

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
радиотехники и компьютерных  
технологий**

**А.В. Дворкович**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Нелинейные преобразования и прием радиосигналов
<b>по направлению:</b>	Информатика и вычислительная техника
<b>профиль подготовки:</b>	Компьютерные технологии и вычислительная техника Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий кафедра радиотехники и систем управления
<b>курс:</b>	3
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 6 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 90 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 60 час.

Самостоятельная работа: 150 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 270, всего зач. ед.: 6

Количество контрольных работ, заданий: 2

Программу составил: А.А. Григорьев, канд. техн. наук, доцент, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры радиотехники и систем управления 24.04.2020

## Аннотация

Курс охватывает принципы построения радиолиний - переносы спектров сигналов, принципы модуляции/демодуляции, фильтрация шумов, согласованная фильтрация, оценки вероятностей ошибок

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

познакомить студентов, специализирующихся в области радиосвязи и радиолокации с принципами обработки сигналов в радиочастотной области.

#### Задачи дисциплины

- 1) ознакомление со свойствами и принципами реализации переноса спектров сигналов;
- 2) ознакомление студентов с принципами аналоговой и цифровой модуляции;
- 3) изучение шумовых характеристик каналов связи и трактов приема;
- 4) овладение методами оценивания вероятностей ошибок демодуляции;
- 5) знакомство со структурой и принципами обработки сигналов в локации.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.2 Находит, критически анализирует и выбирает информацию, необходимую для решения поставленной задачи
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)	ОПК-3.3 Владеет методами визуального и графического представления результатов научной (научно-технической, инновационной технологической) деятельности в виде отчетов, научных публикаций
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Знает принципы построения научной работы, методы сбора и анализа полученного материала, способы аргументации
	ПК-2.2 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого научного коллектива
	ПК-2.3 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны  
знать:

теоретические основы методов обработки радиочастотных сигналов.

уметь:

проводить исследования характеристик связанных и локационных систем в лабораторных условиях.

владеть:

основными методами теоретического анализа свойств связанных и локационных радиосистем.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Автогенераторы	4		12	21
2	Квадратурные преобразования	4		12	21
3	Корреляционная теория шума	6		12	23
4	Оптимальная демодуляция	6			21
5	Петли ФАПЧ			12	21
6	Цифровая линейная модуляция и локация	6		8	22
7	Элементы теории сигналов	4		4	21
Итого часов		30		60	150
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		270 час., 6 зач.ед.			

##### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 6 (Весенний)

###### 1. Автогенераторы

Годограф усиления петли обратной связи, критерий неустойчивости Найквиста. Условия баланса фаз, амплитуд. Схемы автогенераторов. Условия возбуждения трехточки. Схемы трехточечных автогенераторов.

Стабилизация амплитуды колебаний. Метод Ван-дер-Поля решения уравнения автоколебаний с нелинейным затуханием. Предельный цикл.

Стабильность частоты, фазовый шум. Кварцевая стабилизация частоты.

###### 2. Квадратурные преобразования

Фильтр Гильберта, аналитический сигнал, понятие о мгновенных амплитуде, фазе и частоте. Свойства преобразования Гильберта. Гильбертовы преобразования гармонических и квазигармонических сигналов.

Представление полосового сигнала комплексной огибающей. Модуляция/демодуляция как преобразования между пространствами радиосигналов и комплексных огибающих. Квадратурный демодулятор. Ко-герентная и некогерентная обратотка. Переход к цифровой обработке радиосигналов.

Аналоговая модуляция. Амплитудные методы. Диодный детектор, когерентный демодулятор. Фазовые методы. Частотная модуляция. Петля ФАПЧ как демодулятор ЧМ сигнала. Спектры ФМ и ЧМ сигналов. Помехоустойчивость ЧМ как системы широкополосной модуляции.

Техническая реализация перемножения. Перемножитель Гильберта.

Преобразование частоты. Супергетеродинный прием.

### 3. Корреляционная теория шума

Матрицы корреляций случайных векторов. Гауссовские случайные веторы. Условия нормальности комплексного случайного вектора. Статистические корреляционные функции случайных процессов. Роль Гауссовости в корреляционной теории. Временные корреляционные функции, эргодический переход. Спектральная плотность шума. Белый шум. Линейная фильтрация шума, теорема Винера-Хинчина. Условия некоррелированности шумов на выходах пар фильтров.

Квадратурные преобразования шумов. Форма полосового шума.

Физические источники шума. Шумы в усилительных устройствах, шумовая температура, отношение сигнал/шум. Оптимальность согласованной фильтрации по отношению сигнал/шум.

### 4. Оптимальная демодуляция

Критерии максимума апостерорной вероятности и максимального правдоподобия. Оценивание вероятностей ошибок демодуляции сигналов линейной модуляции. Выражение для вероятности ошибки при оптимальной демодуляции QPSK.

Пропускная способность канала с гауссовским шумом. Шенноновский предел. Пути совершенствования методов модуляции для его достижения. Помехоустойчивое кодирование.

### 5. Петли ФАПЧ

Уравнение петли, его линеаризованная форма. Переходные процессы в петле, установившиеся значения ошибок по фазе и частоте. Выбор параметров петлевого фильтра.

Техническая реализация управляемых генераторов и дискриминаторов фазы. Дискретизованные петли ФАПЧ.

Работа петли в режиме ЧАП. Эффект проскальзывания циклов. Полосы статического и динамического удержания. Полоса захвата.

Применение петель ФАПЧ для выделения опорной несущей. Петли Костаса. Петли ФАПЧ в синтезаторах частоты.

### 6. Цифровая линейная модуляция и локация

Линейная модуляция. Сигнальное созвездие, обменные соотношения энергия – расстояние. Созвездия PM и QAM.

Битовая и бодовая скорости. Спектральная эффективность, спектры импульсов Найквиста, прямоугольного импульса, гармонической полуволны и приподнятого косинуса. Гауссовский импульс. Критерий Найквиста отсутствия межсимвольной интерференции – предел спектральной эффективности линейной модуляции.

Квадратурная фазовая модуляция QPSK, ортогональная частотная модуляция OFM, модуляция минимальным сдвигом MSK.

Решетчатая модуляция. Алгоритм Витерби.

Понятие о спектре мощности, спектры мощности сигналов линейной модуляции.

Размерность (база) канала с конечными ресурсами по времени и полосе. Ортогональное разделение канала - частотное, временное, кодовое. Понятие о широкополосных системах связи.

Радиолокационные сигналы. Связь между корреляциями сигналов и их комплексных огибающих. Тело неопределенности. Линейно-модулированные локационные сигналы. Коды Баркера, псевдослучайные последовательности. Сигналы ЛЧМ.

## 7. Элементы теории сигналов

Евклидово пространство сигналов конечной энергии. Скалярное произведение, корреляционные функции. Свертка как линейная фильтрация. Неравенство Коши-Шварца, согласованная фильтрация.

Спектральная теория. Амплитудный спектр сигнала. Свойства симметрии преобразования Фурье. Теорема о свертке, описание линейной фильтрации в частотной области. Корреляции в частотной области, энергетический спектр. Тождество Парсеваля, Фурье преобразование как линейный оператор, сохраняющий скалярное произведение.

Обобщенный спектральный анализ. Спектры дельта функции, функции знак и единичной ступени. Теорема о двух гребенках. Дискретизация сигналов, критерий Найквиста обратимости дискретизации, ряд Котельникова. Спектр дискретизованного сигнала, z-плоскость.

## 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Необходимое лабораторное оснащение:

- 1) Информационно-измерительный комплекс на рабочем месте каждого студента, включающий компьютер, двухлучевой цифровой осциллограф, цифровой генератор сигналов и частотомер;
- 2) Сопрягаемые с компьютерными генератором и осциллографом макетные платы для собирания схем;
- 3) Необходимые радиоэлектронные компоненты: резисторы, конденсаторы, транзисторы, интегральные схемы, кварцевые резонаторы, микропроцессоры, кабели, соединительные провода;
- 4) Лабораторный инструмент.

Необходимое оборудование для лекций:

- 1) Учебная аудитория;
- 2) Компьютер, беспроводной проектор, экран;
- 3) Локальная сеть, обеспечивающая доступ к учебно-методическому обеспечению.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Лекции по теории сигналов [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. А. Григорьев ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2014 .— 328 с.
2. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] : учебник для вузов / С. И. Баскаков .— 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 2000, 2005 .— 466 с.

Дополнительная литература

1. Нелинейные преобразования и прием радиосигналов [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. П. Озерский ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2010 .— 264 с.
2. Полупроводниковая схемотехника [Текст] : в 2 т. Т. 1 / У. Титце, К. Шенк ; пер. с нем. Г. С. Карабашева .— М. : Додэка-XXI, 2008 .— 832 с.
3. Основы радиоэлектроники [Текст] : [учебное пособие для вузов] / Е. И. Манаев .— 4-е изд. / [учеб. изд.] .— М. : Книжный дом, 2013 .— 512 с.
4. Случайные сигналы и шумы. Моделирование в среде MATLAB [Текст] : учеб. пособие для вузов / Е. В. Воронов ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2012 .— 124 с.

## 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Не используются

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Программное обеспечение:

1. Micro-Cap;
2. Набор специальных учебных программ для Micro-Cap;
3. Учебные пособия, методические указания, описания лабораторных работ.

**9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Изучаемая дисциплина относится к техническим. Особенностью дисциплин этого рода является сложность их восприятия с нуля по литературным источникам в силу обилия плохо формализуемых представлений и правдоподобных рассуждений. Это обуславливает крайнюю актуальность слушания лекционного курса, в котором основные положения дисциплины преподносятся на принятом в инженерной практике техническом языке и расставляются акценты на наиболее существенные моменты. Слушание лекционного курса существенно облегчает чтение рекомендованной литературы.

Помимо формальных знаний, освоение любой технической дисциплины связано с приобретением минимального объема практических навыков. Эти навыки не могут быть приобретены чтением или слушанием.

В данном курсе они приобретаются при выполнении лабораторного практикума. Для успешного выполнения лабораторных работ следует: 1) Перед началом работы потратить некоторое время на ознакомление с ее теоретическим содержанием, с тем, чтобы при выполнении экспериментальных заданий иметь общее представление о том, что происходит и какие результаты являются ожидаемыми. 2) В процессе работы аккуратно фиксировать полученные экспериментальные данные с тем, чтобы по прошествии двух-трех недель они могли стать предметом обсуждения при сдаче работы. 3) При подготовке к сдаче привести полученные данные к виду, пригодному для обсуждения – построить необходимые графики, заполнить таблицы и т. п.

К моменту сдачи лабораторной работы, относящиеся к ее содержанию теоретические положения должны быть изучены и осмыслены.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Информатика и вычислительная техника
<b>профиль подготовки:</b>	Компьютерные технологии и вычислительная техника Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий кафедра радиотехники и систем управления
<b>курс:</b>	3
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 6 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** А.А. Григорьев, канд. техн. наук, доцент, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.2 Находит, критически анализирует и выбирает информацию, необходимую для решения поставленной задачи
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)	ОПК-3.3 Владеет методами визуального и графического представления результатов научной (научно-технической, инновационной технологической) деятельности в виде отчетов, научных публикаций
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Знает принципы построения научной работы, методы сбора и анализа полученного материала, способы аргументации
	ПК-2.2 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого научного коллектива
	ПК-2.3 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Нелинейные преобразования и прием радиосигналов» обучающийся должен:

### знать:

теоретические основы методов обработки радиочастотных сигналов.

### уметь:

проводить исследования характеристик связных и локационных систем в лабораторных условиях.

### владеть:

основными методами теоретического анализа свойств связных и локационных радиосистем.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Текущий контроль проводится устным опросом в начале лабораторного занятия по материалу прошедшей лекции и в конце занятия по полученным экспериментальным данным



#### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

##### **Критерии оценивания**

Оценка «отлично (10)» выставляется обучающемуся, если он правильно отвечает на все 10 вопросов, заданных ему на коллоквиуме.

Оценка «отлично (9)» выставляется обучающемуся, если он правильно отвечает на 9 из 10 вопросов, заданных ему на коллоквиуме.

Оценка «отлично (8)» выставляется обучающемуся, если он правильно отвечает на 8 из 10 вопросов, заданных ему на коллоквиуме.

Оценка «хорошо (7)» выставляется обучающемуся, если он правильно отвечает на 7 из 10 вопросов, заданных ему на коллоквиуме.

Оценка «хорошо (6)» выставляется обучающемуся, если он правильно отвечает на 6 из 10 вопросов, заданных ему на коллоквиуме.

Оценка «хорошо (5)» выставляется обучающемуся, если он правильно отвечает на 5 из 10 вопросов, заданных ему на коллоквиуме.

Оценка «удовлетворительно (4)» выставляется обучающемуся, если он правильно отвечает на 4 из 10 вопросов, заданных ему на коллоквиуме.

Оценка «удовлетворительно (3)» выставляется обучающемуся, если он правильно отвечает на 3 из 10 вопросов, заданных ему на коллоквиуме.

Оценка «неудовлетворительно (2)» выставляется обучающемуся, если он правильно отвечает на 2 из 10 вопросов, заданных ему на коллоквиуме.

Оценка «неудовлетворительно (1)» выставляется обучающемуся, если он правильно отвечает на 1 из 10 заданных ему вопросов.

#### **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

### **3.Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков**

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется в форме экзамена. Экзамен проводится в устной форме.

#### **Экзаменационные вопросы по курсу:**

##### **Математическая теория сигналов**

1. В чем заключаются описание линейной фильтрации во временной и частотной областях? Что такое импульсная реакция, какова ее связь с комплексным коэффициентом передачи? Что такое амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики?
2. Чем отличаются понятия когерентной и некогерентной ортогональности сигналов? Почему некогерентная ортогональность сохраняется при сдвиге фазы, когерентная – нет? Привести примеры пар ортогональных и когерентно ортогональных гармонических сигналов.
3. Как изменяется спектр сигнала при его масштабировании (растяжении или сжатии) во времени? Как выполнять масштабирование сигнала с сохранением его энергии?
4. Как изменяется спектр сигнала при его сдвиге во времени? Как осуществить сдвиг спектра сигнала по частоте?
5. Каковы спектры авто и взаимной корреляции сигналов? Что такое энергетический спектр и взаимный энергетический спектр? В чем заключается тождество Парсеваля?
6. Как изменяются свертки, и корреляции пары сигналов при их сдвигах по времени? Как изменяются корреляции и свертки при одинаковом сдвиге по частоте спектров обоих сигналов?
7. Как выглядит преобразование Гильберта во временной и частотной областях? Как построить аналитический эквивалент вещественного сигнала с помощью преобразования Гильберта?
8. Что такое аналитический сигнал? Каковы особенности его структуры? Как построить аналитический эквивалент вещественного сигнала?
9. Как вводятся понятия амплитуды, фазы и мгновенной частоты вещественного сигнала и вещественного полосового сигнала?
10. Какова связь сверток-корреляций вещественных сигналов и их аналитических эквивалентов?
11. Что такое спектр мощности? Каков закон преобразования спектра мощности при линейной фильтрации сигнала? Какова структура спектра мощности периодического сигнала?

##### **Квадратурные преобразования**

1. Что такое комплексная огибающая вещественного полосового радиосигнала? В чем состоит процедура построения огибающей? Как выглядит блок-схема квадратурного смесителя?
2. Что такое комплексная огибающая вещественного полосового радиосигнала? Какова блок-схема квадратурного модулятора – преобразователя комплексной огибающей в полосовой сигнал?
3. Какова схема выделения комплексной огибающей полосового сигнала с фильтром Гильберта?

4. Как найти корреляцию комплексных огибающих по известной корреляции вещественных полосовых сигналов?
5. Как найти корреляцию полосовых сигналов, зная корреляцию их комплексных огибающих?
6. Что такое когерентный демодулятор (синхронный детектор)? Как реализовать его на перемножителе Гильберта?
7. Какова структурная схема комплексного радиоканала? В каком отношении некогерентный канал отличается от когерентного?
8. Что такое преобразование частоты радиосигнала? Как выглядит блок-схема супергетеродинного приемника? Как обеспечивается в нем подавление зеркального канала?
9. В чем заключается механизм образования зеркального канала в супергетеродинном приемнике, каковы принципы его подавления?
10. Какие приемы реализации операции перемножения сигналов существуют? Как осуществить перемножение на нелинейном элементе?
11. Какие приемы реализации операции перемножения сигналов существуют? Как осуществить перемножение на усилителе с изменяемым коэффициентом усиления? Привести пример схемы.
12. Какие приемы реализации операции перемножения сигналов существуют? Как работает перемножитель Гильберта?

### **Некогерентная локация**

1. Как работает импульсный локатор? Что такое тело неопределенности? Как трансформируется его форма при изменении длительности зондирующего сигнала? В чем состоит соотношение неопределенности в локации?
2. Что такое линейная частотная модуляция? Как трансформируется тело неопределенности при чирп-преобразовании? Чем определяется разрешающая способность ЛЧМ-сигнала по дальности?
3. Чем определяется разрешение по дальности локатора с ЛЧМ-сигналом?
4. В чем заключается чирп-преобразование зондирующего импульса? Каково его влияние на форму тела неопределенности зондирующего сигнала?
5. Как устроены шумоподобные сигналы для импульсной локации? Какое разрешение по дальности они обеспечивают? Что такое код Бракера?
6. Какова связь корреляции сигнала линейной модуляции с дискретной корреляцией символического блока? Что такое коды Бракера, и какова их роль в локации?

### **Аналоговая модуляция**

1. Что такое балансная модуляция? Как построить балансный модулятор на дифференциальной паре с управляемым генератором стабильного тока? Каков спектр балансно-модулированного сигнала?
2. Что такое балансная модуляция? Как построить балансный модулятор на перемножителе Гильберта? Каков спектр балансно-модулированного сигнала?
3. Что такое амплитудная модуляция? Как построить амплитудный модулятор на дифференциальной паре с управляемым генератором стабильного тока? Каков спектр амплитудно-модулированного сигнала?
4. Что такое модуляция с одной боковой полосой (SSB)? Как осуществляется демодуляция SSB-сигнала?
5. Как реализовать демодуляцию балансно-модулированного сигнала синхронным детектором?

6. Как реализовать демодуляцию амплитудно-модулированного сигнала на диодном детекторе? Какова структура схемы некогерентной демодуляции амплитудно-модулированного сигнала на квадратурном смесителе?
7. Что такое частотная модуляция? Чем объясняется ее высокая помехоустойчивость? Как реализовать демодулятор частотно-модулированного сигнала на петле ФАПЧ?

## **Цифровая модуляция**

1. Что такое линейная цифровая модуляция? В чем заключается условие отсутствия межсимвольной интерференции? Почему фильтрация сигнала может приводить к его нарушению?
2. В чем состоит критерий Найквиста отсутствия межсимвольной интерференции при линейной модуляции? Что такое импульс «корень из приподнятого косинуса», каковы его временная форма и спектр?
3. Что такое спектральная эффективность сигнала линейной модуляции? Каковы принципы ее оптимизации?
4. Что такое спектральная эффективность линейной цифровой модуляции? Каково ее предельное значение? Каковы спектральные эффективности систем линейной модуляции с импульсами: прямоугольник, гармоническая полуволна, приподнятый косинус?
5. Каковы требования к выбору созвездий схем линейной модуляции? Как выглядят созвездия PSK и QAM.
6. Каковы требования к выбору созвездий схем линейной модуляции? Какие M-многоточечные созвездия распространены, сравнить их по помехоустойчивости?
7. Какова природа обратной работы при демодуляции сигнала двоичной фазовой модуляции с прямоугольным импульсом? Что такое относительная фазовая модуляция (ОФМ)? Каков принцип некогерентной демодуляции ОФМ сигнала?
8. Что такое ортогональная модуляция? Какова ее спектральная эффективность? Как построить максимальную систему ортогональных сигналов при заданных ограничениях на время и полосу? Какова размерность этой системы?
9. Что такое двоичная частотная модуляция? Каковы условия когерентной и некогерентной ортогональности пары гармонических сигналов? Какова спектральная эффективность ортогональной двоичной частотной модуляции?
10. Как осуществить некогерентную демодуляцию сигнала с двоичной частотной модуляцией?
11. Что такое модуляция с минимальным частотным сдвигом (МЧМ)? Какова ее спектральная эффективность? Как выглядит временная форма вещественного МЧМ-радиосигнала?
12. Что такое решетчатая модуляция? Привести блок-схему решетчатого модулятора со сверточным кодом?
13. В чем суть применения алгоритма Витерби для демодуляции решетчатомодулированных сигналов?

## **Корреляционная теория шумов**

1. Что такое гауссовская случайная величина, гауссовский случайный вектор? Что такое комплексная случайная величина? В чем состоят условия ее нормальности? Как выглядит плотность вероятностей нормальной комплексной гауссовской случайной величины?
2. Что такое корреляция и спектральная плотность шума? В чем заключается свойство эргодичности шума? Как найти дисперсию шума, зная его корреляцию или спектральную плотность?

3. В чем заключается суть теоремы Винера-Хинчина? Что такое белый шум? Что такое шумовая полоса фильтра? Как найти дисперсию шума на выходе фильтра?
4. Что такое белый шум? Что такое шумовая полоса фильтра? Как найти дисперсию шума на выходе фильтра с известной шумовой полосой?
5. В чем состоит теорема Винера-Хинчина для пары фильтров? Каковы условия взаимной некоррелированности и ортогональности шумов на их выходах?
6. Что такое шум Джонсона, какова его спектральная плотность? Как найти спектральную плотность шума, порождаемого последовательным и параллельным соединением резисторов?
7. Что такое дробовой шум? Какова его спектральная плотность? Как шумовое напряжение на диоде зависит от начального тока через него?
8. Как измерить отношение сигнал/шум на выходе усилителя?
9. Что такое отношение сигнал/шум. Что такое коэффициент шума усилителя и как он связан с ухудшением отношения сигнал/шум при усилении?
10. Что такое согласованная фильтрация? Как устроен согласованный фильтр? Как реализовать его линейным фильтром? Почему согласованная фильтрация оптимальна по отношению сигнал/шум?
11. Как вводится отношение сигнал/шум на выходе коррелятора (согласованного фильтра)? Почему согласованная фильтрация оптимальна по отношению сигнал/шум?
12. Что такое коэффициент шума и шумовая температура? Предложить план эксперимента по измерению коэффициента шума усилителя?
13. Что такое коэффициент шума и шумовая температура? Каков коэффициент шума делителя
14. Напряжения на шумящих сопротивлениях?
15. Почему коэффициент шума усилителя на биполярном транзисторе зависит от сопротивления источника? Что такое шумовое сопротивление?
16. Почему коэффициент шума усилителя на биполярном транзисторе зависит от сопротивления источника? Как минимизировать коэффициент шума выбором начального режима транзистора?

### **Оптимальная демодуляция**

1. Какова плотность вероятностей шума на выходе согласованного фильтра при наличии на его входе белого гауссовского шума? Что такое отношение сигнал/шум и почему согласованная фильтрация максимизирует его?
2. В чем заключается демодуляция по максимуму апостериорной вероятности и максимуму правдоподобия? Почему демодуляция по максимуму правдоподобия в гауссовском шуме эквивалентна демодуляции по минимуму расстояния? Что такое разбиение Вороного?
3. Что такое Шенноновский предел? Какое отношение сигнал/шум на бит минимально достаточно для надежной передачи со сколь угодно малой скоростью?
4. Как оценить меру прямоугольной области по гауссовской плотности вероятностей через Q-функцию?
5. Какова зависимость вероятности ошибки демодуляции BPSK от отношения сигнал/шум?
6. Каковы формы распределений Релея и Релея-Райса? Найти зависимости от отношения сигнал/шум вероятностей ошибок когерентной и некогерентной демодуляции созвездия 2ASK двоичной амплитудной модуляции?
7. Что такое нумерация Грея? Как зависит вероятность ошибки на бит демодуляции QPSK от нумерации?
8. Каковы зависимости от отношения сигнал/шум вероятностей ошибок демодуляции созвездий MPSK и MQAM M-ичной фазовой и квадратурной модуляции? Какое

увеличение отношения сигнал/шум требуется для сохранения вероятности ошибки при удвоении числа точек MPSK и MQAM.

9. Как оценить вероятности ошибок при когерентной и некогерентной демодуляции сигналов двоичной ортогональной модуляции?
10. Как осуществляется демодуляция сигналов двоичной частотной модуляции с минимальным сдвигом частоты (MSK) по алгоритму Витерби?

### **Петли ФАПЧ**

1. Какова структурная схема петли ФАПЧ? Как вывести уравнение динамики ФАПЧ? Чем определяется установившееся значение фазовой ошибки при наличии ошибки по частоте?
2. Чем определяется установившееся значение фазовой ошибки в петле ФАПЧ при наличии ошибки по частоте на входе? Какими средствами его можно минимизировать?
3. В чем состоит смысл повышения коэффициента усиления петли? Как оно влияет на установившееся значение фазовой ошибки при наличии ошибки по частоте и на переходные процессы в петле?
4. В чем состоит смысл применения узкополосного фильтра в петле ФАПЧ? Почему нельзя ограничиться обычной интегрирующей цепью? Что дает введение демпфирующего резистора?
5. Как реализовать фазовый детектор для петли ФАПЧ на перемножителе? Какова структура уравнения петли ФАПЧ с нелинейным фазовым дискриминатором?
6. Какова структура линеаризованного уравнения ФАПЧ? Каков вид передаточных функций до фазовой ошибки и сигнала на входе VCO? Чем определяется установившееся значение фазовой ошибки на скачок частоты?
7. В чем смысл введения демпфирующего резистора в фильтр петли ФАПЧ? Как выбрать его значение?
8. Что такое полоса захвата ФАПЧ? Как влияет на ее ширину сужение полосы петлевого фильтра?
9. Что такое полоса удержания ФАПЧ. Какими средствами можно достичь ее расширения?

### **Примеры экзаменационных билетов**

#### **ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1**

Дисциплина *Нелинейные преобразования и прием радиосигналов*  
Кафедра радиотехники и систем управления

1. Какова структурная схема петли ФАПЧ? Как вывести уравнение динамики ФАПЧ? Чем определяется установившееся значение фазовой ошибки при наличии ошибки по частоте?
2. Как устроены шумоподобные сигналы для импульсной локации? Какое разрешение по дальности они обеспечивают? Что такое код Бракера?

#### **ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 2**

Дисциплина *Нелинейные преобразования и прием радиосигналов*  
Кафедра радиотехники и систем управления

1. Какова связь сверток-корреляций вещественных сигналов и их аналитических эквивалентов?

2. Каковы зависимости от отношения сигнал/шум вероятностей ошибок демодуляции созвездий MPSK и MQAM M-ичной фазовой и квадратурной модуляции? Какое увеличение отношения сигнал/шум требуется для сохранения вероятности ошибки при удвоении числа точек MPSK и MQAM.

#### 4. Критерии оценивания

Оценка	Баллы	Критерии
отлично	10	всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений;
	9	то же, но с отдельными недочетами
	8	то же, но с более существенными недочетами
хорошо	7	твёрдое знание материала, грамотное и по существу его изложение, умение применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;
	6	твёрдое знание материала, но с некоторыми пробелами
	5	твёрдое знание материала, но с существенными
удовлетворительно	4	фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала
	3	существенные пробелы в знаниях
неудовлетворительно	2	не знание большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допущение грубых ошибок в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач
	1	полное незнание материала

#### 5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется до одного часа на подготовку. Разрешается свободно использование литературы и конспектов лекций. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.