

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Современные радиосистемы представляют собой область техники, которая базируется на достижениях ряда дисциплин: электродинамика и распространение радиоволн, радиотехнические цепи и сигналы, антенны и устройства СВЧ, радиоавтоматика, устройства генерирования и формирования сигналов.

Статистическая теория радиосистем базируется на этих дисциплинах – и в то же время является основой для анализа и синтеза современных радиосистем передачи и приёма информации с учётом различных внешних и внутренних помех. Поэтому для успешного овладения статистической теорией радиотехнических систем необходимо опираться на изученные ранее технические дисциплины, а также повторить основные разделы метрологии, радиоизмерений и математики, в особенности – теорию вероятностей и математическую статистику.

Основная форма изучения материала – самостоятельная работа студента. По наиболее трудным для усвоения разделам программы читаются лекции и проводятся практические занятия. По всем разделам курса студенты могут получить консультации на кафедре радиотехники.

Для контроля усвоения материала по каждой теме в данном методическом комплексе приводятся вопросы для самопроверки, представляющие собой основное содержание экзаменационных билетов.

Для того чтобы быть допущенным к экзамену по дисциплине, студенты должны изучить теоретический материал, самостоятельно решить достаточное для понимания теоретического материала количество задач и выполнить контрольную работу.

Введение

Приступая к изучению дисциплины, необходимо обратить внимание на понятия “система” и “радиосистема”. Под системой будем понимать любую целостную совокупность определенным образом взаимодействующих между собой и взаимосвязанных разнородных функционально законченных элементов (устройств, комплексов, подсистем), совместно выполняющих заданные функции (решающих общую задачу).

Радиотехнические системы (РТС) отличаются от других систем наличием в своём составе канала радиосвязи, позволяющего осуществлять **информационное** взаимодействие подсистем на больших расстояниях и в движении с помощью электромагнитных волн радиодиапазона. Отсюда – подразделение всех видов РТС на РТС обмена информацией, информационно-обеспечивающие РТС, радиоизмерительные системы, системы радиопротиводействия и радиоподавления, а также системы автоматического радиоуправления.

После внимательного изучения обобщённой структуры РТС и анализа особенностей её функционирования можно сформулировать основные задачи, решаемые составными частями РТС, и наметить **вероятностный подход** к анализу и синтезу устройств и подсистем различных РТС.

3.1. Элементы теории вероятностей

Следует глубоко понять и чётко усвоить особенности вероятностного подхода к количественному анализу сложных явлений и процессов.

Если “обычная математика” имеет дело с количественными закономерностями **конкретных** событий, множеств, величин, векторов и тому подобных *детерминированных* (строго определённых) математических объектов, то теория вероятностей оперирует с “размытыми” (неопределёнными, случайными, многовариантными) объектами, а строгие количественные закономерности относятся к **вероятностным характеристикам ансамблей** (множеств) этих объектов.

В то же время подавляющее большинство дисциплин, изученных студентами в средней и высшей школах, основано на формально-логических детерминистских построениях. Именно в “непривычности” вероятностного подхода к изучению различных явлений заключается трудность освоения статистических дисциплин. Это *психологическое препятствие* следует преодолевать путём внимательного и последовательного усвоения *логики построения* вероятностных моделей, переходя от простых ситуаций к более сложным.

Исходя из этого в разд.3.1 выводятся вероятностные закономерности в простейшей области **равновероятных независимых** событий, в том числе очень важные для дальнейшего формулы полной вероятности и Байеса.

При рассмотрении **неравновероятных** независимых событий следует усвоить аксиоматику Колмогорова, которая сделала теорию вероятностей такой же “строгой” математической дисциплиной, какими являются детерминистские разделы математики.

При рассмотрении вероятностных моделей **скалярных** случайных величин следует чётко различать случаи дискретных и непрерывных случайных величин. В первом случае основным математическим аппаратом анализа вероятностных закономерностей является *комбинаторика*, во втором – *дифференциальное и интегральное исчисление*.

При переходе к **векторным** случайным величинам необходимо различать **формальные** векторы как совокупности разнородных случайных величин и **собственно** случайные векторы как направленные отрезки в евклидовых (двух-, трёх- и многомерных) пространствах.

Комплексные нормальные случайные величины и векторы следует рассматривать как весьма полезные *формальные обобщения* действительных величин и векторов и не пытаться найти какие-либо рациональные интерпретации. Тем более, что в теории радиотехнических цепей и сигналов, а также в электродинамике такая формализация приводила к успешному решению весьма сложных *линейных* задач.

Ещё более абстрактным обобщением являются **бесконечномерные комплексные** нормальные случайные векторы.

3.2. Основные методы математической статистики

Математическая статистика ближе к *практической деятельности* радиоинженера, чем формальная теория вероятностей, и должна усваиваться достаточно легко: кто не строил гистограмм и не проводил статистической обработки результатов измерений при проведении лабораторных работ по физике и другим дисциплинам? Однако овладение методами проверки статистических гипотез, на которых основаны методы обнаружения, различения и разрешения сигналов в различных РТС, даётся с гораздо большим трудом. При изучении этих разделов математической статистики полезно параллельное рассмотрение какой-нибудь конкретной задачи и решение как можно большего количества задач.

3.3. Введение в прикладную теорию информации

В существующей учебной литературе по прикладной теории информации имеется ряд неясностей и трудностей для понимания теоретических выводов. Поэтому следует вначале внимательно прослушать соответствующую лекцию преподавателя и прояснить у него неясные вопросы, а затем осваивать учебные пособия по прикладной теории информации.

Важно понять, что прикладная теория информации прежде всего предназначена для **количественной** оценки **качества** результатов обработки, хранения, передачи и приёма **знаковой** информации. **Знаком** является чувственно воспринимаемый материальный объект, выступающий в качестве представителя какого-либо предмета, свойства или отношения. Например слово “радиоволна” является **знаком**, обозначающим процесс распространения электромагнитных колебаний в пространстве. Элементарными знаками в языковых системах являются письменные буквы или соответствующие им речевые фонемы.

Общими вопросами, связанными с информацией, занимается **семиотика**, которая имеет три раздела: **синтаксис** (структура знаковых систем), **семантику** (смысловое значение знаковых сообщений) и **прагматику** (ценность получаемой информации). Основные количественные свойства знаковой информации определяются на семантическом уровне семиотики. В то же время технические средства обработки знаковой информации не могут оперировать смысловыми понятиями. Поэтому семантические свойства количества информации на синтаксический уровень переносятся как соответствующие **формально-математические аксиомы**, из которых однозначно вытекает логарифмическая мера количества информации, переносимой данным знаком.

Усвоив это, следует освоить основные свойства этой логарифмической меры и количественные характеристики источников знаковых сообщений. Затем рассмотреть меру количества информации, утрачиваемой в процессе её преобразования, хранения, передачи и восприятия получателем информации. Рассмотрев эти вопросы на элементарном примере бинарной системы передачи информации и “догадавшись” о математическом выражении для оценки потерь информации при её искажении в процессе всевозможных преобразований,

следует **постулировать** эту оценку как **четвёртую** аксиому прикладной теории информации. Нужно проанализировать другие эквивалентные математические формы выражения этой оценки и рассмотреть их интерпретацию и практическое использование.

Переходя к количественной оценке **метрологической** (“непрерывной”) информации, следует обратить внимание на коренные противоречия, возникающие при **формальном перенесении** определений теории информации знаковых систем на метрологические системы – и проследить аналогичное знаковым системам **аксиоматическое построение** количественной меры информативности результатов измерений скалярных величин, которое приводит к информационной мере Р. Фишера. Для выяснения различий и аналогий мер Шеннона и Фишера нужно разобраться в процессах **квантования** измеряемой непрерывной величины и передачи по каналу электросвязи знаковой информации уровнями напряжения или тока в канале, а также в размерностях этих информационных мер.

Затем процессы кодирования, преобразования и приема информации рассматриваются в динамике и выясняются вопросы согласования производительности источников сообщений с пропускной способностью каналов передачи информации в отсутствие и при наличии различных помех и искажений. При этом обнаруживается существенное различие в процессах помехоустойчивого канального кодирования и кодирования сообщений самих источников. Если во втором случае кодирование позволяет снять естественную избыточность знаковых систем, то при канальном кодировании вводится дополнительная знаковая избыточность по определённым, **известным получателю информации**, правилам, которые позволяют не только обнаружить, но и исправить искажения знаковой информации. Тем самым реализуется центральная теорема (Шеннона) теории информации о том, что даже при наличии существенных помех в каналах передачи информации возможна её передача практически без потерь.

3.4. Случайные сигналы и их вероятностные модели

На основании математических положений разд.1-3 даётся последовательное построение системы типовых вероятностных моделей случайных радиотехнических сигналов: от простейшей модели случайных периодических сигналов до комплексных и векторных случайных процессов.

Здесь следует обратить внимание на существенную общность этих моделей и на единство логики их построения: разложение (представление) **реализаций** случайных процессов на некоррелированные составляющие (канонические представления). Если элементы разложения являются детерминистски ортогональными, то получаются различные ортогональные канонические представления: по теореме Карунена-Лозва – в случае сигналов с конечной энергией, по теореме Винера-Хинчина – в случае стационарных сигналов с ограниченной мощностью. Поэтому теоремы Карунена-Лозва и Винера-Хинчина

являются частными случаями ортогонального канонического представления случайных процессов общего вида. Такие представления позволяют легко решать (аналитически) всевозможные **линейные** задачи статистической радиотехники и получать алгоритмы цифрового моделирования реализаций случайных процессов – для численного решения различных **нелинейных** задач.

3.5. Пространственно-временные радиосигналы

Рассматриваются скалярные и векторные случайные функции в двумерном и в трёхмерном евклидовых пространствах (случайные поля), их основные вероятностные свойства и представления.

Для однородных изотропных векторных случайных полей рассматриваются свойства пространственных корреляционных функций и выводятся теоремы Обухова и Кармана.

Аналогично случайным процессам следует рассмотреть спектрально-корреляционное представление случайных полей.

Пространственно-временные случайные **гармонические** радиосигналы удобно представлять в виде комплексных случайных полей, а их спектральное разложение позволяет достаточно просто решать многие **линейные** задачи статистической радиофизики.

3.6. Оптимальная фильтрация сигналов

Здесь обращают на себя внимание особенности решения задач сглаживания, интерполяции и экстраполяции реализаций сигналов на фоне аддитивных стационарных помех

В простейшей постановке этих задач считается, что реализация принятого колебания, содержащая известный сигнал в смеси с помехой, зарегистрирована на временном промежутке от $-\infty$ до $+\infty$. Затем отмечается, что в реальных условиях (при обработке сигналов в реальном масштабе времени) эта реализация известна только на промежутке от $-\infty$ до текущего момента времени. Это приводит к необходимости нахождения такого фильтра, который реагирует только на предшествующие значения колебаний, то есть импульсной характеристики физически реализуемого линейного фильтра. Такой фильтр находится методами теории функций комплексной переменной. Осознав это, следует **запомнить формулу** для нахождения импульсной характеристики оптимального физически реализуемого фильтра.

3.7. Основы теории поиска и обнаружения сигналов

Следует обратить внимание на взаимосвязанность общих задач поиска и обнаружения сигналов на фоне помех. Если сигнал не обнаружен в искомой области, то одноканальный приёмник сигналов переходит к обнаружению сигнала в соседней области (последовательный поиск) – либо производится обнаружение сигнала одновременно в нескольких областях возможных значений его параметров (параллельный поиск). При этом воздействие помех приводит к ошибкам в работе решающего устройства двоякого рода: “пропуск сигнала” и “ложное срабатывание” – и возникает задача **оптимизации** принимаемого решения.

Для оптимизации алгоритма работы обнаружителя следует (разработчикам и заказчикам аппаратуры РТС) *заранее договориться о критерии оптимальности*. Для возможности выбора типового критерия разработаны различные общие критерии, в особенностях применения которых необходимо разобраться.

Далее рассматриваются типичные варианты постановки и решения задачи обнаружения в зависимости от объёма априорной информации о характеристиках сигналов и помех.

3.8. Измерение и оптимальное оценивание неизвестных параметров сигналов

Рассмотрение этой проблемы следует начинать с простейшего линейного (средневзвешенного) оценивания одного из энергетических параметров (амплитуды или энергии) сигнала известной формы, временного положения флуктуирующего сигнала произвольной формы, частоты несущей узкополосного радиосигнала.

Затем нужно рассмотреть обобщение решения этих задач на случай совместного измерения нескольких параметров радиосигналов, в том числе – временной задержки и доплеровского сдвига несущей радиосигнала.

Наконец – рассмотреть общие методы оптимального оценивания произвольных параметров сигналов, структуры оптимальных измерителей и их статистические характеристики.

3.9. Различение и разрешение сигналов. Сложные сигналы.

Следует чётко понять различие в постановке задач **разрешения** сигналов как определение того, **сколько** известных сигналов одновременно присутствует в принятом высокочастотном колебании, и задач **различения** сигналов как определение того, **какой** сигнал (из ансамбля возможных) присутствует в принятой смеси некоторого сигнала и помехи.

Задачи разрешения сигналов имеют две разновидности: разрешение через **обнаружение** различных сигналов и разрешение через **измерение** параметров одновременно присутствующих сигналов.

Особенно большое значение задача “разрешение-измерение параметров” имеет в радиолокации, где измеряемыми параметрами являются задержка во времени и доплеровский сдвиг частоты несущей радиосигнала. Здесь следует разобраться в теоретическом подходе к методам устранения противоречий, возникающих при совместном прецизионном (высокоточном) измерении этих параметров. Эти методы приводят к необходимости построения сложных сигналов, имеющих оптимальную для решения задачи “разрешение-измерение параметров” функцию неопределённости.

3.10. Структуры оптимальных обнаружителей, различителей; их качественные показатели

На основе материалов разд.7 и 9 достаточно просто разобраться в структурных схемах оптимальных и подоптимальных обнаружителей и различителей сигналов и их технических характеристиках.

3.11. Методы расчета статистических характеристик пространственно-временных радиосигналов

Тематика разд.11 несколько выходит за рамки обязательного содержания дисциплины “Статистическая теория радиотехнических систем” и относится к содержанию *статистической радиофизики*. Однако радиоинженер должен **иметь представление** о том, что происходит с излучаемыми в РТС радиосигналами на трассах распространения радиоволн используемого в данной радиосистеме диапазона при наличии на трассах различных случайных неоднородностей, а также какими статистическими характеристиками обладают внешние радиопомехи, которые поступают на антенно-фидерные устройства РТС. Тем более что физико-математическая подготовка студентов специальности 210302 достаточна для усвоения элементов статистической радиофизики.

В связи с этим в разд.11 рассматриваются простейшие задачи, с которыми может столкнуться радиоинженер при анализе функционирования или при проектировании современных высококачественных радиосистем: оценка пространственно-временной корреляции внешних радиопомех, радиозондирование шероховатых поверхностей или исследование статистических характеристик рассеянных на таких поверхностях радиосигналов, радиопросвечивание стохастической среды распространения и т. п.

Рассматриваются также методы оценки эффективной площади рассеяния радиолокационных целей и случайных совокупностей пассивных отражателей (радиолокационных помех).

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое “система” и чем радиотехнические системы отличаются от других технических систем?
2. Что такое “вероятностный подход к анализу и синтезу РТС” и чем он отличается от детерминистского конструирования РТС?
3. Какие основные вероятностные задачи составляют содержание статистической теории РТС?
4. Какова структура вероятностной модели конечной совокупности случайных событий?
5. Каков теоретический и прикладной смысл теорем полной вероятности и Байеса?
6. Какова структура вероятностной модели действительных случайных величин?
7. Каким образом преобразуются законы распределения случайных величин при линейных и нелинейных преобразованиях последних?
8. Что такое “векторные случайные величины” и чем они характеризуются?
9. Что такое “гауссовские или нормальные случайные величины и векторы”?
10. Что такое “выборка” и “статистика (функция выборки)”?
11. Каковы основные требования к точечным оценкам параметров распределения случайных величин?
12. Общие методы получения точечных оценок.
13. Что такое “интервальное оценивание” и чем оно характеризуется?
14. Что такое “простые гипотезы” и каким образом они проверяются?
15. Каким образом измеряется количество информации, содержащейся в знаковом сообщении?
16. Что такое “избыточность источника знаковых сообщений” и чем она характеризуется?
17. Каким образом измеряется количество информации, теряемое в каналах передачи знаковых сообщений?
18. Как определить пропускную способность канала связи?
19. Что такое “стохастическая эквивалентность различных совокупностей реализаций случайных функций”?
20. Чем отличается каноническое представление случайных функций от ортогонального?
21. Каков вероятностный смысл теоремы Карунена-Лоэва?
22. Каков вероятностный смысл теоремы Винера-Хинчина?
23. Особенности вероятностных моделей комплексных и векторных случайных величин и функций.
24. Каким образом представляются скалярные и векторные случайные пространственно-временные случайные поля?

25. Каков вероятностный смысл критерия оптимальности линейного фильтра?
26. Каков математический смысл физической реализуемости оптимального фильтра?
27. В чём существо оптимальности устройства автоматического обнаружения сигналов?
28. Что такое “характеристики обнаружения априори известного сигнала”?
29. Каким образом можно увеличить отношение “сигнал/помеха” в устройстве обнаружения сигнала?
30. Основные критерии оптимальности устройства обнаружения.
31. Поиск и обнаружение радиосигналов с неизвестными значениями параметров.
32. Пространственно-временные радиосигналы и особенности их обнаружения.
33. Каким образом получают оптимальные оценки энергетических параметров сигналов известной формы?
34. Что такое “потенциальная точность оценки параметра сигнала”?
35. Каким образом строится интервальная оценка параметров сигналов?
36. Каким образом оценивается потенциальная точность определения временного положения сигналов?
37. Каким образом оценивается потенциальная точность определения частоты несущей узкополосного радиосигнала?
38. Совместное определение временного положения и частоты несущей узкополосного радиосигнала. Функция неопределённости радиосигнала.
39. Чем отличается различение сигналов от разрешения сигналов?
40. Какова смысловая связь задач оптимального различения сигналов и оценки потери информации в каналах передачи сообщений?
41. Чем отличаются решения задач “разрешение-обнаружение” и “разрешение-измерение параметров сигналов”?
42. Чем отличаются простые радиосигналы от сложных?
43. В чём состоит “принцип неопределённости” в статистической радиотехнике?
44. Чем отличается согласованный фильтр от коррелятора?
45. Чем отличается параллельная оптимальная обработка сигналов от последовательной?
46. Каковы основные задачи статистической радиофизики?
47. Что такое “трасса распространения радиосигнала” и “зоны Френеля”?
48. В чём состоят особенности пространственно-временных корреляционных функций случайных полей внешних радиопомех?
49. Что такое “случайный коэффициент Френеля” и каков его физико-статистический смысл?
50. В чём состоит метод точечных рассеивателей и при каких условиях он применяется ?

51. В чём состоит метод Релея-Ганса и при каких условиях он применяется ?
52. В чём состоит метод Релея-Райса и при каких условиях он применяется ?
53. В чём состоит метод модулированных мод (Рытова) и при каких условиях он применяется ?
54. Чем отличается распределённая радиолокационная цель от точечной?
55. Что такое поверхностные и что такое объёмные радиолокационные цели?
56. Каковы характеристики рассеяния основных моделей элементарных радиолокационных целей?
57. Каковы характеристики рассеяния простейшей модели сложной точечной цели?
58. Каков закон распределения амплитуд радиолокационных сигналов, рассеянных сложными точечными целями?
59. Что такое “эффективная площадь рассеяния” (ЭПР) радиолокационной цели?
60. Каким образом рассчитывается ЭПР сложной точечной и распределённой целей?
61. Каковы основные особенности рассеяния радиоволн поверхностью земли и морской поверхностью?
62. Каким образом оцениваются размеры элемента разрешения радиолокационных целей?
63. Что такое деполяризация радиосигналов при их рассеянии?

5. ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЮ

Целью выполнения контрольной работы является проверка умения студентов применять полученные теоретические знания при решении типовых задач статистической радиотехники.

Работу следует выполнять на стандартных сброшюрованных листах размером 297×210 мм или в ученической тетради, оставляя поля шириной 20 мм. Титульный лист должен быть оформлен по установленным в СЗТУ правилам; остальной материал – в соответствии с требованиями ЕСКД. Работу необходимо датировать и подписать. Исправлять не зачтенную работу следует так, чтобы рецензент мог сопоставить первоначальный и новый тексты. Переработки большого объема можно приводить на отдельных листах.

По данной дисциплине студент должен решить одну из представленных ниже задач. Номер задачи выбирается по предпоследней цифре шифра, исходные данные – по последней цифре шифра студента.

Задача 1. Напряжение U , являющееся нормальной случайной величиной со средним значением \bar{U} и с дисперсией σ^2 , подаётся на нелинейный элемент с вольт-амперной характеристикой вида

$$I(U) = a U^n \text{ при } U > 0; I(U) = 0 \text{ при } U \leq 0 \quad (a > 0).$$

Какова плотность вероятности $p(I)$ в нелинейном элементе?

Данные для решения задачи приведены в табл.1.

Таблица 1

| № вари- анта | \bar{U} | σ | a | n | № вари- анта | \bar{U} | σ | a | n |
|--------------------|-----------|----------|-----|-----|--------------------|-----------|----------|-----|-----|
| | В | В | – | – | | В | В | – | – |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 6 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 2 | 0 | 1 | 2 | 1 | 7 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| 3 | 0 | 2 | 2 | 2 | 8 | –1 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 0 | 3 | 3 | 3 | 9 | –1 | 1 | 1 | 2 |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | –1 | 2 | 2 | 3 |

Указание. При решении задачи воспользоваться таблицами значений интеграла вероятности $\Phi(x)$ или $\operatorname{erf}(x)$ из любого справочника по высшей математике (И. Н. Бронштейн и К. А. Семендяев, Г. Корн и Т. Корн и т. п.), учебника по теории вероятностей (Б. В. Гнеденко, Е. С. Вентцель, В. Феллер и т. п.) или по статистической радиотехнике (Б. Р. Левин, В. С. Пугачёв т. п.).

Задача 2. На вход электрической цепи (см. рисунок) поступает напряжение $u_{\text{вх}}(t)$, представляющее собой аддитивную смесь сигнала $s(t)$ и “белого шума” $n(t)$ со спектральной плотностью мощности N_0 .



Определить спектральную плотность мощности $W(\omega)$ напряжения на выходе цепи $u_{\text{вых}}(t)$. Вычислить точки экстремумов кривой $W(\omega)$ и начертить её примерный вид.

Данные для решения задачи приведены в табл.2.

Таблица 2

| Номер варианта | C | L | R | Номер варианта | C | L | R |
|-------------------|-----|------|-----|-------------------|-----|------|-----|
| | пФ | мкГн | Ом | | пФ | мкГн | Ом |
| 1 | 10 | 1 | 100 | 6 | 1 | 0,1 | 1 |
| 2 | 1 | 10 | 100 | 7 | 0,1 | 0,1 | 50 |
| 3 | 10 | 1 | 10 | 8 | 0,1 | 0,1 | 25 |
| 4 | 1 | 10 | 10 | 9 | 0,5 | 0,5 | 50 |
| 5 | 1 | 0,1 | 10 | 0 | 0,5 | 0,5 | 25 |

Задача 3. Определить избыточность и закодировать в соответствии с алгоритмом Шеннона-Фано элементарные сообщения источника дискретных знаковых сообщений $U = \{a_1, a_2, \dots, a_8\}$.

Априорные вероятности сообщений a_1, a_2, \dots, a_8 приведены в табл.3.

Таблица 3

| № | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | a_5 | a_6 | a_7 | a_8 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0,1 | 0,05 | 0,05 | 0,3 | 0,1 | 0,05 | 0,2 | 0,15 |
| 2 | 0,1 | 0,25 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,08 | 0,15 | 0,07 |
| 3 | 0 | 0,2 | 0,1 | 0,15 | 0,1 | 0,15 | 0,25 | 0,05 |
| 4 | 0,02 | 0,02 | 0,3 | 0,1 | 0,04 | 0,12 | 0,2 | 0,2 |
| 5 | 0,05 | 0,1 | 0 | 0,3 | 0,15 | 0,06 | 0,09 | 0,25 |
| 6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,25 | 0,1 | 0,1 | 0,15 | 0,1 |
| 7 | 0,25 | 0,2 | 0,15 | 0,1 | 0,05 | 0 | 0,1 | 0,15 |
| 8 | 0,02 | 0,04 | 0,08 | 0,16 | 0,32 | 0,16 | 0,12 | 0,10 |
| 9 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,05 | 0,05 |
| 0 | 0,4 | 0,05 | 0 | 0,25 | 0,1 | 0,15 | 0,05 | 0 |

Задача 4. Определить вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$ «идеального наблюдателя», который обнаруживает радиоимпульс с колоколообразной огибающей вида $u(t) = U \exp(-t^2/2\tau_n^2)$, имеющий амплитуду U и длительность τ_n по уровню U/\sqrt{e} , на фоне теплового шума приёмника, имеющего шумовую температуру $T^\circ\text{К}$.

Данные для решения задачи приведены в табл.4.

Таблица 4

| Номер варианта | U | τ_n | T | Номер варианта | U | τ_n | T |
|-------------------|------|----------|-----|-------------------|-----|----------|-----|
| | мкВ | мкс | °К | | мкВ | мкс | °К |
| 1 | 1 | 0,1 | 300 | 6 | 0,1 | 0,5 | 600 |
| 2 | 0,1 | 1 | 500 | 7 | 0,2 | 2 | 400 |
| 3 | 0,25 | 1 | 400 | 8 | 0,1 | 0,1 | 10 |
| 4 | 0,5 | 0,5 | 300 | 9 | 0,1 | 5 | 200 |
| 5 | 1 | 0,2 | 500 | 0 | 0,5 | 0,1 | 300 |

Указание. При решении задачи воспользоваться таблицами значений интеграла вероятности $\Phi(x)$ или $\text{erf}(x)$ из любого справочника по высшей математике (И. Н. Бронштейн и К. А. Семендяев, Г. Корн и Т. Корн и пр.), учебника по теории вероятностей (Б. В. Гнеденко, Е. С. Вентцель, В. Феллер и пр) или по статистической радиотехнике (Б. Р. Левин, В. С. Пугачёв, В. И. Тихонов и пр.).

Задача 5. Ожидаемый сигнал является колоколообразным импульсом $u(t) = U \exp(-t^2/2\tau_n^2)$, имеющим амплитуду U и длительность τ_n по уровню U/\sqrt{e} , и обнаруживается на фоне помехи в виде “белого шума” со спектральной плотностью мощности $N_0 = 10^{-18}$ (Вт/Гц).

Определить какое пороговое значение U_n нужно установить на выходе оптимального приёмника, чтобы получить вероятность правильного обнаружения $P_{по}$?

Данные для решения задачи приведены в табл.5.

Таблица 5

| Номер варианта | U | τ_n | $P_{по}$ | Номер варианта | U | τ_n | $P_{по}$ |
|-------------------|-----|----------|----------|-------------------|-----|----------|----------|
| | мкВ | мкс | — | | мкВ | мкс | — |
| 1 | 0,1 | 0,2 | 0,95 | 6 | 0,2 | 1 | 0,95 |
| 2 | 0,2 | 0,1 | 0,98 | 7 | 0,2 | 2 | 0,95 |
| 3 | 0,3 | 0,3 | 0,99 | 8 | 0,2 | 3 | 0,98 |
| 4 | 0,4 | 0,4 | 0,95 | 9 | 0,2 | 4 | 0,98 |
| 5 | 0,5 | 0,5 | 0,95 | 0 | 0,2 | 5 | 0,99 |

Указание. См. указание к задаче 4.

Задача 6. Определить требуемое значение амплитуды A_0 для обнаружения на фоне тепловых шумов приёмника с нормальной шумовой температурой прямоугольного радиолокационного импульса длительности τ_n с вероятностью пропуска сигнала β при вероятности ложной тревоги α .

Данные для решения задачи приведены в табл.6.

Указание. При решении задачи воспользоваться графиками, представленными на рис.4.10 из [1], либо на рис.3.6 из [2], либо на рис.2.8 из [6].

Задача 7. РЛС с частотой несущей f_0 производит обзор пространства гауссовским радиоимпульсом с линейной частотной модуляцией. Потенциальная разрешающая способность РЛС по дальности составляет ΔD .

Какова должна быть девиация частоты Δf_m частотной модуляции, чтобы РЛС имела потенциальную разрешающую способность по радиальной скорости ΔV ?

Данные для решения задачи приведены в табл.7.

Таблица 6

| Номер варианта | τ_n | α | β | Номер варианта | τ_n | α | β |
|-------------------|----------|-----------|---------|-------------------|----------|-----------|---------|
| | мкс | — | — | | мкс | — | — |
| 1 | 0,1 | 10^{-5} | 0,1 | 6 | 0,6 | 10^{-5} | 0,1 |
| 2 | 0,2 | 10^{-4} | 0,1 | 7 | 0,7 | 10^{-4} | 0,08 |
| 3 | 0,3 | 10^{-3} | 0,1 | 8 | 0,8 | 10^{-3} | 0,06 |
| 4 | 0,4 | 10^{-2} | 0,1 | 9 | 0,9 | 10^{-2} | 0,04 |
| 5 | 0,5 | 10^{-1} | 0,1 | 0 | 1,0 | 10^{-1} | 0,02 |

Таблица 7

| Номер варианта | f_0 | ΔD | ΔV | Номер варианта | f_0 | ΔD | ΔV |
|-------------------|-------|------------|------------|-------------------|-------|------------|------------|
| | ГГц | км | км/час | | ГГц | км | км/час |
| 1 | 1 | 10 | 100 | 6 | 10 | 30 | 30 |
| 2 | 10 | 10 | 100 | 7 | 100 | 30 | 30 |
| 3 | 100 | 10 | 10 | 8 | 100 | 10 | 100 |
| 4 | 10 | 20 | 200 | 9 | 30 | 5 | 20 |
| 5 | 10 | 30 | 100 | 0 | 50 | 3 | 30 |

Задача 8. Зондирующий радиоимпульс РЛС имеет гауссовскую форму с параметрами τ_n и f_0 . Для некоторой цели вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги суть $P_{по}$ и $P_{лт}$.

Определить потенциальные точности измерения дальности σ_D до этой цели и её радиальной скорости σ_V .

Данные для решения задачи приведены в табл.8.

Таблица 8

| Номер варианта | f_0 | $\tau_{\text{и}}$ | $P_{\text{по}}$ | $P_{\text{лт}}$ | Номер варианта | f_0 | $\tau_{\text{и}}$ | $P_{\text{по}}$ | $P_{\text{лт}}$ |
|-------------------|-------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | ГГц | мкс | – | – | | ГГц | мкс | – | – |
| 1 | 1 | 1 | 0,9 | 10^{-4} | 6 | 5 | 0,2 | 0,9 | 10^{-4} |
| 2 | 10 | 1 | 0,95 | 10^{-5} | 7 | 20 | 0,5 | 0,95 | 10^{-4} |
| 3 | 10 | 0,1 | 0,98 | 10^{-3} | 8 | 5 | 1 | 0,98 | 10^{-2} |
| 4 | 30 | 0,1 | 0,98 | 10^{-2} | 9 | 20 | 0,2 | 0,95 | 10^{-2} |
| 5 | 10 | 0,1 | 0,9 | 10^{-4} | 0 | 1 | 1 | 0,99 | 10^{-1} |

Указание. Для решения задачи воспользоваться графиком рис.4.10 в [1], либо рис.3.6 в [2], либо 4.3 в [5].

Задача 9. Два подвижных объекта независимо друг от друга передают свои координаты в центр мониторинга. Параметры единичных эллипсов рассеяния объектов σ_{x1} , σ_{y1} , ρ_{xy1} и σ_{x2} , σ_{y2} , ρ_{xy2} соответственно. Какова точность определения расстояния между объектами, осуществляемого в центре мониторинга?

Данные для решения задачи приведены в табл.9.

Задача 10. Характеристики обнаружения по одному зондирующему импульсу РЛС суть: вероятность пропуска цели β , вероятность ложной тревоги α .

Сколько импульсов n нужно накопить в устройстве обнаружения РЛС, чтобы при том же значении α получить заданную вероятность правильного обнаружения $P_{\text{по}}^{(n)}$.

Данные для решения задачи приведены в табл.10.

Указание. Для решения задачи воспользоваться графиком рис.4.10 в [1], либо рис.3.6 в [2], либо 4.3 в [5].

Таблица 9

| Номер варианта | σ_{x1} | σ_{y1} | ρ_{xy1} | σ_{x2} | σ_{y2} | ρ_{xy2} |
|-------------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| | М | М | — | М | М | — |
| 1 | 100 | 50 | 0 | 50 | 100 | 0 |
| 2 | 100 | 50 | – 0,5 | 50 | 100 | – 0,5 |
| 3 | 100 | 50 | 0,5 | 50 | 100 | 0,5 |
| 4 | 50 | 100 | 0 | 50 | 100 | 0 |
| 5 | 50 | 100 | – 0,5 | 50 | 100 | – 0,5 |
| 6 | 50 | 100 | 0,5 | 50 | 100 | 0,5 |
| 7 | 20 | 20 | 0,8 | 10 | 10 | 0,8 |
| 8 | 20 | 20 | – 0,8 | 10 | 10 | – 0,8 |
| 9 | 10 | 10 | 0,8 | 10 | 10 | 0,8 |
| 0 | 10 | 10 | – 0,8 | 10 | 10 | – 0,8 |

Таблица 10

| Номер варианта | β | α | $P_{\text{по}}^{(n)}$ | Номер варианта | β | α | $P_{\text{по}}^{(n)}$ |
|-------------------|---------|-----------|-----------------------|-------------------|---------|-----------|-----------------------|
| | — | — | — | | — | — | — |
| 1 | 0,5 | 10^{-5} | 0,95 | 6 | 0,3 | 10^{-5} | 0,99 |
| 2 | 0,5 | 10^{-4} | 0,95 | 7 | 0,4 | 10^{-5} | 0,99 |
| 3 | 0,5 | 10^{-3} | 0,95 | 8 | 0,5 | 10^{-5} | 0,95 |
| 4 | 0,5 | 10^{-2} | 0,95 | 9 | 0,6 | 10^{-5} | 0,95 |
| 5 | 0,5 | 10^{-1} | 0,95 | 0 | 0,7 | 10^{-5} | 0,9 |

6. ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Случайная величина β является результатом линейного преобразования $\beta = 4\alpha + 4$ данной случайной величины α , имеющей нормальное распределение со средним значением $\bar{\alpha}$ и с дисперсией D_α . Какова дисперсия D_β случайной величины β ?

1. $D_\beta = 2 D_\alpha$.
2. $D_\beta = 4 D_\alpha$.
3. $D_\beta = 8 D_\alpha$.
4. $D_\beta = 16 D_\alpha$.

2. Плотность вероятности регулярной случайной величины α имеет вид $p(x) = (8\pi)^{-1/2} \exp(-(x - \frac{1}{2})/8)$. Какова вероятность P_α того, что случайная величина α примет значение $x = 1/2$?

1. $P_\alpha = 1/2$.
2. $P_\alpha = (8\pi)^{-1/2}$.
3. $P_\alpha = 1/8$.
4. $P_\alpha = 0$.

3. Что такое “дисперсия выборочной дисперсии”?

1. Квадрат полуинтервала размаха значений дисперсий элементов выборки.

2. Среднее (по генеральной совокупности данной случайной величины) значение квадрата отклонения выборочной дисперсии от её среднего значения.

3. Квадрат вариаций выборочной дисперсии от выборки к выборке?

4. Каково достаточное условие эргодичности случайного процесса?

1. Случайный процесс $\xi(t)$ должен быть стационарным и непрерывным.

2. Случайный процесс $\xi(t)$ должен иметь непрерывную спектральную плотность мощности $W_\xi(\omega)$.

3. Случайный процесс $\xi(t)$ должен иметь непрерывную автокорреляционную функцию $R_\xi(\tau)$.

5. Какие оптимальные линейные стационарные фильтры являются физически реализуемыми?

1. У которых интеграл по всей оси частот ($-\infty < \omega < \infty$) квадрата модуля коэффициента передачи $K(j\omega)$ имеет конечное значение.

2. У которых импульсная характеристика $h(\tau)$ – ограниченная функция аргумента τ .

3. У которых импульсная характеристика $h(\tau)$ равна нулю при $\tau > 0$.

4. У которых коэффициент передачи $K(j\omega)$ равен нулю при $\omega \leq 0$.

6. При каком из перечисленных ниже условий точность определения дальности до радиолокационной цели с помощью простого зондирующего радиоимпульса РЛС увеличивается?

1. При увеличении длительности импульса РЛС.
2. При увеличении произведения амплитуды зондирующего импульса на его длительность.
3. При увеличении отношения амплитуды импульса к его длительности.

7. При каком из перечисленных ниже условий точность определения радиальной скорости радиолокационной цели с помощью простого зондирующего радиоимпульса РЛС увеличивается?

1. При увеличении длительности импульса РЛС.
2. При увеличении произведения амплитуды зондирующего радиоимпульса и его длительности.
3. При увеличении отношения амплитуды импульса к его длительности.

8. При оптимальной линейной обработке результатов независимых неравноточных измерений дискретных сигналов отношения сигнал/помеха этих результатов

1. перемножаются.
2. складываются линейно.
3. складываются среднеквадратически.
4. преобразуются среднегеометрически.

9. Разрешающая способность по радиальной скорости радиолокационной станции с простым зондирующим радиоимпульсом гауссовской формы увеличивается,

1. если увеличить длину волны несущей зондирующего радиоимпульса.
2. если уменьшить длительность зондирующего радиоимпульса.
3. если увеличить произведение частоты несущей зондирующего радиоимпульса и его длительности.
4. если увеличить отношение частоты несущей зондирующего радиоимпульса к его длительности.

10. Что такое “элемент разрешения РЛС по объёму”?

1. Объём единичного эллипсоида рассеяния погрешностей определения декартовых координат цели.
2. Объём пространства, занимаемый зондирующим электромагнитным импульсом на данном расстоянии от РЛС по уровню 0,5 от максимума диаграммы направленности антенны и максимума напряжённости электрической составляющей импульса.
3. Объёмы двух одинаковых целей, воспринимаемых данной РЛС как отдельные сложные точечные цели.

11. В чем заключается принцип неопределённости в радиолокации?

1. Количество принятой приёмником РЛС информации есть разность между априорной и апостериорной неопределённостями (энтропиями) сигналов.

2. Если доплеровская частота принимаемых радиосигналов кратна частоте повторения когерентных радиоимпульсов РЛС, то соответствующая скорость движения цели не определена.

3. Произведение длительности сигнала на ширину его спектра у простых модулирующих сигналов слабо зависит от их формы и близко к единице.

12. Что является основной числовой характеристикой (мерой) точности местоопределения объекта в РНС?

1. Величина большой полуоси единичного эллипса рассеяния радионавигационных координат объекта.

2. Эквивалентный радиус рассеяния радионавигационных координат объекта.

3. Радиальная среднеквадратическая погрешность определения координат объекта.

13. Что такое “характеристика обнаружения”?

1. Зависимость вероятности правильного обнаружения от дальности до цели при заданной мощности излучения РЛС.

2. Зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения “сигнал/шум” при заданной вероятности ложной тревоги.

3. Зависимость вероятности правильного обнаружения от эффективной площади рассеяния цели при заданной дальности до цели.

14. Что такое “потенциальная точность измерения параметра сигнала”?

1. Точность оценки параметра методом максимального правдоподобия.

2. Максимальная точность измерения параметра в отсутствие радиопомех.

3. Максимальная точность измерения параметра заданного сигнала на фоне помех с заданными вероятностными характеристиками.

15. Для оптимального приёма пачки импульсных сигналов применяются

1. режекторные фильтры.

2. фильтры нижних частот.

3. гребенчатые фильтры.

16. Что такое “избыточность источника дискретных сообщений”?

1. Среднее количество повторных выдач источником в канал связи различных сообщений.

2. Относительная разность между энтропией данного источника и энтропией источника независимых равновероятных сообщений.

3. Относительное количество элементарных сообщений источника, не используемых для передачи полезной информации.

17. Какие помехи являются универсальным средством радиоподавления приёмной аппаратуры противника?

1. Хаотические импульсные помехи.
2. Имитационные радиопомехи.
3. Узкополосные радиопомехи.
4. Непрерывные шумовые радиопомехи в полосе частот подавляемой радиоаппаратуры.

18. Что такое «база сигнала»?

1. Произведение длительности сигнала на его амплитуду.
2. Произведение длительности сигнала на квадрат его амплитуды.
3. Произведение длительности сигнала на ширину его спектральной плотности.
4. Количество базисных функций, на которые разлагается данный сигнал.

19. Во сколько раз меньше дисперсия среднего по выборке из n независимых равнооточных измерений, чем дисперсия однократного измерения?

1. В \sqrt{n} раз.
2. В n раз.
3. В n^2 раз.

20. Почему при оценке дисперсии случайной величины по её выборке из n независимых равнооточных измерений ($s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)$) деление суммы отклонений от среднего производится на $(n - 1)$, а не на n ?

1. Чтобы устранить смещение оценки дисперсии s^2 .
2. Чтобы устранить неопределенность оценки s^2 при $n = 1$.
3. Чтобы сделать оценку s^2 состоятельной.

21. При вычислении дисперсии эффективной оценки среднего по выборке из независимых неравнооточных измерений

1. суммируются дисперсии отдельных измерений.
2. суммируются среднеквадратические значения отклонений от среднего значения для отдельных измерений.
3. суммируются обратные значения дисперсий отдельных измерений.
4. суммируются обратные значения среднеквадратических отклонений от среднего значения для отдельных измерений.

22. Какой критерий используется в теории проверки простых гипотез?

1. Котельникова-Шеннона.
2. Неймана-Пирсона.
3. Винера-Хинчина.
4. Карунена-Лоэва.
5. Крамера-Рао.

23. Каким математическим преобразованием связаны автокорреляционная функция стационарного случайного процесса и его спектральная плотность мощности?

1. Косинус-преобразованием Фурье.
2. Синус-преобразованием Фурье.
3. Преобразованием Гильберта.
4. Преобразованием Лапласа.

24. Один из дискретных источников равновероятных сообщений содержит M знаков, другой – в два раза больше (то есть $2M$). Насколько больше информации несут знаки второго источника сообщений?

1. В 2 раза больше.
2. В 4 раза больше.
3. На 1 бит.
4. На 2 бита.

25. Согласно основной теореме К. Шеннона: “Если пропускная способность канала передачи информации с помехами больше производительности источника сообщений, то можно соответствующим канальным кодированием добиться сколь угодно малой ненадёжности передачи информации.”

За счёт чего?

1. За счёт увеличения времени передачи информации по каналу связи.
2. За счёт увеличения количества каналов связи.
3. За счёт увеличения запаздывания начала приёма сообщений получателем информации относительно начала их передачи источником сообщений.

26. От чего зависит пропускная способность канала передачи информации?

1. От энтропии источника сообщений, который подключается к каналу.
2. От количества различных передаваемых знаков (алфавита источника).
3. От статистических свойств источника передаваемых сообщений.

27. Какое количество информации содержится в двух статистически связанных сообщениях?

1. Сумма количеств информации, содержащихся в каждом из них по отдельности.

2. Меньше суммы количеств информации, содержащихся в каждом из них по отдельности.

3. Больше суммы количеств информации, содержащихся в каждом из них по отдельности.

28. Коэффициент корреляции между оценками среднего значения и дисперсии нормальной случайной величины по её выборке из n измерений

1. больше нуля.

2. меньше нуля.

3. равен нулю.

29. При каком распределении априорных вероятностей независимых сообщений энтропия дискретного источника элементарных сообщений максимальна?

1. При равномерном распределении.

2. При распределении Пуассона.

3. При биномиальном распределении.

30. Если при заданном пороге обнаружения амплитуда сигналов, поступающих на вход приемника, будет больше расчетной, то уменьшится

1. вероятность ложной тревоги.

2. вероятность пропуска сигнала.

3. вероятность правильного обнаружения.

4. вероятность правильного необнаружения.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Предисловие | 3 |
| 1. Содержание дисциплины | 6 |
| 1.1. Содержание дисциплины по ГОС-2000 | 6 |
| 1.2. Рабочая программа | 6 |
| 1.3. Тематический план лекций | 9 |
| 1.4. Темы практических занятий | 9 |
| 2. Библиографический список | 9 |
| 3. Методические указания к изучению дисциплины | 10 |
| 4. Вопросы для самопроверки | 17 |
| 5. Задание на контрольную работу и методические указания к её выполнению | 20 |
| 6. Тестовые задания | 27 |