сигналов, а также график погрешности (разница между полезным и зашумленным сигналами).

2. Реализовать процедуры сглаживания сигнала по методу скользящего среднего по двум схемам (по трем и по пяти точкам).

Сравнить графики функций полезного и восстановленного по этим методам сигналов. Сравнить графики погрешностей методов. Сделать выводы о качестве сглаживания.

3. Реализовать процедуры сглаживания сигнала по методу наименьших квадратов при использовании степенных и тригонометрических функций.

Сравнить графики функций полезного и восстановленного по этим методам сигналов. Сравнить графики погрешностей методов. Сделать выводы о качестве сглаживания.

4. Сравнить результаты сглаживания по методам скользящего среднего и наименьших квадратов. Построить графики погрешностей — разницу между полезным сигналом и наилучшими результатами пунктов 2 и 3.

5. Сделать выводы по лабораторной работе.

Варианты.

Варианты функций информационного (полезного) сигнала

1. $f_{\text{пол}}(t) = \sum_{i=1}^3 A_i^{\text{пол}} \cdot e^{\alpha_i \cdot t} + \sum_{i=1}^3 B_i^{\text{пол}} \cdot \sin(\omega_i^{\text{пол}} \cdot t + \varphi_i),$
2. $f_{\text{пол}}(t) = \sum_{i=1}^3 A_i^{\text{пол}} \cdot e^{\alpha_i \cdot t} + \sum_{i=1}^3 B_i^{\text{пол}} \cdot \cos(\omega_i^{\text{пол}} \cdot t + \varphi_i),$
3. $f_{\text{пол}}(t) = \sum_{i=1}^3 A_i^{\text{пол}} \cdot e^{\alpha_i \cdot t} + \sum_{i=1}^3 B_i^{\text{пол}} \cdot \sin(\omega_i^{\text{пол}} t + \varphi_i) + \sum_{i=1}^3 C_i^{\text{пол}} \cdot \cos(\omega_i^{\text{пол}} t + \varphi_i),$
4. $f_{\text{пол}}(t) = \sum_{i=1}^3 A_i^{\text{пол}} \cdot e^{\alpha_i \cdot t} + \sum_{i=1}^3 B_i^{\text{пол}} \cdot \sin(\omega_i^{\text{пол}} \cdot t + \varphi_i) + \sum_{i=1}^3 C_i^{\text{пол}} \cdot e^{\alpha_i \cdot t},$
5. $f_{\text{пол}}(t) = \sum_{i=1}^3 B_i^{\text{пол}} \cdot \sin(\omega_i^{\text{пол}} \cdot t + \varphi_i) + \sum_{i=1}^3 C_i^{\text{пол}} \cdot \cos(\omega_i^{\text{пол}} \cdot t + \varphi_i),$
6. $f_{\text{пол}}(t) = \sum_{i=1}^3 A_i^{\text{пол}} \cdot e^{\alpha_i \cdot t} + \sum_{i=1}^3 B_i^{\text{пол}} \cdot \cos(\omega_i^{\text{пол}} \cdot t + \varphi_i) + \sum_{i=1}^3 C_i^{\text{пол}} \cdot e^{\alpha_i \cdot t}.$

Варианты параметров информационного (полезного) сигнала

№	Вариант функции полезног о сигнала	Параметры информационного сигнала					
		$A_i^{\text{пол}}$	$B_i^{\text{пол}}$	$C_i^{\text{пол}}$	α_i	$\omega_i^{\text{пол}}$	φ_i
1.	1	2;6;10	3;7;4	—	0,3;0,5;0,2	10;6;4	0,5;0,1;0,7
2.	2	3;6;4	2;8;4	—	0,2;0,6;0,8	12;9;5	0,6;0,3;0,1
3.	3	2;6;10	3;7;4	5;2;9	0,3;0,5;0,2	10;6;4	0,5;0,1;0,7
4.	4	3;6;4	2;8;4	5;2;9	0,2;0,6;0,8	12;9;5	0,6;0,3;0,1
5.	1	3;6;4	2;8;4	—	0,2;0,6;0,8	12;9;5	0,6;0,3;0,1
6.	2	2;6;10	3;7;4	—	0,3;0,5;0,2	10;6;4	0,5;0,1;0,7
7.	3	3;6;4	2;8;4	4;9;7	0,2;0,6;0,8	12;9;5	0,6;0,3;0,1

8.	4	2;6;10	3;7;4	3;7;1	0,3;0,5;0,2	10;6;4	0,5;0,1;0,7
9.	1	5;3;1	7;4;9	—	0,2;0,6;0,9	8;6;3	0,3;0,1;0,9
10.	2	6;4;9	2;4;8	—	0,8;0,7;0,5	4;9;3	0,2;0,3;0,6
11.	3	5;3;1	7;4;9	6;9;3	0,2;0,6;0,9	8;6;3	0,3;0,1;0,9
12.	4	6;4;9	2;4;8	3;5;7	0,8;0,7;0,5	4;9;3	0,2;0,3;0,6
13.	1	6;4;9	2;4;8	—	0,8;0,7;0,5	4;9;3	0,2;0,3;0,6
14.	2	5;3;1	7;4;9	—	0,2;0,6;0,9	8;6;3	0,3;0,1;0,9
15.	3	6;4;9	2;4;8	3;5;7	0,8;0,7;0,5	4;9;3	0,2;0,3;0,6
16.	4	5;3;1	7;4;9	6;9;3	0,2;0,6;0,9	8;6;3	0,3;0,1;0,9
17.	5	—	2;4;8	6;4;9	—	4;9;3	0,2;0,3;0,6
18.	6	5;3;1	7;4;9	2;4;8	0,2;0,6;0,9	8;6;3	0,3;0,1;0,9
19.	6	6;4;9	2;4;8	3;5;7	0,8;0,7;0,5	4;9;3	0,2;0,3;0,6
20.	5	—	7;4;9	6;9;3	—	8;6;3	0,3;0,1;0,9
21.	5	—	6;2;7	7;5;2	—	2;4;5	0,9;0,4;0,6
22.	6	5;3;1	6;2;7	7;5;2	0,2;0,6;0,9	2;4;5	0,9;0,5;0,6
23.	5	—	4;9;4	2;4;7	—	6;5;2	0,3;0,2;0,6
24.	6	7;3;1	4;9;4	2;4;7	0,6;0,8;0,4 2	6;5;2	0,5;0,4;0,9
25.	6	3;6;5	4;10;4	1;4;7	0,6;0,8;0,4 5	6;5;2	0,3;0,5;0,7

Варианты параметров высокочастотных помех и белого шума

№	Параметры высокочастотных помех		Амплитуда белого шума, $A_{ш}$
	$A_i^{пом}$	$\omega_i^{пом}$	
1.	0,3;0,4;0,7	37000;43000;50000	0,5
2.	0,1;0,2;0,5	35000;49000;55000	0,4
3.	0,3;0,4;0,7	37000;45000;55000	0,5
4.	0,1;0,2;0,5	35000;49000;55000	0,4
5.	0,1;0,2;0,5	35000;49000;55000	0,4
6.	0,3;0,4;0,7	37000;43000;50000	0,5
7.	0,5;0,4;0,6	35000;59000;55000	0,45
8.	0,3;0,4;0,7	37000;43000;50000	0,5
9.	0,8;0,3;0,09	39000;59000;63000	0,45
10.	0,9;0,6;0,3	40000;50000;68000	0,4
11.	0,8;0,5;0,9	39000;59000;68000	0,45
12.	0,9;0,6;0,3	40000;50000;68000	0,4
13.	0,9;0,6;0,3	40000;50000;68000	0,4
14.	0,8;0,3;0,09	39000;59000;63000	0,45
15.	0,9;0,6;0,3	40000;50000;68000	0,4
16.	0,8;0,3;0,09	39000;59000;63000	0,45
17.	0,9;0,6;0,3	40000;50000;68000	0,4
18.	0,8;0,3;0,09	39000;59000;63000	0,45
19.	0,9;0,6;0,3	40000;50000;68000	0,4
20.	0,8;0,3;0,09	39000;59000;63000	0,45
21.	0,92;0,643;0,36	50000;59000;68000	0,5

22.	0,92;0,643;0,36	43000;57000;63000	0,35
23.	0,4;0,67;0,35	45000;57000;65000	0,45
24.	0,4;0,67;0,35	45000;57000;65000	0,45
25.	0,4;0,7;0,3	43000;57000;69000	0,4

Контрольные вопросы.

1. Амплитудно-частотная характеристика, полоса пропускания и затухание.
2. Процедура сглаживания по методу скользящего среднего.
3. Метод наименьших квадратов.

Лабораторная работа

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ

Цель работы: получение навыков проведения спектрального анализа и синтеза, а также нахождения спектральных характеристик функций.

Теоретические сведения

Ряд Фурье

При решении задач в целом ряде технических наук (радиотехника, радиолокация, теория автоматического управления, гидравлика) бывает необходимо описать данную периодическую функцию $f(t)$ с периодом T тригонометрической суммой — *ряд Фурье*:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos\left(\frac{2k\pi}{T}t\right) + b_k \sin\left(\frac{2k\pi}{T}t\right) \right), \quad (1)$$

где a_0, a_k, b_k — *коэффициенты Фурье*, определяемые по формулам:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt,$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos\left(\frac{2k\pi}{T}t\right) dt,$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin\left(\frac{2k\pi}{T}t\right) dt. \quad (2)$$

Если функция $f(t)$ четная, то $b_k = 0$, если нечетная — $a_k = 0$.

Четная функция — функция, удовлетворяющая условию $f(-t) = f(+t)$.

Нечетная функция — функция, удовлетворяющая условию $f(-t) = -f(+t)$.

Требования, предъявляемые к функции $f(t)$: она должна быть

периодической и на отрезке равном периоду $\left[-\frac{T}{2}; \frac{T}{2}\right]$ удовлетворять условиям Дирихле:

а) интервал, на котором функция определена, может быть разбит на конечное число интервалов, в каждом из которых $f(t)$ непрерывна и монотонна.

Функция $f(t)$ называется непрерывной функцией в точке $t = a$, если число

$$\lim_{t \rightarrow a} f(t)$$

a принадлежит к области ее задания и предел существует и равен $f(a)$. Если функция задана и непрерывна для всех значений t в интервале от a до b , то она называется непрерывной в этом интервале. Функция, заданная и непрерывная для всех точек числовой оси, называется непрерывной всюду.

Монотонная функция — функция, удовлетворяющая при любых $t_2 > t_1$, входящих в область задания, условию $f(t_2) \geq f(t_1)$ (монотонно возрастающая функция), или $f(t_2) \leq f(t_1)$ (монотонно убывающая функция).

б) во всякой точке разрыва $f(t)$ существуют $f(t+0)$ и $f(t-0)$.

Для тех значений a , которые находятся внутри или на границе области задания функции и в которых она не определена, или значение $f(a)$ не совпадает со значением предела $\lim_{t \rightarrow a} f(t)$, или $\lim_{t \rightarrow a} f(t)$ не существует, функция имеет разрыв (точки разрыва).

Если $f(t)$ непрерывна во всех точках некоторого интервала за исключением конечного числа отдельных его точек, в которых $f(t)$ имеет конечные разрывы (значение функции в этих точках не бесконечно), то такая функция называется кусочно-непрерывной; ее график состоит из нескольких отрезков кривых линий.

Периодическая функция — функция, удовлетворяющая условию $f(t+T) = f(t)$. Число T называется периодом функции. Обычно периодом называют наименьшее число T , удовлетворяющее этому условию.

Ряд Фурье может быть также записан в виде:

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(A_k \cos \varphi_k \cos \left(\frac{2k\pi}{T} t \right) + A_k \sin \varphi_k \sin \left(\frac{2k\pi}{T} t \right) \right) = \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \left(\cos \varphi_k \cos \left(\frac{2k\pi}{T} t \right) + \sin \varphi_k \sin \left(\frac{2k\pi}{T} t \right) \right) = \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos \left(\frac{2k\pi}{T} t - \varphi_k \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где $a_k = A_k \cos \varphi_k$, $b_k = A_k \sin \varphi_k$ — частотные спектры функции $f(t)$.

Каждое такое слагаемое:

$$A_k \cos \left(\frac{2k\pi}{T} t - \varphi_k \right) \quad \text{или} \quad \left(a_k \cos \left(\frac{2k\pi}{T} t \right) + b_k \sin \left(\frac{2k\pi}{T} t \right) \right)$$

называется k -ой гармоникой.

Величины A_k , φ_k разложения в ряд (3) называются амплитудным спектром A_k и фазовым спектром φ_k :

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi_k = \frac{b_k}{a_k}. \quad (4)$$

Амплитудный спектр A_k показывает с какой амплитудой k -ая гармоника входит в периодическую функцию $f(t)$.

Фазовый спектр φ_k показывает на какой угол по фазе k-ая гармоника смещена относительно нулевой гармоники (начала отсчета).

Таким образом, любая периодическая функция, на отрезке равном периоду удовлетворяющая условиям Дирихле, может быть представлена в виде суммы некоторой постоянной и бесконечного множества гармоник.

Причем, между периодической функцией времени и ее спектрами существует взаимнооднозначное соответствие, то есть если известны спектры функции, то по формулам (1), (3) может быть найдена функция. Если известна функция, то по формуле (2) могут быть найдены спектры этой функции.

Спектральным (гармоническим) анализом называют разложение функции $f(t)$, заданной на отрезке $[0, T]$ в ряд Фурье, вычисление коэффициентов Фурье a_0, a_k, b_k по формулам (2), определение амплитудного A_k и фазового φ_k спектров по формулам (4).

Спектральным (гармоническим) синтезом называют получение колебаний сложной формы путем суммирования их гармонических составляющих (гармоник).

Прямое и обратное преобразования Фурье

В обработке сигналов и связанных областях преобразование Фурье рассматривается как декомпозиция сигнала на частоты и амплитуды, то есть обратимый переход от временного пространства в частотное пространство.

Соотношение:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (5)$$

называют прямым преобразованием Фурье функции $f(t)$.

Функция угловой частоты ω — $F(j\omega)$ называется Фурье-изображением или частотным спектром функции $f(t)$ или спектральной характеристикой функции $f(t)$. Спектр характеризует соотношение амплитуд и фаз бесконечного множества бесконечно малых синусоидальных компонент, составляющих в сумме непериодический сигнал $f(t)$.

Операция преобразования Фурье математически записывается следующим образом:

$$F(j\omega) = \Phi\{f(t)\},$$

где Φ — символ прямого преобразования Фурье.

Спектральную характеристику можно представить в виде:

$$F(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega),$$

где $U(\omega) = \text{Re}[F(j\omega)]$ — действительная часть спектральной характеристики; $V(\omega) = \text{Im}[F(j\omega)]$ — мнимая часть спектральной характеристики.

Или можно записать в показательной форме:

$$F(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)},$$

где $A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$ — амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

непрерывной функции $f(t)$; $\varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}$ — фаза-частотная характеристика (ФЧХ).

Физический смысл частотных характеристик:

— АЧХ показывает с какой амплитудой гармоника частоты ω входит в данную функцию;

— ФЧХ показывает на какой угол сдвинута гармоника частоты ω от начала отсчета.

Также используется амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ), при построении которой по оси абсцисс откладывается величина $U(\omega) = \text{Re}[F(j\omega)]$, а по оси ординат величина $V(\omega) = \text{Im}[F(j\omega)]$.

Преобразование Фурье обратимо, то есть, зная Фурье-изображение, можно определить исходную функцию — оригинал. Соотношение обратного преобразования Фурье имеет следующий вид:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(j\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (6)$$

или в сокращенной записи:

$$f(t) = \Phi^{-1}\{F(j\omega)\},$$

где Φ^{-1} — символ обратного преобразования Фурье.

Заметим, что временная функция имеет преобразование Фурье тогда и только тогда, когда:

— функция однозначна, содержит конечное число максимумов, минимумов и разрывов;

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)| dt < \infty$$

— функция абсолютно интегрируема, то есть

Обратное преобразование Фурье возможно только в том случае, если все полюсы $F(j\omega)$ — левые.

Таким образом, рассмотренный ряд Фурье позволяет любую периодическую функцию представить в виде суммы бесконечного числа гармоник с частотами, принимающими дискретные значения, а интеграл Фурье позволяет непериодическую функцию представить в виде бесконечного числа гармоник, частоты которых образуют непрерывную последовательность.

Дискретное преобразование Фурье

Дискретное преобразование Фурье — это одно из преобразований Фурье, широко применяемых в алгоритмах цифровой обработки сигналов (его модификации применяются в сжатии звука в MP3, сжатии изображений в JPEG и

др.), а также в других областях, связанных с анализом частот в дискретном (к примеру, оцифрованном аналоговом) сигнале. Дискретное преобразование Фурье требует в качестве входа дискретную функцию. Такие функции часто создаются путем дискретизации (выборки значений из непрерывных функций). Дискретные преобразования Фурье помогают решать частные дифференциальные уравнения и выполнять такие операции, как свертки. Дискретные преобразования Фурье также активно используются в статистике, при анализе временных рядов.

Прямое дискретное преобразование Фурье:

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-\frac{2\pi j}{N} kn}, \text{ при } k = 0, 1, \dots, N-1,$$

обратное дискретное преобразование Фурье:

$$f_k = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi j}{N} kn}, \text{ при } n = 0, 1, \dots, N-1,$$

где N — количество значений сигнала, измеренных за период, а также количество компонент разложения; f_n — измеренные в дискретных временных точках $n = 0, 1, \dots, N-1$ значения сигнала; F_k — значения комплексных амплитуд синусоидальных сигналов, слагающих исходный сигнал, поскольку амплитуды комплексные, то по ним можно вычислить одновременно и амплитуду, и фазу;

$\frac{|F_k|}{N}$ — вещественная амплитуда k -го синусоидального сигнала; $\arg(F_k)$ — фаза k -го синусоидального сигнала (аргумент комплексного числа); k — индекс

частоты. Частота k -го сигнала равна $\frac{k}{T}$, где T — период времени, в течение которого брались входные данные.

В пакете Mathcad имеются встроенные функции, выполняющие прямое и обратное дискретные преобразования Фурье (БПФ — быстрое преобразование Фурье):

fft(v) — возвращает прямое БПФ 2^m -мерного вещественнозначного вектора v , где v — вектор, элементы которого хранят отсчеты функции $f(t)$.

Результатом будет вектор A размерности $1 + 2^{m-1}$ с комплексными элементами — отсчетами в частотной области. Фактически действительная и мнимая части вектора есть коэффициенты Фурье a_k и b_k .

ifft(v) — возвращает обратное БПФ для вектора v с комплексными элементами. Вектор v имеет $1 + 2^{m-1}$ элементов.

Результатом будет вектор A размерности 2^m с действительными элементами.

Задания

Задание 1. Выполните спектральный анализ заданной функции $f(t)$ на отрезке $[0, 4\pi]$ с периодом $T = 4\pi$:

— вычислите коэффициенты a_k, b_k разложения в ряд Фурье при $k = 0..15$ по формуле (2);

— вычислите амплитудный A_k и фазовый φ_k спектры по формуле (4). Фазовый спектр в программе Mathcad находится по следующей формуле: $\varphi_k = \text{atan2}(a_k, b_k)$.

Постройте графики значимых гармоник функции $f(t)$ и отобразите графически спектры амплитуд и фаз.

Задание 2. Выполните спектральный синтез функции $f(t)$, используя формулы (1) или (3). Результаты синтеза отобразите графически и сравните с графиком исходной функции $f(t)$. Если результаты сравнения показали значительные отличия между графиками, необходимо увеличить количество рассматриваемых гармоник.

Задание 3. Найдите спектральную характеристику $F(j\omega)$ функции $f(t)$, используя прямое преобразование Фурье (формула (5)). Постройте графики амплитудно-частотной характеристики $A(\omega)$, фаза-частотной характеристики $\varphi(\omega)$ и амплитудно-фазовой частотной характеристики.

Задание 4. Выполните обратное преобразование Фурье (формула (6)), отобразите результат графически и сравните с исходной функцией. Если результаты сравнения показали значительные отличия между графиками, необходимо проверить правильность вычислений.

Задание 5. Сформируйте дискретную функцию следующим образом (f_i вводится в соответствии с вариантом):

$$T := 4 \cdot \pi$$

$$N := 128$$

$$i := 0..N - 1$$

$$t_i := i \cdot \frac{T}{N}$$

$$f_i := \frac{\sin(t_i)}{1 + \cos(t_i \cdot 2)^2}$$

С помощью функции прямого БПФ $\text{fft}(v)$ выполните прямое преобразование Фурье дискретной функции f_i .

Постройте графики амплитудно-частотной характеристики $A(\omega)$, фазо-частотной характеристики $\varphi(\omega)$ и амплитудно-фазовой частотной характеристики.

Задание 5. С помощью функции обратного БПФ $\text{ifft}(v)$ выполните обратное преобразование Фурье. Отобразите результат графически и сравните с исходной функцией. Если результаты сравнения показали значительные отличия между графиками, необходимо проверить правильность вычислений.

Варианты.

№	$f(t)$	№	$f(t)$
1., 21.	$\frac{\cos t}{1 + \cos^2 2t}$	11.	$\frac{\cos t}{1 + \sin^2 2t}$
2., 22.	$\frac{\sin t}{1 + \cos^2 2t}$	12.	$\frac{\sin t}{1 + \sin^2 2t}$
3., 23.	$\frac{\sin 2t}{3 + \sin t + \cos 2t}$	13.	$e^{10 \cos t}$
4., 24.	$\frac{\sin 3t}{ \sin t + \cos t }$	14.	$e^{\cos 2t} \sin t$
5., 25.	$\cos(e^{\sin 3t})$	15.	$e^{-\cos t} \sin t$
6., 26.	$\cos t \cos \sin t $	16.	$\frac{\sin 3t}{2 + \cos t}$
7., 27.	$\text{arctg}(\cos t)$	17.	$\frac{5e^{\cos t}}{2 + \cos^3 t}$
8., 28.	$e^{\cos 2t} + e^{\cos 3t}$	18.	$\text{arctg}(2e^{\cos t})$
9., 29.	$ \sin t + \cos 2t$	19.	$\frac{e^{\sin 2t}}{\sqrt{2 + \cos t}}$
10., 30	$\sin^3 t + e^{\sin(t)}$	20.	$\cos^3 t + e^{\sin(t)}$

Контрольные вопросы.

1. Ряд Фурье.
2. Амплитудный и фазовый спектры.
3. Спектральный анализ и синтез.
4. Прямое и обратное преобразования Фурье.
5. Амплитудно-частотная характеристика и фаза-частотная характеристика.
6. Дискретное преобразование Фурье.

Лабораторная работа

ФИЛЬТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Цель работы: ознакомление с алгоритмами сглаживающей и контрастоповышающей фильтрации изображений.

Теоретические сведения

Обычно изображения, сформированные различными информационными системами, искажаются действием помех. Это затрудняет как их визуальный анализ человеком-оператором, так и автоматическую обработку в ЭВМ. При решении некоторых задач обработки изображений в роли помех могут выступать те или иные компоненты самого изображения. Например, при анализе космического снимка земной поверхности может стоять задача определения границ между ее отдельными участками — лесом и полем, водой и сушей и т. п. С точки зрения этой задачи отдельные детали изображения внутри разделяемых областей являются помехой.

Ослабление действия помех на изображение при его дискретизации, квантовании, передаче или из-за воздействия возмущений внешней среды достигается фильтрацией. При фильтрации яркость каждой точки исходного изображения, искаженного помехой, заменяется некоторым другим значением яркости, которое признается в наименьшей степени искаженным помехой.

Изображение представляет собой двумерную функцию пространственных координат, которая изменяется по этим координатам медленнее (иногда значительно медленнее), чем помеха, также являющаяся двумерной функцией. Это позволяет при оценке полезного сигнала в каждой точке кадра принять во внимание некоторое множество соседних точек, воспользовавшись определенной похожестью сигнала в этих точках. В других случаях, наоборот, признаком полезного сигнала являются резкие перепады яркости. Однако, как правило, частота этих перепадов относительно невелика, так что на значительных промежутках между ними сигнал либо постоянен, либо изменяется медленно. И в этом случае свойства сигнала проявляются при наблюдении его не только в локальной точке, но и при анализе ее *окрестности*.

Понятие окрестности является достаточно условным. Она может быть образована лишь ближайшими по кадру соседями, но могут быть окрестности, содержащие достаточно много и достаточно сильно удаленных точек кадра. В этом последнем случае, конечно, степень влияния далеких и близких точек на решения, принимаемые фильтром в данной точке кадра, будет совершенно различной.

Таким образом, идеология фильтрации основывается на рациональном использовании данных, как из рабочей точки, так и из ее окрестности. Задача заключается в том, чтобы найти такую вычислительную процедуру, которая позволяла бы достигать наилучших результатов. Общепринято при решении этой задачи опираться на использование вероятностных моделей изображения и помехи, а также на применение статистических критериев

оптимальности. Причины этого понятны — это случайный характер, как информационного сигнала, так и помехи и это стремление получить минимальное в среднем отличие результата обработки от идеального сигнала. Многообразии методов и алгоритмов связано с большим разнообразием сюжетов, которые приходится описывать различными математическими моделями. Кроме того, применяются различные критерии оптимальности, что также ведет к разнообразию методов фильтрации. Наконец, даже при совпадении моделей и критериев очень часто из-за математических трудностей не удается найти оптимальную процедуру. Сложность нахождения точных решений порождает различные варианты приближенных методов и процедур.

Рассмотрим следующие методы фильтрации:

- с использованием сглаживающих фильтров;
- с использованием контрастоповышающих фильтров.

Сглаживающие фильтры. Для имеющегося изображения $f(x, y)$ процесс усреднения окрестности заключается в получении сглаженного изображения $g(x, y)$, интенсивность которого в каждой точке (x, y) равна усредненному значению интенсивности пикселей функции f , содержащихся в заданной окрестности точки (x, y) . Таким образом, сглаженное изображение получается при использовании соотношения:

$$g(x, y) = \frac{1}{P} \sum_{(n,m) \in S} f(n, m) \quad \text{для всех } x \text{ и } y \text{ функции } f(x, y), \quad (2.1)$$

где S — множество координат точек в окрестности точки (x, y) , включая саму эту точку; P — общее число точек в окрестности.

Основным подходом при определении окрестности точки (x, y) является использование квадратной или прямоугольной области части изображения (маска) с центром в точке (x, y) (рис. 2.1, а, б). Центр этой части изображения перемещается от пиксела к пикселу, начиная, например, от левого верхнего угла. Хотя иногда используются и другие формы окрестности (например, круг), квадратные формы масок являются более предпочтительными из-за простоты их реализации.

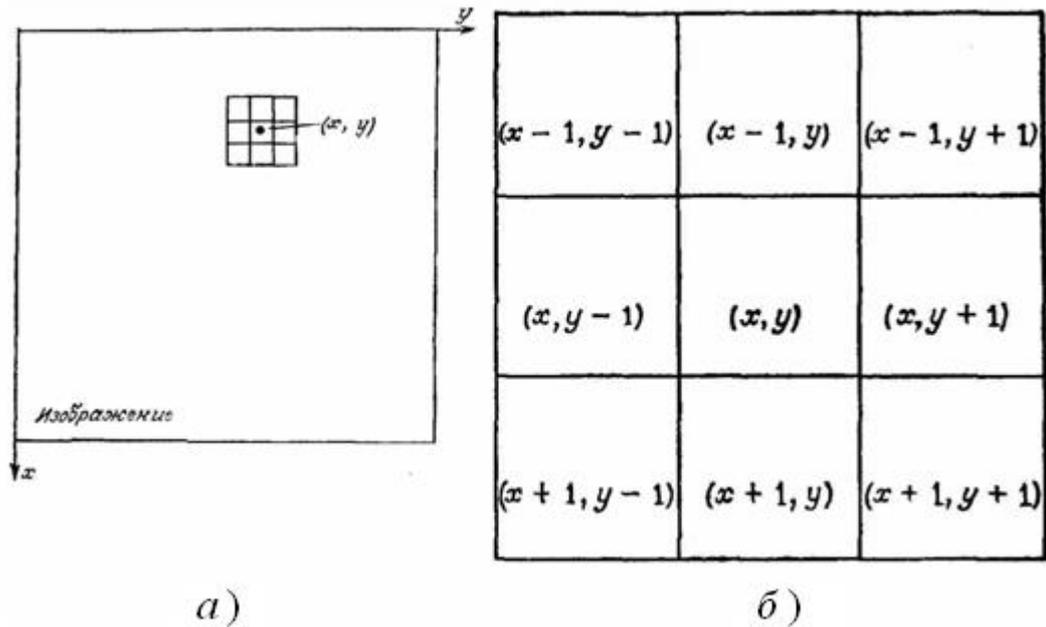


Рис. 2.1. Окрестность размерностью 3×3 точки (x, y) (а), маска размерностью 3×3 с координатами точек, находящихся в окрестности (б)

Шумоподавление при помощи усреднения окрестности имеет существенный недостаток: все пиксели в маске фильтра на любом расстоянии от обрабатываемого оказывают на результат одинаковый эффект. Несколько лучший результат получается при модификации фильтра с увеличением веса центральной точки:

$$g(x_0, y_0) = \frac{1}{10} \left(2f(x_0, y_0) + \sum_{(n,m) \in S} f(n,m) \right) \text{ для всех } x \text{ и } y \text{ в } f(x, y), \quad (2.2)$$

где S — множество координат точек в окрестности точки (x_0, y_0) .

Контрастоповышающие фильтры. Если сглаживающие фильтры снижают локальную контрастность изображения, размывая его, то контрастоповышающие фильтры производят обратный эффект. Такие фильтры подчеркивают границы объектов изображения, то есть обеспечивают увеличение детальности изображения.

Увеличения детальности изображения можно получить при использовании следующих соотношений:

$$g(x_0, y_0) = 5 \cdot f(x_0, y_0) - \sum_{(n,m) \in L} f(n,m) \text{ для всех } x \text{ и } y \text{ функции } f(x, y), \quad (2.3)$$

где L — множество координат точек слева, справа, сверху и снизу от точки (x_0, y_0) в заданной окрестности;

или

$$g(x_0, y_0) = 9 \cdot f(x_0, y_0) - \sum_{(n,m) \in S} f(n,m) \text{ для всех } x \text{ и } y \text{ функции } f(x, y), \quad (2.4)$$

где S — множество координат точек в окрестности точки (x_0, y_0) .

При необходимости получения только контура изображения можно использовать соотношения, приводящие к нулевой сумме весовых коэффициентов:

$$g(x_0, y_0) = 4 \cdot f(x_0, y_0) - \sum_{(n,m) \in L} f(n, m) \quad \text{для всех } x \text{ и } y \text{ в } f(x, y), \quad (2.5)$$

где L — множество координат точек слева, справа, сверху и снизу от точки (x_0, y_0) в заданной окрестности;

$$g(x_0, y_0) = 8 \cdot f(x_0, y_0) - \sum_{(n,m) \in S} f(n, m) \quad \text{для всех } x \text{ и } y \text{ в } f(x, y), \quad (2.6)$$

где S — множество координат точек в окрестности точки (x_0, y_0) .

Также можно провести выделение вертикальных, горизонтальных или наклонных (под углом 45°) контуров деталей изображения.

Задание.

1. Сформировать графический файл с черно-белым изображением (в оттенках серого) с 256 уровнями интенсивности (от 0 до 255). При использовании Photoshop для формирования черно-белого изображения в меню выбирается: Image → Mode → Grayscale.

Графическими средствами осуществить зашумление изображения. Например, при использовании Photoshop в меню выбирается: Filter → Noise → Add Noise, затем задается степень искажения картины.

2. С использованием функции Mathcad получить математические модели изображений:

$S := \text{READ_IMAGE}$ (“путь к файлу с изображением”).

При этом в переменной S хранится указатель на массив, поэтому копирование массивов, содержащих изображения, необходимо проводить поэлементно.

3. Осуществить фильтрацию зашумленного изображения с использованием сглаживающих фильтров по формулам (2.1) и (2.2) с размером маски 3×3 .

4. Осуществить фильтрацию исходного изображения с использованием контрастоповышающих фильтров по формулам (2.3)—(2.6) с размером маски 3×3 .

5. Провести визуальную оценку результатов фильтрации. Для этого необходимо перевести полученные математические модели в графические изображения с помощью функции Mathcad:

WRITEBMP (“...”) = S ,

где S — функция, содержащая параметры изображения.

Или вывести рисунок непосредственно в Mathcad, выбрав на панели инструментов: View → Toolbars → Matrix → Picture.

6. Сделать выводы по лабораторной работе.

Примеры работы фильтров изображений

Исходное изображение	Зашумленное изображение
 A black and white image showing an asteroid in the upper right corner, about to impact a planet's surface. The impact site is visible as a bright, glowing area with concentric ripples on the planet's surface. The planet's horizon is visible on the left, and a small moon is in the upper left corner of the sky.	 The same image as the original, but heavily corrupted with salt-and-pepper noise. The background is almost entirely black with scattered white pixels, and the main features are represented by sparse white pixels that roughly outline the asteroid and the impact site.
S	R

Сглаживающие фильтры

Усреднение окрестности

$$g(x, y) = \frac{1}{P} \sum_{(n,m) \in S} f(n, m)$$

Модификация фильтра с увеличением веса центральной точки

$$g(x_0, y_0) = \frac{1}{10} \left(2f(x_0, y_0) + \sum_{(n,m) \in S} f(n, m) \right)$$



YO



MYO

Контрастоповышающие фильтры (используется исходное изображение)

**Увеличения детальности
изображения**

$$g(x_0, y_0) = 5 \cdot f(x_0, y_0) - \sum_{(n,m) \in L} f(n, m)$$



K5

**Увеличения детальности
изображения**

$$g(x_0, y_0) = 9 \cdot f(x_0, y_0) - \sum_{(n,m) \in S} f(n, m)$$



K9

Контрастоповышающие фильтры (используется исходное изображение)	
<p>Получение контура изображения</p> $g(x_0, y_0) = 4 \cdot f(x_0, y_0) - \sum_{(n,m) \in L} f(n, m)$	<p>Получение контура изображения</p> $g(x_0, y_0) = 8 \cdot f(x_0, y_0) - \sum_{(n,m) \in S} f(n, m)$
	
К4	К8

Контрольные вопросы.

1. Понятия окрестности и маски.
2. Методы фильтрации: с использованием сглаживающих фильтров; с использованием контрастоповышающих фильтров.

Лабораторная работа

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ДИСКРЕТНЫХ И НЕПРЕРЫВНЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Цель работы: ознакомление с моделями дискретного и непрерывного каналов связи, определение пропускной способности при различных вариантах дискретных и непрерывных каналов.

Теоретические сведения

Дискретный канал связи имеет на входе множество символов кода X с энтропией источника $H(X)$, а на выходе — множество символов Y с энтропией $H(Y)$. Если формируемые символы из множества X и выявляемые из множества Y расположить в узлах графа, соединив эти узлы дугами, отображающими вероятности перехода одного символа в другой, то получим граф дискретного канала связи с шумом, представленный на рис. 3.1.

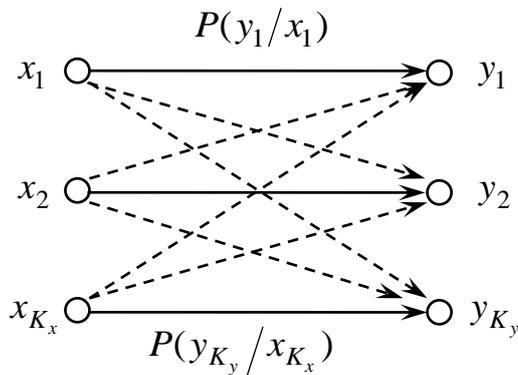


Рис. 3.1. Граф дискретного канала связи с шумом

Множество символов X конечно и определяется основанием системы счисления кода K_x на входе канала. Система счисления по выявляемым символам также конечна и составляет K_y . Вероятности переходов, связывающих входные и выходные символы, могут быть записаны в виде матрицы:

$$P = \begin{bmatrix} P(y_1/x_1) & P(y_2/x_1) & \dots & P(y_{K_y}/x_1) \\ P(y_1/x_2) & P(y_2/x_2) & \dots & P(y_{K_y}/x_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P(y_1/x_{K_x}) & P(y_2/x_{K_x}) & \dots & P(y_{K_y}/x_{K_x}) \end{bmatrix}.$$

В этой матрице i -й столбец определяет вероятность выявления на выходе дискретного канала связи символа y_i . Вероятности, расположенные на главной диагонали, называются вероятностями прохождения символов, остальные — вероятностями трансформации.

Потери информации могут быть вызваны действием помех, которые отображаются в дискретном канале в виде некоторого потока ошибок. Зная

матрицу P можно найти условную энтропию $H(Y/X)$, которая отображает потери информации из-за действия ошибок в дискретном канале связи. В теории информации условная энтропия определяет количество остающейся энтропии (т. е., остающейся неопределенности) величины Y после того, как распределение второй величины X становится известным. Она называется «энтропия Y при условии X ».

Исходя из модели дискретного канала связи, можно выполнить классификацию дискретных каналов.

По основанию системы счисления на входе ДКС различают двоичные, троичные, четвертичные и другие каналы связи.

По соотношению системы счисления на выходе и на входе ДКС выделяют каналы связи со стиранием, если $K_y > K_x$, и каналы связи без стирания, если $K_y = K_x$.

По наличию зависимости вероятности переходов символов в ДКС от времени выделяют нестационарные каналы, для которых такая зависимость существует, и стационарные, где вероятности переходов постоянны и не меняются во времени.

Нестационарные каналы могут быть классифицированы по наличию зависимости переходов от предшествующих значений. Выделяют дискретные каналы с памятью, в которых такая зависимость имеет место, и дискретные каналы без памяти, где этой зависимости не существует.

При определенных соотношениях между вероятностями переходов, входящих в матрицу P , выделяют:

- симметричные каналы по входу, для которых вероятности, входящие в строку матрицы, являются перестановками одних и тех же чисел;
- симметричные каналы по выходу, для которых это относится к вероятностям, входящим в столбцы;
- симметричные каналы по входу и по выходу при соблюдении обоих условий.

Основной характеристикой дискретного канала связи является *пропускная способность*. Под ней понимается верхний предел количества информации, которую можно передать через канал связи. Количество взаимной информации, связывающей множества символов X и Y , составит:

$$I(X, Y) = I = H(Y) - H(Y/X).$$

Пропускная способность:

$$C = I_{\max} = H_{\max}(Y) - H_{\min}(Y/X).$$

Пропускная способность дискретного канала связи без шума. При отсутствии шума потерь информации в канале нет, поэтому:

$$H(Y/X) = 0, \text{ тогда } C = I_{\max} = H_{\max}(Y).$$

Максимум энтропии для дискретных событий достигается при их равновероятности, т. е. когда $P_1 = P_2 = \dots = P_K = 1/K$. Учитывая, что на выходе канала связи может появиться K_y символов, получим:

$$H_{\max} = -\sum_{i=1}^K p_i \log_2 p_i = -K_y \cdot \frac{1}{K_y} \log_2 \frac{1}{K_y} = -(\underbrace{\log_2 1}_{=0} - \log_2 K_y) = \log_2 K_y$$

Отсюда:

$$C = \log_2 K_y$$

Таким образом, пропускная способность дискретного канала без шума зависит только от основания кода. Чем оно больше, тем выше информативность каждого символа, тем больше пропускная способность. В данном представлении пропускная способность не связана со временем. При переходе от двоичного кода к четвертичному пропускная способность ДКС без шума увеличивается в два раза.

Пропускная способность дискретного канала связи с шумом.

Рассмотрим канал без стирания, для которого $K_x = K_y = K$. При наличии шума в ДКС входной символ x_j переходит в символ y_i с вероятностью $P(y_i/x_j)$.

Вероятность трансформации (искажения) символа x_j составит:

$$P = \sum_{i=1}^K P(y_i/x_j), \text{ при } i \neq j$$

Если же канал симметричен, то вероятности входящие в данную сумму, одинаковы, а поэтому вероятность трансформации (искажения) символа равна:

$$P = (K-1) \cdot P(y_i/x_j), \quad P/(K-1) = P(y_i/x_j), \text{ при } i \neq j,$$

($(K-1)$, так как $i=j$ не берется).

Вероятность прохождения символа:

$$1-P = P(y_i/x_j), \text{ при } i=j \text{ (рис. 3.2).}$$

Пропускная способность рассматриваемого канала:

$$C = I_{\max} = H_{\max}(Y) - H_{\min}(Y/X)$$

Ранее показано, что $H_{\max}(Y) = \log_2 K_y$.

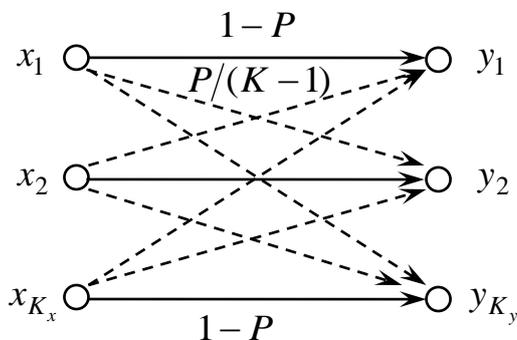


Рис. 3.2. Граф дискретного симметричного канала связи с шумом

Условная энтропия, отображающая потери информации из-за действия ошибок при прохождении ее по каналу связи:

$$H(Y/X) = -\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^K P(x_j)P(y_i/x_j) \log_2 P(y_i/x_j)$$

Принимая, что на входе ДКС символы равновероятны, то есть $P(x_j) = 1/K$, находим:

$$H(Y/X) = -(1-P) \log_2(1-P) - P \log_2\left(\frac{P}{K-1}\right)$$

Отсюда пропускная способность дискретного канала связи с шумом без стирания:

$$C = \log_2 K + (1-P) \log_2(1-P) + P \log_2\left(\frac{P}{K-1}\right)$$

Видно, что она увеличивается с ростом основания кода и с уменьшением вероятности трансформации символа.

В случае двоичного симметричного канала с шумом без стирания пропускная способность может быть найдена при $K = 2$, то есть:

$$C = 1 + (1-P) \log_2(1-P) + P \log_2 P$$

Пропускная способность двоичного симметричного канала со стиранием.

Если на входе двоичного канала имеют место символы x_1, x_2 , то при наличии стирания на выходе канала возникают символы y_1, y_2 и символы стирания y_3 . Символ стирания формируется при наличии в приемном устройстве специальной зоны стирания, попадание в которую означает возникновение символа неопределенности (стирания). Введение зоны стирания в приемное устройство позволяет снизить вероятность трансформации символа P за счет появления вероятности символа стирания q (рис. 3.3).

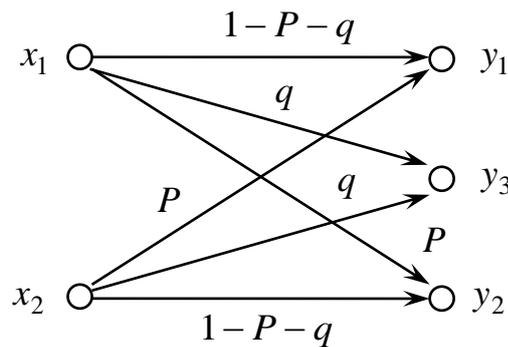


Рис. 3.3. Граф двоичного дискретного симметричного канала связи со стиранием

Тогда вероятность прохождения символа составляет $1-P-q$. Пропускная способность $C = H_{\max}(Y) - H_{\min}(Y/X)$. При наличии символа стирания стремление к равновероятности символов на выходе канала не имеет смысла, поэтому энтропия на выходе $H(Y)$ определяется как:

$$H(Y) = -\sum_{i=1}^3 P(y_i) \log_2 P(y_i),$$

где $P(y_i)$ — вероятность возникновения на выходе дискретного канала символа y_i .

Найдем вероятности возникновения символов на выходе при условии, что символы на входе равновероятны, тогда:

$$P(x_1) = P(x_2) = 1/K_x = 1/2,$$

$$P(y_1) = P(x_1)P(y_1/x_1) + P(x_2)P(y_1/x_2) = (1-P-q)/2 + P/2 = (1-q)/2,$$

$$P(y_2) = P(y_1),$$

$$P(y_3) = P(x_1)P(y_3/x_1) + P(x_2)P(y_3/x_2) = q/2 + q/2 = q.$$

Отсюда:

$$\begin{aligned} H(Y) &= -(P(y_1)\log_2 P(y_1) + P(y_2)\log_2 P(y_2) + P(y_3)\log_2 P(y_3)) = \\ &= (1-q)[1 - \log_2(1-q)] - q\log_2 q. \end{aligned}$$

Соответственно условная энтропия:

$$\begin{aligned} H(Y/X) &= -\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^3 P(x_j)P(y_i/x_j) \log_2 P(y_i/x_j) = \\ &= -(1-P-q)\log_2(1-P-q) - P\log_2 P - q\log_2 q. \end{aligned}$$

Отсюда пропускная способность *двоичного симметричного канала со стиранием*:

$$C = (1-q)[1 - \log_2(1-q)] + (1-P-q)\log_2(1-P-q) + P\log_2 P.$$

Введение зоны стирания эффективно лишь при наличии помех. Тогда удастся получить $P \ll q$ и повысить пропускную способность канала связи.

В общем случае в условиях действия помех повышение пропускной способности дискретного канала достигается за счет равновероятности символов на выходе и снижения вероятности искажения символа.

Пропускная способность непрерывного канала передачи данных. В непрерывном канале связи входной сигнал $x(t)$ преобразуется из-за наличия помехи в выходной сигнал $y(t)$. Учитывая, что сигнал имеет случайную природу, он определяется *плотностью распределения вероятностей* своих значений на входе $\psi(x)$ и на выходе — $\psi(y)$ (плотность распределения вероятностей показывает вероятности, того, что случайная переменная будет принимать определенное значение). *Количество взаимной информации*, связывающей входной и выходной сигналы, соответствует выражению:

$$I(x, y) = I = H(y) - H(y/x),$$

где $H(y)$ — энтропия на выходе непрерывного канала; $H(y/x)$ — условная энтропия, отображающая потери при передаче через непрерывный канал связи.

Под пропускной способностью непрерывного канала связи понимают, как и ранее, верхний предел количества информации:

$$C = I_{\max} = H_{\max}(y) - H_{\min}(y/x).$$

Пропускная способность непрерывного канала без шума. Для канала без шума $H(y/x) = 0$, $C = I_{\max} = H_{\max}(y)$.

Энтропия на выходе непрерывного канала определяется по следующей формуле:

$$H(y) = - \int_{-\infty}^{\infty} \psi(y) \log_2 \psi(y) dy$$

Максимум энтропии получаем для распределения, соответствующего нормальному закону (распределение Гаусса):

$$\psi(y) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-y^2/2\sigma^2},$$

где σ — параметр нормального закона распределения, который может принимать любые значения. Тогда:

$$C = I_{\max} = H_{\max}(y) = \log_2(\sigma\sqrt{2\pi e}).$$

Пропускная способность непрерывного канала с шумом. Условная энтропия, отображающая потери при передаче через непрерывный канал связи:

$$H(y/x) = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x)\psi(o) \log_2 \psi(o) dx do$$

где $\psi(x)$, $\psi(o)$ — плотности распределения вероятностей значений на входе непрерывного канала и ошибок, существующих в канале.

Тогда пропускная способность непрерывного канала связи составит:

$$C = I = C_{\text{без шума}} + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x)\psi(o) \log_2 \psi(o) dx do$$

Если закон распределения ошибки имеет такие же параметры как закон распределения значений сигнала на входе и на выходе, то это означает, что уровень помех в канале достиг такой величины, при которой никакой зависимости между выходным и входным сигналом не остается. Статистическая независимость распределений $\psi(x)$ и $\psi(y)$ подтверждает, что сигнал полностью подавлен помехой, полезная информация не передается, т. е. $I = 0$. Это соответствует и нулевой пропускной способности.

Задание.

1. Ознакомиться с моделями и классификацией дискретных и непрерывных каналов передачи данных.
2. Определить пропускную способность двоичного, четвертичного и шестнадцатеричного дискретных каналов связи без шума.
3. Построить графики зависимостей пропускной способности дискретного канала связи с шумом без стирания от вероятности искажения символа P при

двоичном, четвертичном и шестнадцатеричном каналах. При этом вероятность искажения символа задается в виде диапазона значений $P = 0,0.01...1$.

4. Построить график зависимости пропускной способности двоичного симметричного дискретного канала связи с шумом со стиранием от вероятности искажения символа $P = 0,0.01...1$, при значениях вероятности появления на выходе символа стирания $q_1, q_2 = q_1 + 0,2, q_3 = q_1 - 0,2$.

5. Построить график зависимости пропускной способности двоичного симметричного дискретного канала связи с шумом со стиранием от вероятности появления символа стирания $q = 0,0.01...1$ при заданных постоянных значениях вероятности искажения P_i .

6. Определить пропускную способность непрерывного канала связи без шума. Параметры нормального закона распределения сигналов на входе и на выходе непрерывного канала связи $\sigma_x = \sigma_y = 4$.

7. Построить график плотности распределения вероятностей ошибки в непрерывном канале связи при $\sigma_o = 4;3;2;1$. При этом пусть ошибка может принимать значения из диапазона $o = -10...10$.

8. Определить пропускную способность непрерывного канала связи с шумом при различных параметрах σ_o нормального закона распределения ошибки в непрерывном канале связи.

9. Сделать выводы по лабораторной работе.

Варианты.

№	Вероятность появления символа стирания q_1	Вероятность искажения символа P_i
1.	0,25	0,03; 0,04; 0,07
2.	0,27	0,1; 0,2; 0,05
3.	0,3	0,3; 0,4; 0,07
4.	0,33	0,1; 0,2; 0,05
5.	0,36	0,1; 0,2; 0,05
6.	0,39	0,3; 0,4; 0,07
7.	0,41	0,05; 0,4; 0,06
8.	0,43	0,3; 0,04; 0,07

9.	0,45	0,08; 0,3; 0,09
10.	0,46	0,09; 0,06; 0,3
11.	0,47	0,08; 0,05; 0,09
12.	0,48	0,09; 0,06; 0,3
13.	0,49	0,04; 0,08; 0,3
14.	0,5	0,08; 0,3; 0,09
15.	0,51	0,09; 0,06; 0,3
16.	0,52	0,08; 0,3; 0,09
17.	0,53	0,09; 0,06; 0,3
18.	0,54	0,08; 0,3; 0,09
19.	0,55	0,09; 0,06; 0,3
20.	0,56	0,08; 0,3; 0,09
21.	0,57	0,092; 0,064; 0,36
22.	0,58	0,09; 0,063; 0,36
23.	0,59	0,4; 0,067; 0,35
24.	0,6	0,4; 0,067; 0,05
25.	061	0,4; 0,07; 0,3

Контрольные вопросы.

1. Граф дискретного канала связи с шумом.
2. Классификация дискретных каналов.
3. Общая формула для определения пропускной способности.
4. Пропускная способность дискретного канала связи без шума.
5. Пропускная способность дискретного канала связи с шумом.
6. Пропускная способность непрерывного канала передачи данных.

Лабораторная работа

МЕТОДЫ АНАЛОГОВОЙ И ДИСКРЕТНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Цель работы: изучение методов аналоговой и дискретной (импульсной) модуляции сигналов.

Теоретические сведения

Модуляция

Физический уровень имеет дело с передачей битов по физическим каналам связи, таким, например, как коаксиальный кабель, витая пара, оптоволоконный кабель. К этому уровню имеют отношения характеристики физических сред передачи данных, такие как полоса пропускания, помехозащищенность.

Представление данных в виде электрических или оптических сигналов называется *кодированием*.

Сигналы от измерительных датчиков и любых других источников информации передаются по линиям связи к приемникам — измерительным приборам, в измерительно-вычислительные системы регистрации и обработки данных, в любые другие центры накопления и хранения данных. Как правило, информационные сигналы являются низкочастотными и ограниченными по ширине спектра, в отличие от широкополосных высокочастотных каналов связи, рассчитанных на передачу сигналов от множества источников одновременно с частотным разделением каналов. Перенос спектра сигналов из низкочастотной области в выделенную для их передачи область высоких частот выполняется операцией модуляции.

Допустим, что низкочастотный сигнал, подлежащий передаче по какому-либо каналу связи, задается функцией $\lambda(t)$. В канале связи для передачи данного сигнала выделяется определенный диапазон высоких частот. На входе канала связи в специальном передающем устройстве формируется вспомогательный, как правило, непрерывный во времени периодический высокочастотный сигнал $s(t) = f(t, a_1, a_2, \dots, a_m)$. Совокупность параметров a_i определяет форму вспомогательного сигнала. Значения параметров a_i в отсутствие модуляции являются величинами постоянными. Если на один из этих параметров перенести сигнал $\lambda(t)$, т. е. сделать его значение пропорционально зависимым от значения $\lambda(t)$ во времени (или по любой другой независимой переменной), то форма сигнала $s(t)$ приобретает новое свойство. Она несет информацию, тождественную информации в сигнале $\lambda(t)$. Именно поэтому сигнал $s(t)$ называют несущим сигналом, несущим колебанием, несущей частотой или просто несущей (carrier), а физический процесс переноса информации на параметры несущего сигнала — его модуляцией (modulation). Исходный информационный сигнал $\lambda(t)$ называют модулирующим (modulating signal), результат модуляции — модулированным сигналом (modulated signal). Обратную операцию выделения

модулирующего сигнала из модулированного колебания называют демодуляцией (demodulation).

В случае если в качестве несущего сигнала используется гармоническое колебание:

$$s(t) = A \sin(\Omega t + \varphi),$$

которое имеет три свободных параметра A, Ω, φ , то реализуется аналоговая модуляция (подчеркивается тот факт, что кодирование осуществляется за счет изменения параметров аналогового сигнала). Причем в зависимости от того, на какой из данных параметров переносится информация, различают амплитудную (АМ), частотную (ЧМ) или фазовую (ФМ) аналоговую модуляцию несущего сигнала. Частотная и фазовая модуляция взаимосвязаны, поскольку изменяют аргумент функции синуса, и их обычно объединяют под общим названием — угловая модуляция (УМ). Получила также распространение квадратурная модуляция, при которой одновременно изменяются амплитуда и фаза несущих колебаний.

При использовании в качестве несущих сигналов периодических последовательностей импульсов параметрами модуляции могут быть амплитуда, ширина (длительность), частота следования импульсов и фаза (положение импульса относительно определенной точки тактового интервала). Это дает четыре основных вида импульсной модуляции: амплитудно-импульсная (АИМ), широтно-импульсная (ШИМ), частотно-импульсная (ЧИМ) и фазоимпульсная (ФИМ).

Существует синоним понятия «импульсная модуляция» — «дискретная модуляция» — это процесс представления аналоговой информации в дискретной форме.

Передача изначально дискретных данных с использованием последовательности импульсов называется цифровым кодированием.

Методы аналоговой модуляции

Аналоговая модуляция применяется для передачи данных по каналам с узкой полосой частот, типичным представителем которых является канал тональной частоты, предоставляемый в распоряжение пользователям общественных телефонных сетей. Типичная амплитудно-частотная характеристика канала тональной частоты представлена на рис. 4.1.

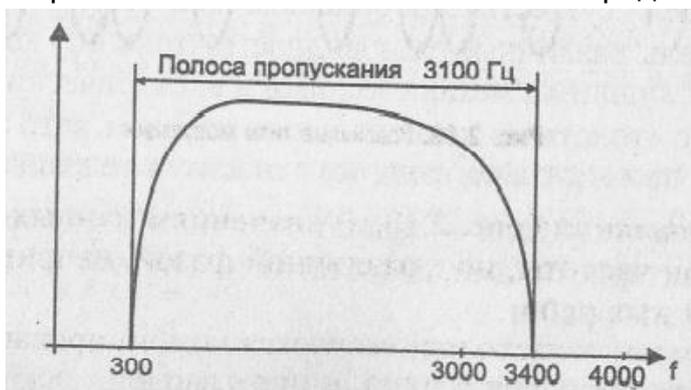


Рис. 4.1. Амплитудно-частотная характеристика канала тональной частоты

Этот канал передает частоты в диапазоне от 300 до 3400 Гц, таким образом, его полоса пропускания равна 3100 Гц. Хотя человеческий голос имеет гораздо более широкий спектр — примерно от 100 Гц до 10 кГц, — для приемлемого качества передачи речи диапазон в 3100 Гц является достаточным. Строгое ограничение полосы пропускания тонального канала связано с использованием аппаратуры уплотнения и коммутации каналов в телефонных сетях.

Устройство, которое выполняет функции модуляции несущей синусоиды на передающей стороне и демодуляции на приемной стороне, носит название *модем (модулятор-демодулятор)*.

Аналоговая модуляция является таким способом физического кодирования, при котором информация кодируется изменением амплитуды, частоты или фазы синусоидального сигнала несущей частоты.

Передача дискретных данных с использованием аналоговой модуляции. На диаграмме (рис. 4.2, а) показана последовательность бит исходной информации, представленная потенциалами высокого уровня для логической единицы и потенциалом нулевого уровня для логического нуля. Такой способ кодирования называется потенциальным кодом, который часто используется при передаче данных между блоками компьютера.

При **амплитудной модуляции** (рис. 4.2, б) для логической единицы выбирается один уровень амплитуды синусоиды несущей частоты, а для логического нуля — другой. Этот способ редко используется в чистом виде на практике из-за низкой помехоустойчивости, но часто применяется в сочетании с другим видом модуляции — фазовой модуляцией.

При **частотной модуляции** (рис. 4.2, в) значения 0 и 1 исходных данных передаются синусоидами с различной частотой — f_0 и f_1 . Этот способ модуляции не требует сложных схем в модемах и обычно применяется в низкоскоростных модемах, работающих на скоростях 300 или 1200 бит/с.

При **фазовой модуляции** (рис. 4.2, г) значениям данных 0 и 1 соответствуют сигналы одинаковой частоты, но с различной фазой, например 0 и 180 градусов или 0, 90, 180 и 270 градусов.

При **фазоразностной модуляции** каждому информационному элементу ставится в соответствие не абсолютное значение фазы, а ее изменение относительно предыдущего значения. Если информационный элемент есть *дибит*, то в зависимости от его значения (00, 01, 10 или 11) фаза сигнала может измениться на 90° , 180° , 270° или не измениться вовсе.

В скоростных модемах часто используются комбинированные методы модуляции, как правило, амплитудная в сочетании с фазовой.

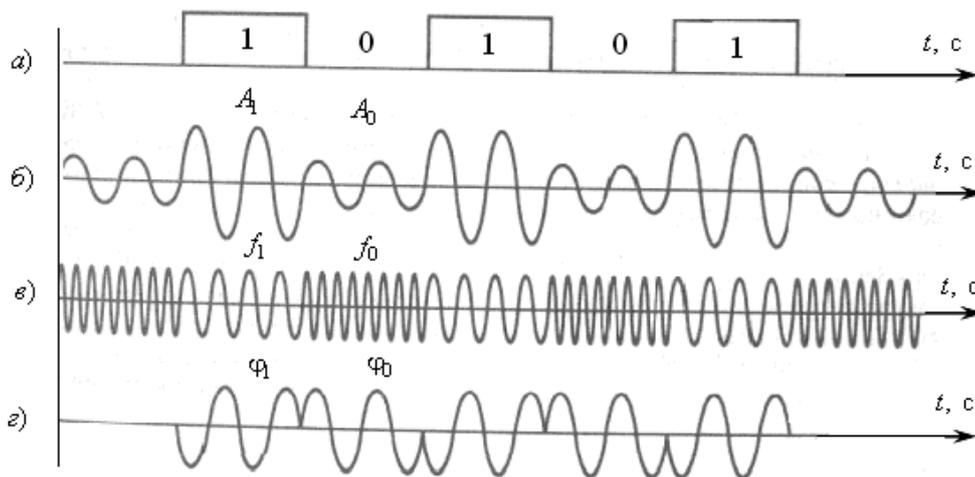


Рис. 4.2. Методы аналоговой модуляции

Амплитудно-фазовая модуляция (квадратурная модуляция). В данном виде модуляции для повышения пропускной способности используют одновременную манипуляцию двух параметров несущего колебания — амплитуды и фазы. Каждое возможное состояние модулированного сигнала (вектор сигнала или точка сигнального пространства) характеризуется определенным значением амплитуды и фазы, которые входят в так называемое созвездие.

Сигнал с *квадратурной модуляцией* представляет собой сумму двух несущих колебаний одной и той же частоты, сдвинутых по фазе друг относительно друга на 90° , т. е. находящихся в квадратуре, каждая несущая модулирована по амплитуде своим модулирующим сигналом:

$$s(t) = x(t) \sin(\omega t) + y(t) \cos(\omega t),$$

где $x(t) = A_i \sin(\omega_x t)$, $y(t) = B_i \sin(\omega_y t)$ — модулирующие сигналы для четных и нечетных импульсов (бит исходной дискретной последовательности); A_i , B_i — амплитуды модулирующих сигналов, зависящие от значения бита (0 или 1).

Косинусная составляющая называется синфазной, синусная — квадратурной. Сигнал исходных передаваемых данных разделяется на два потока — четные импульсы модулирует синусоидальное несущее колебание, а нечетные импульсы — косинусоидальное. Затем два модулированных колебания складываются, образуя единое квадратурно-модулированное колебание.

Передача непрерывных данных с использованием аналоговой модуляции.

Амплитудная модуляция. В системах с амплитудной модуляцией модулирующая функция $\lambda(t)$ (полезный сигнал, который необходимо передать) изменяет амплитуду высокочастотной гармонической функции сигнала-переносчика $s(t)$ и амплитудно-модулированный сигнал имеет вид:

$$s_a(t) = [1 + m\lambda(t)]s(t),$$

где $s(t) = A \sin(\Omega t + \varphi)$ — высокочастотный сигнал-переносчик (несущий сигнал); m — коэффициент амплитудной модуляции, характеризующий глубину модуляции.

Если модулирующий сигнал представлен одночастотным гармоническим колебанием $\lambda(t) = a_0 \sin(\omega_0 t)$ с амплитудой a_0 , то коэффициент модуляции

$$m = \frac{a_0}{A}$$

равен отношению амплитуд модулирующего и несущего колебания

Значение m должно находиться в пределах от 0 до 1 для всех гармоник модулирующего сигнала. При значении $m < 1$ форма огибающей амплитудно-модулированного колебания $s_a(t)$ полностью повторяет форму модулирующего сигнала $\lambda(t)$, что можно видеть на рис. 4.3.

Малую глубину модуляции $m \ll 1$ для основных гармоник модулирующего сигнала применять нецелесообразно, т. к. при этом мощность (амплитуда) передаваемого информационного сигнала будет много меньше мощности несущего колебания, и мощность передатчика будет использоваться неэкономично.

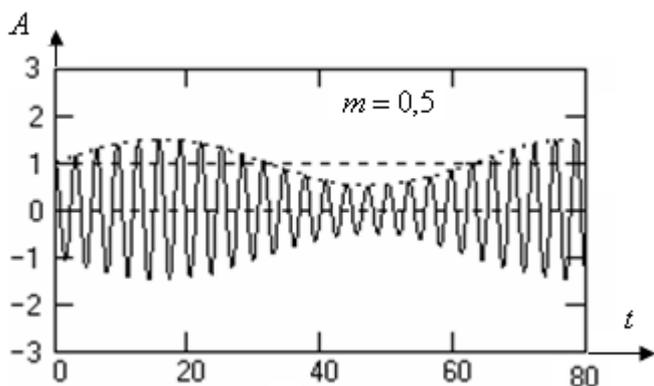


Рис. 4.3. Модулированный сигнал

На рис. 4.4 приведен пример глубокой модуляции, при которой значение $m = 1$. При глубокой модуляции используются также понятия относительного

коэффициента модуляции вверх: $m_{\text{в}} = \frac{A_{\text{max}} - A}{A}$ и модуляции вниз: $m_{\text{н}} = \frac{A - A_{\text{min}}}{A}$, которые выражаются в процентах.

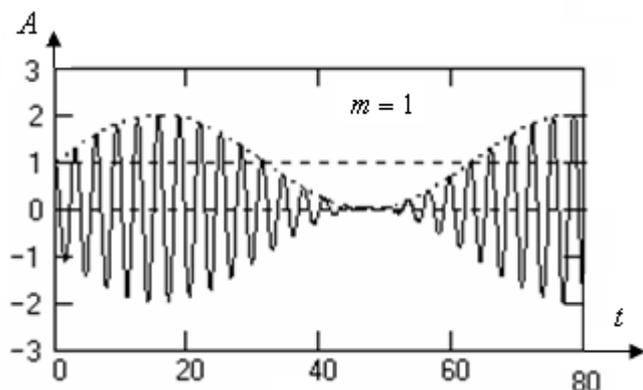


Рис. 4.4. Глубокая модуляция

Стопроцентная модуляция ($m = 1$) может приводить к искажениям сигналов при перегрузках передатчика, если последний имеет ограниченный динамический диапазон по амплитуде несущих частот или ограниченную мощность передатчика (увеличение амплитуды несущих колебаний в пиковых интервалах сигнала $s_a(t)$ в два раза требует увеличения мощности передатчика в четыре раза).

При $m > 1$ возникает так называемая перемодуляция, пример которой приведен на рис. 4.5. Форма огибающей при перемодуляции искажается относительно формы модулирующего сигнала, и после демодуляции, если применяются ее простейшие методы, информация может быть искажена.

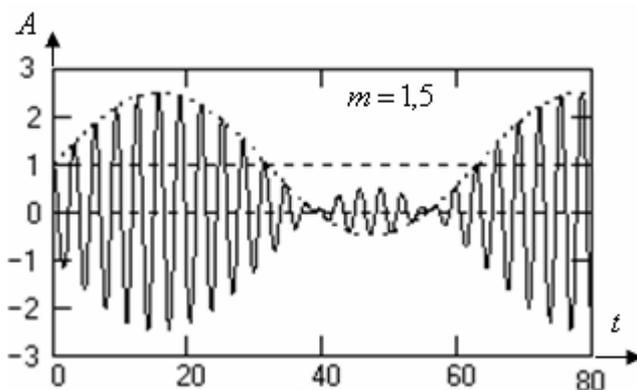


Рис. 4.5. Перемодуляция сигнала

Простейшая форма модулированного сигнала создается при однотоновой амплитудной модуляции — модуляции несущего сигнала гармоническим колебанием с одной частотой, например если $\lambda(t) = a_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ или $\lambda(t) = a_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$.

Многотональный модулирующий сигнал имеет произвольный спектральный состав. Математическая модель такого сигнала может быть аппроксимирована тригонометрической суммой гармонических составляющих:

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n a_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad \text{или} \quad \lambda(t) = \sum_{i=1}^m a_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$$

$$\text{или} \quad \lambda(t) = \sum_{i=1}^n a_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + \sum_{j=1}^m a_j \cos(\omega_j t + \varphi_j)$$

Амплитудно-модулированный сигнал имеет дискретный (линейчатый) спектр, состоящий из трех линий (в случае однотоновой модуляции) (рис. 4.6): несущей частоты — Ω и двух боковых частот $(\Omega - \omega_0)$ и $(\Omega + \omega_0)$ — одна ниже, другая выше несущей частоты. Их называют верхней и нижней боковыми частотами. Вся информация о модулирующей функции полностью содержится в любой из боковых частот.

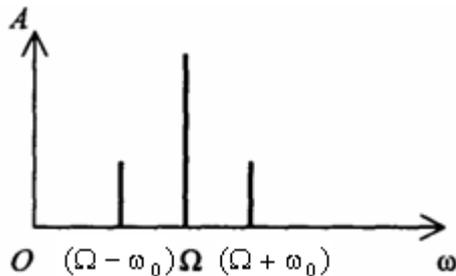


Рис. 4.6. Спектр амплитудно-модулированного сигнала при однотоновой модуляции

Спектр сигнала $f(t)$ строится с использованием формулы прямого преобразования Фурье:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

Функция угловой частоты ω — $F(j\omega)$ называется Фурье-изображением или частотным спектром функции $f(t)$ или спектральной характеристикой функции $f(t)$. Спектр характеризует соотношение амплитуд и фаз бесконечного множества бесконечно малых синусоидальных компонент, составляющих в сумме непериодический сигнал $f(t)$.

Спектральную характеристику можно представить в виде:

$$F(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega),$$

где $U(\omega) = \text{Re}[F(j\omega)]$ — действительная часть спектральной характеристики; $V(\omega) = \text{Im}[F(j\omega)]$ — мнимая часть спектральной характеристики.

Или можно записать в показательной форме:

$$F(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)},$$

где $A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$ — амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

непрерывной функции $f(t)$; $\varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}$ — фаза-частотная характеристика (ФЧХ).

Физический смысл частотных характеристик:

— АЧХ показывает с какой амплитудой гармоника частоты ω входит в данную функцию;

— ФЧХ показывает на какой угол сдвинута гармоника частоты ω от начала отсчета.

Система с амплитудной модуляцией, которая передает обе боковых и несущую частоту называется двухполосной системой. Несущая не несет никакой полезной информации и может быть удалена, но с несущей или без, полоса сигнала двухполосной системы вдвое больше полосы изначального сигнала. Для сужения рабочей полосы частот канала связи возможно вытеснение не только несущей, но и одной из боковых частот, так как они несут одну информацию. Этот вид амплитудной модуляции известен, как однополосная модуляция с подавленной несущей. При этом создается новый сигнал, идентичный оригиналу, но сдвинутый вверх по частоте.

В случае многотональной амплитудной модуляции верхних (и нижних) боковых частот образуется такое же количество, сколько гармоник содержит модулирующий сигнал $\lambda(t)$.

Демодуляция сигнала с амплитудной модуляцией достигается путем смешивания модулированного сигнала с несущей той же самой частоты, что и на модуляторе. Изначальный сигнал затем получают путем фильтрации. При использовании однополосной модуляции с подавленной несущей для демодуляции генерируется на месте, и она может не совпадать с частотой несущей на модуляторе. Небольшая разница между двумя несущими частотами является причиной несовпадения восстанавливаемых частот, что присуще телефонным сетям.

Частотная модуляция. В системах с частотной модуляцией частота модулируемого сигнала образуется сложением частоты высокочастотного несущего колебания Ω со значением модулирующего сигнала $\lambda(t)$ с определенным коэффициентом пропорциональности $\Delta\omega$ — девиацией частоты:

$$\omega_m = \Omega + \Delta\omega \cdot \lambda(t)$$

Девиация частоты — это наибольшее отклонение частоты модулированного сигнала при частотной модуляции от значения его несущей частоты.

Соответственно, фаза колебаний (интеграл от частоты есть фаза):

$$\psi(t) = \Omega t + \Delta\omega \cdot \int_0^t \lambda(t) dt + \varphi$$

Тогда частотно-модулированный сигнал:

$$s_\omega(t) = A \sin \left(\Omega t + \Delta\omega \cdot \int_0^t \lambda(t) dt + \varphi \right)$$

Для характеристики глубины частотной модуляции используются понятия девиации частоты вверх $\Delta\omega_B = \Delta\omega \lambda_{\max}$, и вниз $\Delta\omega_H = \Delta\omega \lambda_{\min}$.

Частотная модуляция помехоустойчива, поскольку искажению при помехах подвергается в основном амплитуда сигнала, а не частота. Частотная модуляция превосходит амплитудную в устойчивости к некоторым воздействиям, присутствующим в телефонной сети и ее следует использовать на более низких

скоростях (иначе полоса частот частотно-модулированного сигнала будет еще шире).

Фазовая модуляция. При фазовой модуляции информативным параметром сигнала-переносчика служит фаза φ несущей частоты Ω :

$$s_{\varphi}(t) = A \sin(\Omega t + \varphi + \Delta\varphi\lambda(t)),$$

где $\Delta\varphi$ — коэффициент фазовой модуляции.

Для характеристики глубины фазовой модуляции используются понятия девиации фазы вверх $\Delta\psi_{\text{в}} = \Delta\varphi\lambda_{\text{max}}$ и вниз $\Delta\psi_{\text{н}} = \Delta\varphi\lambda_{\text{min}}$.

Частотную и фазовую модуляции объединяют под общим названием угловой модуляции, поскольку по форме колебаний невозможно определить, к какому виду модуляции относится данное колебание, к фазовой или частотной, а при достаточно гладких функциях $\lambda(t)$ формы сигналов вообще практически не отличаются.

При фазовой и частотной модуляции спектр сигнала получается более сложным, чем при амплитудной модуляции, так как боковых гармоник здесь образуется более двух, но они также симметрично расположены относительно основной несущей частоты, а их амплитуды быстро убывают. Поэтому эти виды модуляции также хорошо подходят для передачи данных по каналу тональной частоты.

Амплитудно-фазовая (квадратурная) модуляция позволяет модулировать несущую частоту одновременно двумя сигналами путем модуляции амплитуды несущей одним сигналом, и фазы несущей другим сигналом. Амплитудно-фазомодулированный сигнал $s_{a\varphi}(t)$ формируют в следующем виде:

$$s_{a\varphi}(t) = \lambda_1(t) \cos(\Omega t + \varphi + \Delta\varphi\lambda_2(t)),$$

где $\lambda_1(t) = \sin(\omega_0 t)$, $\lambda_2(t) = \cos(\omega_0 t)$ — модулирующие сигналы.

Раскроем косинус суммы и представим сигнал в виде суммы двух амплитудно-модулированных колебаний:

$$s_{a\varphi}(t) = \lambda_1(t) \cos(\Omega t + \varphi) \cos(\Delta\varphi\lambda_2(t)) - \lambda_1(t) \sin(\Omega t + \varphi) \sin(\Delta\varphi\lambda_2(t)).$$

При $a(t) = \lambda_1(t) \cos(\Delta\varphi\lambda_2(t))$, $b(t) = -\lambda_1(t) \sin(\Delta\varphi\lambda_2(t))$ сигналы $a(t)$, $b(t)$ могут быть использованы в качестве модулирующих сигналов несущих колебаний $\cos(\Omega t + \varphi)$ и $\sin(\Omega t + \varphi)$, сдвинутых по фазе на 90° относительно друг друга:

$$s_{a\varphi}(t) = a(t) \cos(\Omega t + \varphi) + b(t) \sin(\Omega t + \varphi).$$

Полученный сигнал называют *квадратурным*, а способ модуляции — *квадратурной модуляцией*. Низкочастотные составляющие $a(t)$ и $b(t)$ выделяются фильтром низких частот.

Методы дискретной модуляции

Основной тенденцией развития телекоммуникаций во всем мире является цифровизация сетей связи, предусматривающая построение сети на базе цифровых методов передачи и коммутации. Это объясняется следующими

существенными преимуществами цифровых методов передачи перед аналоговыми:

— высокая помехоустойчивость. Представление информации в цифровой форме позволяет осуществлять регенерацию (восстановление) этих символов при передаче их по линии связи, что резко снижает влияние помех и искажений на качество передачи информации;

— слабая зависимость качества передачи от длины линии связи. В пределах каждого регенерационного участка искажения передаваемых сигналов оказываются ничтожными. Длина регенерационного участка и оборудование регенератора при передаче сигналов на большие расстояния остаются практически такими же, как и в случае передачи на малые расстояния. Так, при увеличении длины линии в 100 раз для сохранения неизменным качества передачи информации достаточно уменьшить длину регенерационного участка лишь на несколько процентов;

— возможность построения цифровой сети связи. Цифровые системы передачи в сочетании с цифровыми системами коммутации являются основой цифровой сети связи, в которой передача, транзит и коммутация сигналов осуществляются в цифровой форме. При этом параметры каналов практически не зависят от структуры сети, что обеспечивает возможность построения гибкой разветвленной сети, обладающей высокими надежностными и качественными показателями;

— высокие технико-экономические показатели. Передача и коммутация сигналов в цифровой форме позволяют реализовывать оборудование на единых аппаратных платформах. Это позволяет резко снижать трудоемкость изготовления оборудования, значительно снижать его стоимость, потребляемую энергию и габариты. Кроме того, существенно упрощается эксплуатация систем и повышается их надежность.

В связи с этим в настоящее время данные, изначально имеющие аналоговую форму — речь, телевизионное изображение, — передаются по каналам связи в дискретном виде, то есть в виде последовательности единиц и нулей. Процесс представления аналоговой информации в дискретной форме называется дискретной модуляцией.

В процессе преобразования непрерывного сигнала в дискретный сигнал импульсный элемент, состоящий из идеального импульсного элемента (ключ) и формирующего устройства (модулятор) решает две задачи. Ключ выполняет дискретизацию входного сигнала $u(t)$ с периодом T , в результате на выходе появляется сигнал $u[kT]$. Формирующее устройство выполняет импульсную модуляцию, изменяя какой-либо параметр импульса (амплитуду, ширину) пропорционально входным сигналам $u[kT]$, в результате на выходе появляется сигнал $u^*(t)$.

При **амплитудно-импульсной модуляции (АИМ)** модулируемым (изменяемым) параметром служит амплитуда (высота) импульсов. Сигнал $u^*(t)$ на выходе импульсного элемента формируется в виде (рис. 4.7):

$$u^*(t) = \begin{cases} K_a u[kT] & \text{при } kT \leq t < (k + \gamma)T, \\ 0 & \text{при } (k + \gamma)T \leq t < (k + 1)T, \end{cases}$$

где K_a — коэффициент пропорциональности; γ — скважность импульсов ($0 < \gamma \leq 1$), которая остается постоянной.

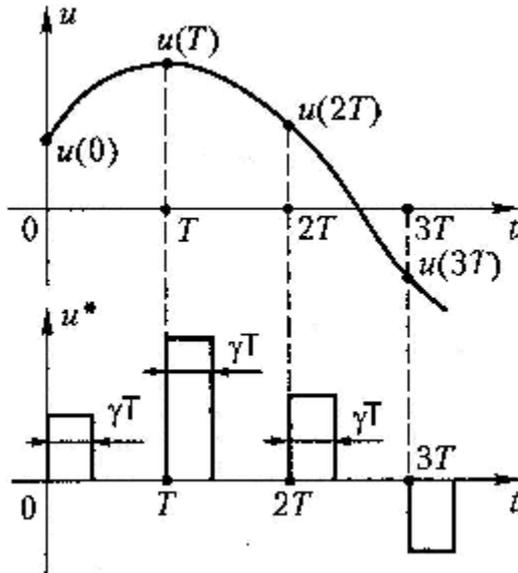


Рис. 4.7. Амплитудно-импульсная модуляция (АИМ)

При **широтно-импульсной модуляции** (ШИМ) модулируемым параметром является ширина (длительность) импульсов $\tau_k = \gamma_k T$, где $\gamma_k = \gamma(kT)$ — скважность k -го импульса. Амплитуда импульсов при этом остается постоянной.

Сигнал $u^*(t)$ на выходе импульсного элемента формируется в виде (рис. 4.8):

$$u^*(t) = \begin{cases} h \cdot \text{sign}(u[kT]) & \text{при } kT \leq t < (k + \gamma_k)T, \\ 0 & \text{при } (k + \gamma_k)T \leq t < (k + 1)T, \end{cases}$$

где h — амплитуда импульсов; $\text{sign}(u[kT])$ — функция, определяющая знак величины $u[kT]$.

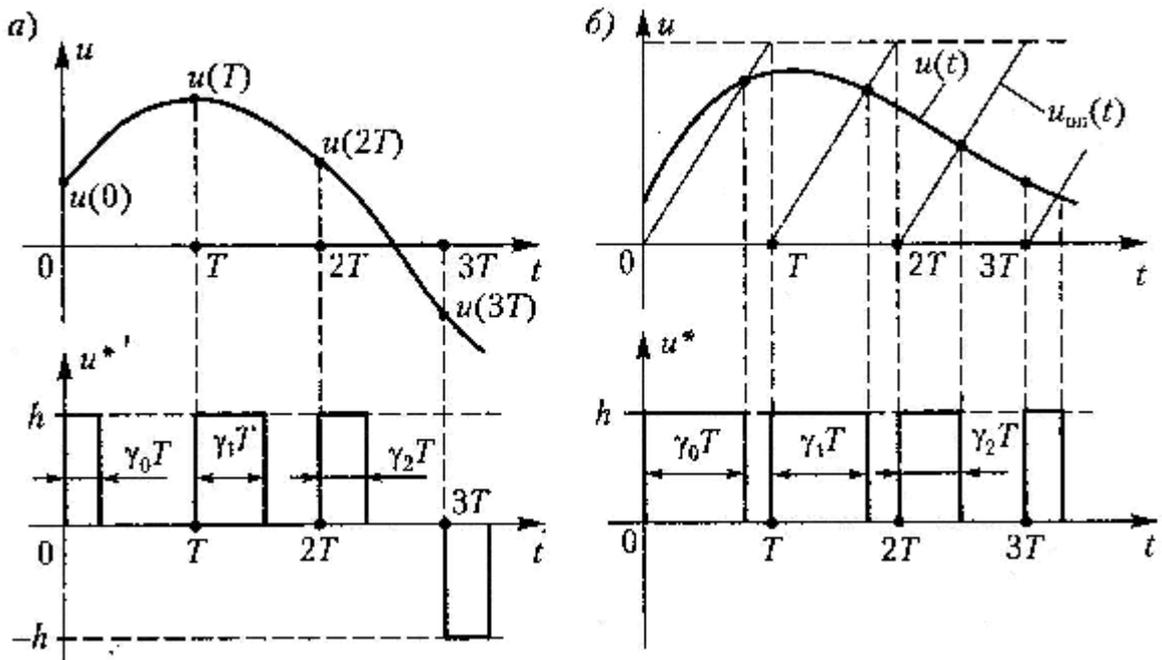


Рис. 4.8. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ)

В зависимости от способа определения текущего значения скважности импульсов γ_k различают широтно-импульсную модуляцию 1-го рода (ШИМ-1) и широтно-импульсную модуляцию 2-го рода (ШИМ-2).

При ШИМ-1 (рис. 4.8, а) скважность k -го импульса равна:

$$\gamma_k = \begin{cases} K_{\text{ш}} \cdot |u[kT]| & \text{при } K_{\text{ш}} \cdot |u[kT]| < 1, \\ 1 & \text{при } K_{\text{ш}} \cdot |u[kT]| \geq 1, \end{cases}$$

где $K_{\text{ш}}$ — коэффициент пропорциональности (крутизна характеристики широтно-импульсного модулятора).

При ШИМ-2 (рис. 4.8, б) длительность импульсов определяется в результате сравнения непрерывного входного сигнала $u(t)$ с некоторым периодическим опорным сигналом $u_{\text{оп}}(t)$, в качестве которого обычно используется пилообразный сигнал, формируемый специальным генератором. Импульсы запускаются в моменты времени $t = kT$ и существуют до момента совпадения сигналов $u(t)$ и $u_{\text{оп}}(t)$. Как правило, ШИМ-2 используют в системах, в которых сигнал $u(t)$ не меняет свой знак.

Задания

Задание 1. Осуществить аналоговую амплитудную, частотную и фазовую модуляции заданной дискретной последовательности данных, с использованием сигнала $f(t) = A \sin(\omega \cdot t)$ с указанными в задании параметрами.

Построить амплитудный и фазовый спектры модулированных сигналов.

Задание 2. Осуществить однотоновую (модулирующий сигнал представляет собой одночастотное гармоническое колебание $\lambda(t) = a_0 \sin(\omega_0 t)$) аналоговую (амплитудную, частотную и фазовую) модуляцию.

Провести исследование влияния коэффициента амплитудной модуляции m , характеризующего глубину модуляции, девиации частоты $\Delta\omega$ и коэффициента фазовой модуляции $\Delta\varphi$ на форму модулированных сигналов.

Построить амплитудный и фазовый спектры модулированных сигналов.

Задание 3. Осуществить многотоновую (модулирующий сигнал

$$\lambda(t) = \sum_{i=0}^2 a_i \sin(\omega_i t)$$

представляет собой сумму гармонических колебаний аналоговую (амплитудную, частотную и фазовую) модуляцию.

Провести исследование влияния коэффициента амплитудной модуляции m , характеризующего глубину модуляции, девиации частоты $\Delta\omega$ и коэффициента фазовой модуляции $\Delta\varphi$ на форму модулированных сигналов.

Построить амплитудный и фазовый спектры модулированных сигналов.

Задание 4. Осуществить дискретную амплитудно-импульсную и широтно-импульсную модуляции. В качестве исходного непрерывного сигнала использовать сигнал $\lambda(t) = a_0 \sin(\omega_0 t)$. Провести исследование влияния коэффициентов пропорциональности ($K_a, K_{ш}$) на параметры импульсов.

Построить амплитудный и фазовый спектры модулированных сигналов.

Задание 5. Сделать выводы по лабораторной работе.

Варианты для проведения аналоговой модуляции дискретной последовательности данных.

№	Последовательность данных	Аналоговая амплитудная модуляция			Аналоговая частотная модуляция		
		ω	A_1	A_0	A	ω_1	ω_0
1.	1011001000101110	100	10	5	10	300	100
2.	1010001010101010	101	11	6	11	301	101
3.	0001001010101110	102	12	7	12	302	102
4.	1011001010101000	103	13	8	13	303	103
5.	1001011001101000	104	14	9	14	304	104
6.	0110101000101110	105	15	10	15	305	105

7.	1011011010101000	106	16	11	16	306	106
8.	0011001001101010	107	17	12	17	307	107
9.	1101011010101010	108	18	13	18	308	108
10.	0011011010111010	109	19	14	19	309	109
11.	0011001010101110	110	20	15	20	310	110
12.	1010001000101010	111	21	16	21	311	111
13.	0101001010101110	112	22	17	22	312	112
14.	1011011010101000	113	23	18	23	313	113
15.	1001011001101010	114	24	19	24	314	114
16.	0110101000101000	115	25	20	25	315	115
17.	1011011011100000	116	26	21	26	316	116
18.	1011001000101010	117	27	22	27	317	117
19.	1101011010111010	118	28	23	28	318	118
20.	1011010010111010	119	29	24	29	319	119
21.	0100101001101000	120	30	25	30	320	120
22.	1011011001100000	121	31	26	31	321	121
23.	0011001010101010	122	32	27	32	322	122
24.	0101011010100010	123	33	28	33	323	123
25.	1011110010110010	124	34	29	34	324	124

Варианты для проведения однотоновой и многотоновой аналоговой модуляции непрерывного сигнала.

№	Параметры несущего сигнала $s(t) = A \sin \Omega t$		Параметры модулирующего сигнала $\lambda(t) = \sum_{i=0}^2 a_i \sin(\omega_i t)$	
	Ω	A	a_i	ω_i
1.	70	10	2;6;10	10;6;4
2.	71	11	3;6;4	12;9;5
3.	72	12	2;6;10	10;6;4
4.	73	13	3;6;4	12;9;5
5.	74	14	3;6;4	12;9;5
6.	75	15	2;6;10	10;6;4
7.	76	11,1	3;6;4	12;9;5
8.	77	7,2	2;6;10	10;6;4
9.	78	8,4	5;3;1	8;6;3
10.	79	9,7	6;4;9	4;9;3
11.	80	6,2	5;3;1	8;6;3
12.	81	10,8	6;4;9	4;9;3
13.	82	10,4	6;4;9	4;9;3
14.	83	9,7	5;3;1	8;6;3
15.	84	6,9	6;4;9	4;9;3
16.	85	5,7	5;3;1	8;6;3
17.	86	6,2	3;6;4	4;9;3
18.	87	7,2	5;3;1	8;6;3

19.	88	8,3	6;4;9	4;9;3
20.	89	5,6	2;6;10	8;6;3
21.	90	4,7	3;6;5	2;4;5
22.	91	8,3	5;3;1	2;4;5
23.	92	5,8	4;6;10	6;5;2
24.	93	8,4	7;3;1	6;5;2
25.	94	4,6	3;6;5	6;5;2

Контрольные вопросы.

1. Что такое модуляция и несущая частота (колебание)?
2. Какие виды аналоговой модуляции существуют?
3. Передача дискретных данных с использованием аналоговой модуляции.
4. Передача непрерывных данных с использованием аналоговой модуляции.
5. Какие виды импульсной модуляции существуют?

Лабораторная работа

МЕТОДЫ ЦИФРОВОГО И ЛОГИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ

Цель работы: изучение методов цифрового и логического кодирования сигналов.

Теоретические сведения

При *цифровом кодировании* дискретной информации применяют потенциальные и импульсные коды. В *потенциальных кодах* для представления логических единиц и нулей используется только значение потенциала сигнала, а его перепады, формирующие законченные импульсы, во внимание не принимаются. *Импульсные коды* позволяют представить двоичные данные либо импульсами определенной полярности, либо частью импульса — перепадом потенциала определенного направления.

При использовании прямоугольных импульсов для передачи дискретной информации необходимо выбрать такой способ кодирования, который одновременно достигал бы нескольких целей:

- *имел при одной и той же битовой скорости наименьшую ширину спектра результирующего сигнала;*
- *обеспечивал синхронизацию между передатчиком и приемником;*
- *обладал способностью распознавать ошибки;*
- *обладал низкой стоимостью реализации.*

Более узкий спектр сигналов позволяет на одной и той же линии (с одной и той же полосой пропускания) добиваться более высокой скорости передачи данных. Кроме того, часто к спектру сигнала предъявляется требование отсутствия постоянной составляющей, то есть наличия постоянного тока между передатчиком и приемником. В частности, применение различных трансформаторных схем гальванической развязки препятствует прохождению постоянного тока.

Синхронизация передатчика и приемника нужна для того, чтобы приемник точно знал, в какой момент времени необходимо считывать новую информацию с линии связи. Эта проблема в сетях решается сложнее, чем при обмене данными между близко расположенными устройствами, например между блоками внутри компьютера или же между компьютером и принтером. На небольших расстояниях хорошо работает схема, основанная на отдельной тактирующей линии связи, так что информация снимается с линии данных только в момент прихода тактового импульса. В сетях использование этой схемы вызывает трудности из-за неоднородности характеристик проводников в кабелях. На больших расстояниях неравномерность скорости распространения сигнала может привести к тому, что тактовый импульс придет настолько позже или раньше соответствующего сигнала данных, что бит данных будет пропущен или считан повторно.

Поэтому в сетях применяются так называемые самосинхронизирующиеся коды, сигналы которых несут для передатчика указания о том, в какой момент времени нужно осуществлять распознавание очередного бита (или нескольких

бит, если код ориентирован более чем на два состояния сигнала). Любой резкий перепад сигнала — так называемый фронт — может служить указанием для синхронизации приемника с передатчиком.

При использовании синусоид в качестве несущего сигнала результирующий код обладает свойством самосинхронизации, так как изменение амплитуды несущей частоты дает возможность приемнику определить момент появления входного кода.

Распознавание и коррекцию искаженных данных сложно осуществить средствами физического уровня, поэтому чаще всего эту работу берут на себя протоколы, лежащие выше: канальный, сетевой, транспортный или прикладной. С другой стороны, распознавание ошибок на физическом уровне экономит время, так как приемник не ждет полного помещения кадра в буфер, а отбраковывает его сразу при распознавании ошибочных бит внутри кадра.

Требования, предъявляемые к методам кодирования, являются взаимно противоречивыми, поэтому каждый из рассматриваемых ниже методов цифрового кодирования обладает своими преимуществами и своими недостатками по сравнению с другими.

На рис. 5.1, а показан метод потенциального кодирования, называемый также кодированием без возвращения к нулю (Non Return to Zero, NRZ). Последнее название отражает то обстоятельство, что при передаче последовательности единиц сигнал не возвращается к нулю в течение такта. Метод NRZ прост в реализации, обладает хорошей распознаваемостью ошибок (из-за двух резко отличающихся потенциалов), но не обладает свойством самосинхронизации. При передаче длинной последовательности единиц или нулей сигнал на линии не изменяется, поэтому приемник лишен возможности определять по входному сигналу моменты времени, когда нужно в очередной раз считывать данные. Даже при наличии высокоточного тактового генератора приемник может ошибиться с моментом съема данных, так как частоты двух генераторов никогда не бывают полностью идентичными. Поэтому при высоких скоростях обмена данными и длинных последовательностях единиц или нулей небольшое рассогласование тактовых частот может привести к ошибке в целый такт и, соответственно, считыванию некорректного значения бита.

Другим серьезным недостатком метода NRZ является наличие низкочастотной составляющей, которая приближается к нулю при передаче длинных последовательностей единиц или нулей. Из-за этого многие каналы связи, не обеспечивающие прямого гальванического соединения между приемником и источником, этот вид кодирования не поддерживают. В результате в чистом виде код NRZ в сетях не используется. Тем не менее, используются его различные модификации, в которых устраняют как плохую самосинхронизацию кода NRZ, так и наличие постоянной составляющей.

Одной из модификаций метода NRZ является метод биполярного кодирования с альтернативной инверсией (Bipolar Alternate Mark Inversion, AMI). В этом методе (рис. 5.1, б) используются три уровня потенциала — отрицательный, нулевой и положительный. Для кодирования логического нуля используется нулевой потенциал, а логическая единица кодируется либо положительным

потенциалом, либо отрицательным, при этом потенциал каждой новой единицы противоположен потенциалу предыдущей.

Код AMI частично ликвидирует проблемы постоянной составляющей и отсутствия самосинхронизации, присущие коду NRZ. Это происходит при передаче длинных последовательностей единиц. В этих случаях сигнал на линии представляет собой последовательность разнополярных импульсов. Длинные же последовательности нулей также опасны для кода AMI, как и для кода NRZ — сигнал вырождается в постоянный потенциал нулевой амплитуды.

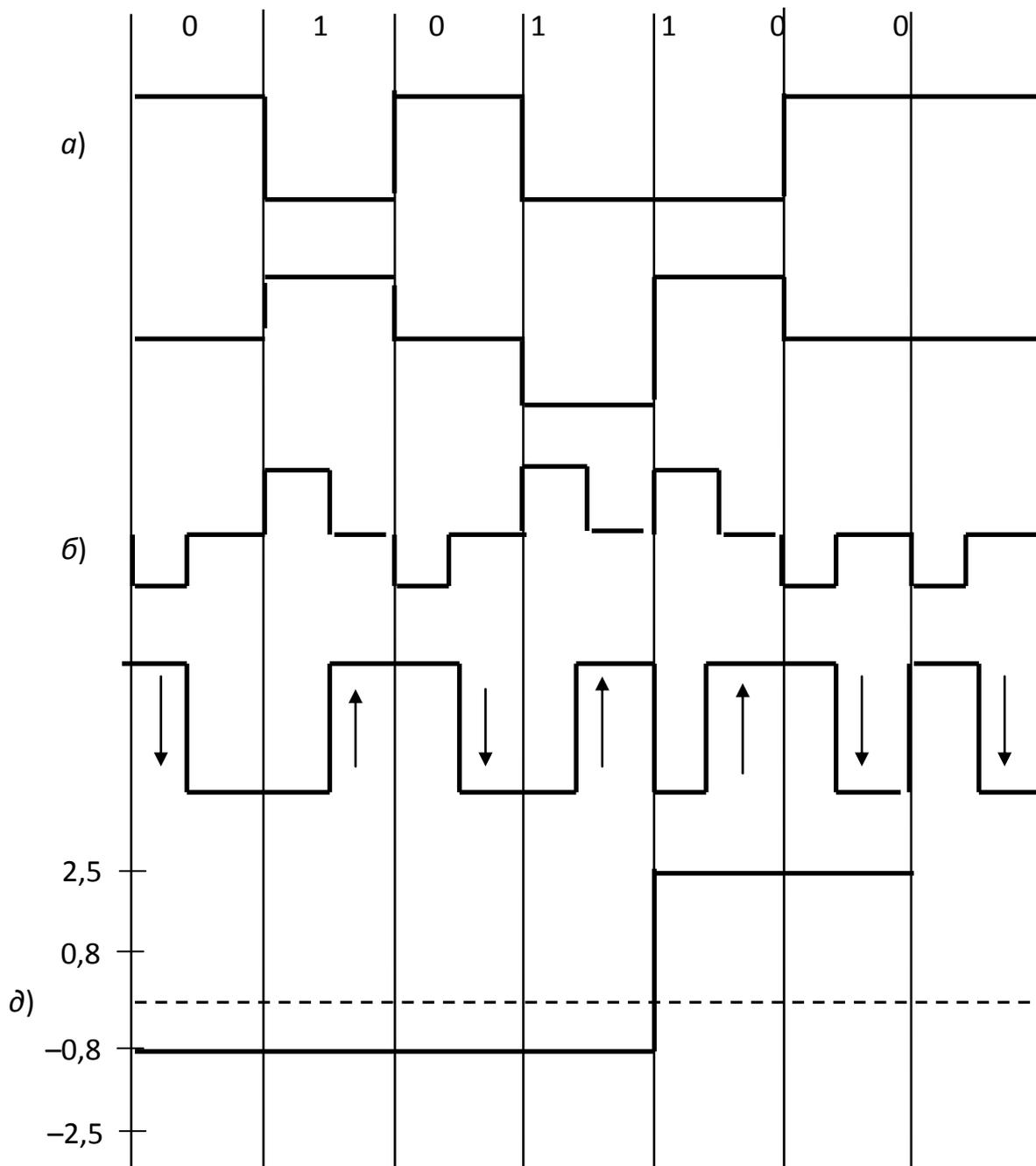


Рис. 5.1. Способы цифрового кодирования данных

Код AMI предоставляет также некоторые возможности по распознаванию ошибочных сигналов. Так, нарушение строгого чередования полярности сигналов говорит о ложном импульсе или исчезновении с линии корректного импульса. Сигнал с некорректной полярностью называется запрещенным сигналом.

В коде AMI используются не два, а три уровня сигнала на линии. Дополнительный уровень требует увеличение мощности передатчика примерно на 3 дБ для обеспечения той же достоверности приема бит на линии, что является общим недостатком кодов с несколькими состояниями сигнала по сравнению с кодами, которые различают только два состояния.

Кроме потенциальных кодов в сетях используются и импульсные коды, когда данные представлены полным импульсом или же его частью — фронтом. Наиболее простым случаем такого подхода является биполярный импульсный код, в котором единица представлена импульсом одной полярности, а ноль — другой (рис. 5.1, в). Каждый импульс длится половину такта. Такой код обладает отличными самосинхронизирующими свойствами, но постоянная составляющая может присутствовать, например, при передаче длинной последовательности единиц или нулей.

В манчестерском коде для кодирования единиц и нулей используется перепад потенциала, то есть фронт импульса (рис. 5.1, г). При манчестерском кодировании каждый такт делится на две части. Информация кодируется перепадами потенциала, происходящими в середине каждого такта. Единица кодируется перепадом от низкого уровня сигнала к высокому, а ноль — обратным перепадом. В начале каждого такта может происходить служебный перепад сигнала, если нужно представить несколько единиц или нулей подряд. Так как сигнал изменяется по крайней мере один раз за такт передачи одного бита данных, то манчестерский код обладает хорошими самосинхронизирующими свойствами. Манчестерский код имеет преимущество перед биполярным импульсным кодом. В последнем для передачи данных используются три уровня сигнала, а в манчестерском — два.

На рис. 5.1, д показан потенциальный код 2B1Q с четырьмя уровнями сигнала для кодирования данных, название которого отражает его суть — каждые два бита (2B) передаются за один такт сигналом, имеющим четыре состояния (1Q):

- паре бит 00 соответствует потенциал $-2,5$ В,
- паре бит 01 соответствует потенциал $-0,833$ В,
- паре бит 11 соответствует потенциал $+0,833$ В,
- паре бит 10 соответствует потенциал $+2,5$ В.

При этом способе кодирования требуются дополнительные меры по борьбе с длинными последовательностями одинаковых пар бит, так как при этом сигнал превращается в постоянную составляющую. Для его реализации мощность передатчика должна быть выше, чтобы четыре уровня четко различались приемником на фоне помех.

Логическое кодирование используется для улучшения потенциальных кодов типа AMI, NRZI и 2B1Q. Логическое кодирование должно заменять длинные последовательности бит, приводящие к постоянному потенциалу, вкраплениями единиц. Для логического кодирования характерны два метода — избыточные коды и скремблирование.

Избыточные коды основаны на разбиении исходной последовательности бит на порции, которые называют символами. Затем исходный символ заменяется на

новый, который имеет большее количество бит, чем исходный, то есть в исходный код добавляются избыточные биты, содержащих логические единицы. Очевидно, что в этом случае длинные последовательности нулей прерываются, и код становится самосинхронизирующимся для любых передаваемых данных. Исчезает также постоянная составляющая, а значит, еще более сужается спектр сигнала. Но этот метод снижает полезную пропускную способность линии, так как избыточные единицы пользовательской информации не несут.

Например, логический код 4В/5В заменяет исходные символы длиной в 4 бита на символы длиной в 5 бит. Так как результирующие символы содержат избыточные биты, то общее количество битовых комбинаций в них больше, чем в исходных. Так, в коде 4В/5В результирующие символы могут содержать 32 битовых комбинации, в то время как исходные символы — только 16. Поэтому в результирующем коде можно отобрать 16 таких комбинаций, которые не содержат большого количества нулей, а остальные считать запрещенными кодами. Кроме устранения постоянной составляющей и придания коду свойства самосинхронизации, избыточные коды позволяют приемнику распознавать искаженные биты. Если приемник принимает запрещенный код, значит, на линии произошло искажение сигнала. Соответствие исходных и результирующих кодов 4В/5В представлено в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Соответствие исходных и результирующих кодов 4В/5В

Исходный код	Результирующий код	Исходный код	Результирующий код
0000	11110	1000	10010
0001	01001	1001	10011
0010	10100	1010	10110
0011	10101	1011	10111
0100	01010	1100	11010
0101	01011	1101	11011
0110	01110	1110	11100
0111	01111	1111	11101

Код 4В/5В затем передается по линии с помощью физического кодирования по одному из методов потенциального кодирования, чувствительному только к длинным последовательностям нулей. Символы кода 4В/5В длиной 5 бит гарантируют, что при любом их сочетании на линии не могут встретиться более трех нулей подряд.

Использование таблицы перекодировки является очень простой операцией, поэтому этот подход не усложняет сетевые адаптеры и интерфейсные блоки коммутаторов и маршрутизаторов.

Скремблирование основано на предварительном «перемешивании» исходной информации таким образом, чтобы вероятность появления единиц и нулей на линии становилась близкой. Устройства, или блоки, выполняющие такую операцию, называются скремблерами (scramble — свалка, беспорядочная сборка). При скремблировании используется известный алгоритм, поэтому приемник, получив двоичные данные, передает их на дескремблер, который

восстанавливает исходную последовательность бит. Избыточные биты при этом по линии не передаются.

Методы скремблирования заключаются в побитном вычислении результирующего кода на основании бит исходного кода и полученных в предыдущих тактах бит результирующего кода. Например, скремблер может реализовывать следующее соотношение:

$$B_i = A_i \oplus B_{i-3} \oplus B_{i-5},$$

где B_i — двоичная цифра результирующего кода, полученная на i -м такте работы скремблера; A_i — двоичная цифра исходного кода, поступающая на i -м такте на вход скремблера; B_{i-3} , B_{i-5} — двоичные цифры результирующего кода, полученные на предыдущих тактах работы скремблера, соответственно на 3 и на 5 тактов ранее текущего такта; \oplus — операция исключающего ИЛИ ($1 \oplus 1 = 0$, $0 \oplus 0 = 0$, $1 \oplus 0 = 1$, $0 \oplus 1 = 1$).

После получения результирующей последовательности приемник передает ее дескремблеру, который восстанавливает исходную последовательность на основании обратного соотношения:

$$C_i = B_i \oplus B_{i-3} \oplus B_{i-5} = (A_i \oplus B_{i-3} \oplus B_{i-5}) \oplus B_{i-3} \oplus B_{i-5} = A_i.$$

Различные алгоритмы скремблирования отличаются количеством слагаемых, дающих цифру результирующего кода, и сдвигом между слагаемыми.

Задание.

1. Ознакомиться с методами цифрового и логического кодирования.
2. Провести кодирование заданной последовательности данных методами цифрового кодирования.
Построить амплитудный и фазовый спектры модулированных сигналов.
3. Провести кодирование заданной последовательности данных методами логического кодирования.
4. Сделать выводы по лабораторной работе.

Варианты.

№	Последовательность данных
1.	1011001000101110
2.	1010001010101010
3.	0001001010101110
4.	1011001010101000
5.	1001011001101000

6.	0110101000101110
7.	1011011010101000
8.	0011001001101010
9.	1101011010101010
10.	0011011010111010
11.	0011001010101110
12.	1010001000101010
13.	0101001010101110
14.	1011011010101000
15.	1001011001101010
16.	0110101000101000
17.	1011011011100000
18.	1011001000101010
19.	1101011010111010
20.	1011010010111010
21.	0100101001101000
22.	1011011001100000
23.	0011001010101010
24.	0101011010100010
25.	1011110010110010

Контрольные вопросы.

1. Требования, предъявляемые к методам цифрового кодирования.
2. Методы цифрового кодирования.
3. Назначение логического кодирования.
4. Методы логического кодирования.

**Методические
рекомендации по
изучению дисциплины**

Цели и задачи дисциплины

Целью изучения дисциплины «Модели и методы передачи данных» является подготовка бакалавров к решению задач, связанных с выбором и оценкой качества систем передачи данных при проектировании и эксплуатации информационных систем различного назначения. При изучении данного курса у студентов формируются знания, и навыки, необходимые для решения профессиональных задач.

Задачи дисциплины:

- 1) изучение основных принципов передачи данных по каналам связи в информационных системах;
- 2) изучение методов оценки качества каналов передачи цифровой информации, построенных на различных физических принципах передачи;
- 3) привитие навыков анализировать предлагаемые методы передачи данных с целью выявления их возможностей применения в информационных системах с заданными качественными характеристиками;
- 4) выработка навыков составления моделей оценки информационных параметров систем передачи данных;
- 5) привитие навыков использования специальной литературы, содержащей справочные материалы, относящиеся к системам передачи данных.

Описание последовательности изучения УМК

Учебно-методический комплекс (УМК) призван помочь студентам в организации самостоятельной работы по освоению курса «Модели и методы передачи данных». Дисциплина «Модели и методы передачи данных» относится к дисциплинам по выбору вариативной части профессионального цикла дисциплин (БЗ) и изучается в 6 семестре. В течение семестра предлагается тест текущего контроля знаний, завершающим этапом изучения дисциплины является сдача экзамена.

Комплекс содержит рабочую программу дисциплины, составленную в строгом соответствии с учебным планом по специальности и государственным образовательным стандартом ВПО. Учебно-методические материалы по подготовке лекционных и лабораторных занятий в УМК представлены отдельно по каждому разделу курса «Модели и методы передачи данных» в соответствии с программой дисциплины и последовательностью изучения.

В каждом разделе даны:

- 1) учебно-методические материалы лекционного курса, включающие подробный план лекций по каждой изучаемой теме, вопросы и задания для самоконтроля, список основной и дополнительной литературы, с указанием конкретных разделов;
- 2) учебно-методические материалы по подготовке лабораторных занятий, содержащие планы проведения занятий с указанием последовательности рассматриваемых тем, задания для самостоятельной работы, краткие теоретические и учебно-методические материалы по теме, систему заданий для

самопроверки. Выполнение заданий даст возможность студентам глубже усвоить теоретический материал, применить полученные знания на практике, выработать прочные умения и навыки использования технологии программирования при решении практических задач профессиональной сферы, в том числе и в кооперации с коллегами.

В комплексе представлены также контрольные тесты по всем разделам курса «Модели и методы передачи данных», которые позволят проверить уровень усвоения изученного материала. Задания для самопроверки сопровождаются теоретическими справками и методическими рекомендациями.

Рекомендации изучения отдельных тем курса

Материал курса разбит на 3 раздела.

При изучении первого раздела «Теория сигналов и основные понятия теории передачи данных» следует обратить внимание на основные понятия теории передачи данных; классификацию сигналов и систем передачи данных; аппаратуру и типы линий связи; характеристики линий связи.

Для освоения методов предварительной обработки данных и исследование пропускной способности каналов передачи данных предусмотрены лабораторные работы. Каждый студент выполняет свой вариант задания.

При изучении второго раздела «Методы передачи данных на физическом уровне и технологии передачи данных на канальном уровне» следует обратить внимание на методы модуляции, цифрового и логического кодирования; методы помехоустойчивого и эффективного кодирования; виды связи и режимы передачи данных; методы обнаружения и коррекции ошибок; методы компрессии (сжатия) данных.

Для изучения второго раздела предусмотрены лабораторные работы, на которых изучаются все рассматриваемые во втором разделе темы. Каждый студент выполняет свой вариант задания.

При изучении третьего раздела «Методы коммутации и современные системы передачи данных» необходимо ознакомиться с методами коммутации каналов, пакетов и сообщений; принципами работы телефонных сетей, модемов, факсов, телевизионных систем, сети Internet, систем радиосвязи.

Для изучения третьего раздела предусмотрена лабораторная работа в форме деловой игры «Проектирование телекоммуникационных сетей предприятий». Целью деловой игры является помощь студентам в освоении стиля работы специалиста по телекоммуникационным системам, в круг задач которого входят анализ информационного процесса передачи данных организации, определение номенклатуры необходимых технических средств связи, аргументированный выбор оптимального по качественным и экономическим показателям оборудования.

Особенности самостоятельного изучения курса.

Советы для подготовки к рейтинговому контролю и экзамену

Прежде чем приступить к выполнению заданий для самоконтроля, студентам необходимо изучить материал лекций и сопоставить его с трактовками, предлагаемыми в рекомендуемой по каждой теме литературе.

На дневном отделении в качестве основных элементов учебного процесса выступают проблемно-ориентированные лекции с объяснением и иллюстрированием ключевых понятий. Лабораторные занятия организованы в компьютерных классах по выполнению конкретных практических задач. Ход и уровень усвоения материала студентами очного отделения оцениваются с помощью рейтинговой шкалы. Максимальная сумма, которую можно набрать, успешно выполнив все тесты (включая итоговый), составляет 100 баллов.

Распределение баллов за текущую работу

Вид текущей учебной работы	Количество баллов
Тестовый контроль	15
Выполнение лабораторных работ	35
Экзамен	50
Итого	100

Для студентов особое значение приобретает самостоятельная проработка материала курса по учебникам и пособиям, в том числе и кафедральным.

Общий список учебной, учебно-методической и научной литературы представлен в рабочей программе, курсе лекций и методических рекомендациях по каждой тематике.

Следует учитывать тот факт, что отводимые на изучение курса «Модели и методы передачи данных» часы не позволяют в полной мере охватить все разделы, отведенные к данному курсу. Более подробно, некоторые разделы курса «Модели и методы передачи данных» предлагается студентам изучать индивидуально. Индивидуальная работа студента предполагает самостоятельное составление конспекта и изучение рекомендуемой литературы. Работу следует начинать с прочтения материала с целью уяснения его содержания, основной идеи, выделения выводов и аргументов автора. Конспектировать рекомендуется лишь при повторном чтении.

Особое внимание следует обращать на определение основных понятий дисциплины. Студент должен подробно разбирать приведенные примеры на лекциях и лабораторных работах и уметь строить аналогичные примеры самостоятельно. Это является одним из важных условий усвоения дисциплины.

Все пропущенные лабораторные занятия подлежат отработке. Форма отработки — сдача задания по теме. В рамках самостоятельной работы организуется проведение консультаций, на которых будет осуществляться обсуждение прошедших заданий, а также прием отработки пропущенных занятий и лабораторных работ. На консультациях же вы сможете получить ответы на

любые вопросы, возникшие по ходу освоения курса в целом и по выполнению заданий.

Распределение времени для самостоятельной работы студентов

№ п.п.	Вид самостоятельной работы	Объем времени, час				Рекомендуем ая литература
		норм. срок обучения		сокращ. (ускорен.)		
		очная	заочная	очная	заочная	
1	2	3	4	5	6	7
1	Усвоение текущего материала	10	10		12	[6.1.1—6.1.4, 6.3.1— 6.3.6]
2	Самостоятельное изучение теоретического материала	28	40		40	[6.1.1—6.1.4, 6.3.1— 6.3.6]
3	Выполнение курсовой работы					
4	Выполнение контрольной работы		44		44	[6.6.1]
5	Подготовка к практическим и лабораторным занятиям	20				[6.4.1, 6.4.2]
6	Подготовка к экзамену	36	36		36	[6.1.1—6.1.4, 6.3.1— 6.3.6]
Итого		94	130		132	

Для контроля самостоятельной работы студентов используется экзамен. Экзамен проводится в устной форме, вопросы по подготовки к экзамену составлены с учетом всех тем курса в соответствии с программой. Экзаменационный билет содержит два теоретических вопроса.

Рекомендации по работе с литературой

При изучении дисциплины особое внимание следует обратить на следующие литературные источники:

№	Автор	Название	Издательство	Гриф издания	Год издания	Кол-во в библиотеке	Ссылка на электронный ресурс	Доступность
1	2	3	4	5	6	7	8	9
6.1 Основная литература								
6.1.1	Чекмарев Ю.В.	Вычислительные системы, сети и телекоммуникации	М.: «ДМК Пресс»	Допущено УМО	2009		http://e.lanbook.com	С любой точки доступа для авторизованных пользователей
6.1.2	Хохлова Н.М.	Информационные технологии (конспект лекций)	М.: Приор-издат	Учебник	2007	10		
6.1.3	Пескова С.А.	Сети и телекоммуникации	М.: Академия	Учеб. для вузов	2006	5		
6.1.4	Кульгин М.	Технологии корпоративных сетей	СПб.: Питер	Энциклопедия	2005	32		
6.2 Периодическая литература								
6.3 Дополнительная литература								
6.3.1	Богданов-Катьков Н.В.	Интернет: Настольная книга пользователя	М.: Эком	Учебное пособие	2005	2		
6.3.2	Браун М.	Методы поиска информации в	М.: Новый издат.	Учеб. для	2005	8		

Компьютерная поддержка презентаций в рекламе

		Интернет	дом	вузов				
6.3.3	В.Г. Олифер, Н.А. Олифер	Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы	СПб.: Питер	Учебное пособие	2001	10		
6.3.4	Галкин В.А., Григорьев Ю.А.	Телекоммуникации и сети	М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана	Учебное пособие	2003	8		
6.3.5	Б.Я. Советов, В.В. Цехановский	Информационные технологии	М.: Высш. шк	Учеб. для вузов	2003	10		
6.3.6	Сергиенко Л.Б.	Цифровая обработка сигналов	СПб.: Питер	Учеб. для вузов	2003	9		
6.4 Практические (семинарские) и (или) лабораторные занятия								
6.4.1	Цветкова О.Л.	Исследование методов передачи данных: Метод. указания к лабораторным работам № 1—5 по дисциплинам «Модели и методы передачи данных», «Передача данных в технических системах»	РГАСХ М ГОУ, Ростов н/Д	МУ	2009	50		

Компьютерная поддержка презентаций в рекламе

6.4.2	Зотов А.И., Цветкова О.Л.	Проектирование телекоммуникационных сетей предприятий: метод. указания к деловой игре по дисциплине «Модели и методы передачи данных»	РГАСХ М ГОУ, Ростов н/Д	МУ	2005	40		
6.5 Курсовая работа								
6.6 Контрольные работы								
6.6.1	Цветкова О.Л.	Исследование методов передачи данных: Метод. указания к лабораторным работам № 1—5 по дисциплинам «Модели и методы передачи данных», «Передача данных в технических системах»	РГАСХ М ГОУ, Ростов н/Д	МУ	2009	50		
6.7 Программно-информационное обеспечение дисциплины, Интернет-ресурсы								
6.7.1 Пакет прикладных программ MathCad								
6.7.2 Официальный сайт программного продукта:								
MathCad — www.ptc.com/product/mathcad								