

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**ИО директора физтех-школы  
радиотехники и компьютерных  
технологий**

**Д.А. Гаврилов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Введение в теорию адаптивной фильтрации
<b>по направлению:</b>	Инфокоммуникационные технологии и системы связи
<b>профиль подготовки:</b>	Телекоммуникационные сети и системы Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий кафедра мультимедийных технологий и телекоммуникаций
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 45 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: С.А. Бахурин, канд. техн. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры мультимедийных технологий и телекоммуникаций 01.03.2022

## Аннотация

В данном курсе рассматриваются теоретические основы линейной и нелинейной адаптивной фильтрации в системах беспроводной цифровой связи. Обучающиеся изучат эволюцию систем беспроводной связи, их структуру и основные характеристики, структуру цифровых фильтров, изучат основные алгоритмы параметрической адаптации коэффициентов фильтров и их практическое применение в современных системах передачи информации. Полученные знания позволят студентам самостоятельно моделировать адаптивные фильтры и реализовывать их в средах Matlab и Python.

Для успешного прохождения курса необходимо посещение лекций, конспектирование лекционного материала, а также самостоятельная работа с дополнительной литературой и моделированием.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Изучение теоретических основ линейной и нелинейной адаптивной фильтрации в системах беспроводной связи.

Изучение основных алгоритмов параметрической адаптации коэффициентов фильтров, а также основных практических приложений адаптивной фильтрации в современных системах передачи информации.

### Задачи дисциплины

Освоение студентами математического аппарата адаптации, а также приобретение навыков практической программной реализации линейных цифровых фильтров и алгоритмов их адаптации.

Ознакомление студентов с задачами нелинейной фильтрации и путей их решения в современной аппаратуре беспроводной связи.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Способен представлять современную научную картину мира, выявлять естественнонаучную сущность проблем своей профессиональной деятельности, определять пути их решения и оценивать эффективность сделанного выбора	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные и прикладные научные знания в области естественных наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности

ОПК-2 Способен реализовывать новые принципы и методы исследования современных инфокоммуникационных систем и сетей различных типов передачи, распределения, обработки и хранения информации	ОПК-2.1 Знает принципы и методы исследования современных инфокоммуникационных систем и умеет оценивать их достоинства и недостатки
ОПК-3 Способен приобретать, обрабатывать и использовать новую информацию в своей предметной области, предлагать новые идеи и подходы к решению задач своей профессиональной деятельности	ОПК-3.1 Умеет использовать современные информационные и компьютерные технологии, средства коммуникаций при поиске научно-технической информации в своей профессиональной деятельности

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- общую структуру современных систем беспроводной связи;
- основные методы адаптации линейных КИХ-фильтров по критерию минимума среднего квадрата ошибки при вещественных и комплексных входных сигналах;
- основные структуры нелинейных адаптивных корректоров аналоговых устройств и методы их адаптации.

уметь:

- применять полученные теоретические знания при моделировании адаптивных фильтров, а также их программной и аппаратной реализации в виде корректоров аналоговых цепей в системах беспроводной связи;
- моделировать работу цифровых адаптивных фильтров в программных комплексах Matlab и Python.

владеть:

- базовыми теоретическими и экспериментальными методами построения линейных и нелинейных цифровых адаптивных фильтров в системах беспроводной связи;
- актуальными методами адаптации коэффициентов фильтра с использованием алгоритмов оптимизации первого и второго порядка.

### 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	Обобщенная структура приема-передающего тракта беспроводной системы цифровой связи.	2			2

2	Структура цифрового КИХ-фильтра и его характеристики	2			2
3	Основные статистические свойства сигнала как стационарного эргодического случайного процесса. Корреляционная матрица и ее свойства	2			2
4	Задача адаптации цифрового фильтра в поле комплексных чисел	2			2
5	Адаптация коэффициентов КИХ-фильтра по критерию минимума СКО. LS алгоритм. Фильтр Винера.	2			2
6	Обзор алгоритмов численного решения LS.	2	3		5
7	Метод градиентного спуска при адаптации фильтра. LMS алгоритм. Рекурсивный LS и введение в адаптивную Калмановскую фильтрацию.	2	4		6
8	Эквализация канала связи при использовании QAM модуляции высокого порядка	2	4		6
9	Введение в теорию линеаризации усилителей.	2			2
10	Модель нелинейного усилителя без памяти. Способы аппроксимации нелинейной функции.	4			4
11	Модель усилителя с линейной и нелинейной памятью. Нелинейные модели с памятью. Модель Винера и Хаммерштейна	4	4		8
12	Введение в теорию нелинейной аппроксимации на основе нейронных сетей	4			4
Итого часов		30	15		45
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

##### Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Обобщенная структура приема-передающего тракта беспроводной системы цифровой связи.

Эволюция систем цифровой сотовой связи 2G (GSM) -> 3G (CDMA) -> 4G (LTE) -> 5G (MIMO). Обобщенная структура приема-передающего тракта системы (Analog and Digital Front End). Основные характеристики основных элементов структуры (полосы передающего и принимающего сигналов, частоты несущих, частоты АЦП, ЦАП, параметры дуплексора, выходные мощности усилителя). Модули линейной и нелинейной адаптивной коррекции в приеме-передающем тракте системы цифровой связи. Квадратурное представление комплексной огибающей сигналов.

##### 2. Структура цифрового КИХ-фильтра и его характеристики

Структура цифрового КИХ-фильтра и его характеристики. Прохождение сигнала через КИХ-фильтр. Выход фильтра в виде линейной свертки. Понятие вектора состояния фильтра и вектора коэффициентов. Адаптивный фильтр как фильтр с изменяющимися коэффициентами. Понятие опорного сигнала. Ошибка адаптации и критерий минимума среднего квадрата ошибки. Временные соотношения сигналов в адаптивном линейном фильтре. Блочная обработка сигналов.

### 3. Основные статистические свойства сигнала как стационарного эргодического случайного процесса. Корреляционная матрица и ее свойства

Основные статистические свойства сигнала как стационарного эргодического случайного процесса (начальные и центральные моменты, среднее, дисперсия, спектральная плотность мощности, корреляционная функция). Корреляционная матрица и ее свойства (эрмитовость, неотрицательная определенность). Оценка корреляционной матрицы сигнала по ограниченной выборке. Смещенные и несмещенные выборочные оценки.

### 4. Задача адаптации цифрового фильтра в поле комплексных чисел

Понятие скалярной и векторной функции скалярного и векторного аргумента. Понятие вектора градиента, Гесса, Якобиана. Краткий обзор методов минимизации целевой функции (градиентный спуск, метод Ньютона). Анализ целевой функции минимума СКО как неголоморфной функции и обзор методов дифференцирования скалярной вещественнозначной функции векторного комплексного аргумента (Wirtinger Calculus and Matrix Calculus).

### 5. Адаптация коэффициентов КИХ-фильтра по критерию минимума СКО. LS алгоритм. Фильтр Винера.

Решение задачи адаптации коэффициентов КИХ-фильтра по критерию минимума СКО. Дифференцирование целевой функции по векторному аргументу. Уравнение Винера-Хопфа. Решение задачи минимизации при оценке корреляционной матрицы сигнала. LS алгоритм. Фильтр Винера.

### 6. Обзор алгоритмов численного решения LS.

LU-алгоритм, QR-алгоритм, SVD разложение корреляционной матрицы. Практические аспекты использования LS оценки при ограничении полосы сигнала (плохой обусловленности корреляционной матрицы сигнала). Регуляризация решения и использование псевдоинверсии для расчета коэффициентов фильтра.

### 7. Метод градиентного спуска при адаптации фильтра. LMS алгоритм. Рекурсивный LS и введение в адаптивную Калмановскую фильтрацию.

LMS алгоритм. Устойчивость LMS алгоритма и сходимость LMS и LS оценок в предельном переходе с уменьшением шага адаптации. Регуляризация LMS алгоритма методом утечки. RLS алгоритм адаптации линейного фильтра как результат итерационной оценки на основе Леммы об инверсии матрицы (Woodbury matrix identity). Численная устойчивость RLS. Введение в адаптивную Калмановскую фильтрацию.

### 8. Эквализация канала связи при использовании QAM модуляции высокого порядка

Использование адаптивных фильтров для выравнивания канала связи. Проблема квадратурного разбаланса и ее решение методом адаптивной фильтрации.

### 9. Введение в теорию линеаризации усилителей.

Нелинейные характеристики АМ-АМ АМ-РМ. Общее описание нелинейной модели. Ряд Вольтера. Построение системы адаптивной коррекции методами прямого и непрямого обучения.

10. Модель нелинейного усилителя без памяти. Способы аппроксимации нелинейной функции.

Полиномиальная аппроксимация, преимущества и недостатки. Численная неустойчивость полиномиальной модели с ростом порядка полинома. Использование ортогональных полиномов для повышения численной устойчивости полиномиальной аппроксимации. Реализационные проблемы использования полиномиальных DPD. Табличная аппроксимация и LUT-модель.

11. Модель усилителя с линейной и нелинейной памятью. Нелинейные модели с памятью. Модель Винера и Хаммерштейна

Полиномиальная модель с памятью. Структура корреляционной матрицы нелинейного адаптивного фильтра. Сравнение характеристик нелинейной аппроксимации моделей с памятью и без.

12. Введение в теорию нелинейной аппроксимации на основе нейронных сетей

Адаптация нейронной сети методом обратного распространения ошибки. Построение нейронной сети в поле комплексных чисел. Проблемы адаптации нейросетевых структур. Обучение нейросети как невыпуклая задача оптимизации. Наличие локальных экстремумов при адаптации модели.

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

Аудитория с мультимедийным проектором и компьютером, аудиторная доска.

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

1. Цифровая обработка сигналов [Текст] = Discrete-Time Signal Processing : [учеб. пособие для вузов] / А. Оппенгейм, Р. Шафер ; пер. с англ. под ред. С. Ф. Боева . — 3-е изд., испр. — М. : Техносфера, 2012 . — 1048 с.
2. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы [Текст]/В. И. Джиган, -М., Техносфера, 2013

### **Дополнительная литература**

1. Адаптивная обработка сигналов [Текст]/Б. Уидроу, С. Стирнз , -М., Радио и связь, 1989

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

1. <http://lib.mipt.ru> – электронная библиотека Физтеха
2. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
3. <http://benran.ru> – библиотека по естественным наукам Российской академии наук.
4. <http://minsvyaz.ru/ru/documents/> – нормативно-правовые документы Министерства связи и массовых коммуникаций Российской Федерации
5. <http://www.itu.int/pub/T-REC/> – Рекомендации Сектора стандартизации телекоммуникаций Международного союза электросвязи МСЭ-Т
6. <http://www.itu.int/pub/R-REC/> – Рекомендации Сектора радиосвязи Международного союза электросвязи МСЭ-R
7. <http://www.etsi.org/standards-search/> – стандарты Европейского института стандартизации телекоммуникаций ETSI
8. <http://www.ietf.org/rfc.html/> – документы инженерной рабочей группы Интернет RFC IETF

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

В процессе практических занятий используются программные пакеты Matlab и Python.

Примеры расчетов типовых задач также приводятся в средах Matlab и Python.

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

Успешное освоение курса требует большой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы,
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, семинаров, учебной и научной литературе);
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях,
- выполнение лабораторных работ в выбранных программных средах,
- подготовку к контрольным, самостоятельным работам и тестам.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в результате анализа итогов контрольных, самостоятельных работ, а также индивидуальных консультаций.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Инфокоммуникационные технологии и системы связи
<b>профиль подготовки:</b>	Телекоммуникационные сети и системы Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий кафедра мультимедийных технологий и телекоммуникаций
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	С.А. Бахурин, канд. техн. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Способен представлять современную научную картину мира, выявлять естественнонаучную сущность проблем своей профессиональной деятельности, определять пути их решения и оценивать эффективность сделанного выбора	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные и прикладные научные знания в области естественных наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Способен реализовывать новые принципы и методы исследования современных инфокоммуникационных систем и сетей различных типов передачи, распределения, обработки и хранения информации	ОПК-2.1 Знает принципы и методы исследования современных инфокоммуникационных систем и умеет оценивать их достоинства и недостатки
ОПК-3 Способен приобретать, обрабатывать и использовать новую информацию в своей предметной области, предлагать новые идеи и подходы к решению задач своей профессиональной деятельности	ОПК-3.1 Умеет использовать современные информационные и компьютерные технологии, средства коммуникаций при поиске научно-технической информации в своей профессиональной деятельности

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Введение в теорию адаптивной фильтрации» обучающийся должен:

### знать:

- общую структуру современных систем беспроводной связи;
- основные методы адаптации линейных КИХ-фильтров по критерию минимума среднего квадрата ошибки при вещественных и комплексных входных сигналах;
- основные структуры нелинейных адаптивных корректоров аналоговых устройств и методы их адаптации.

### уметь:

- применять полученные теоретические знания при моделировании адаптивных фильтров, а также их программной и аппаратной реализации в виде корректоров аналоговых цепей в системах беспроводной связи;
- моделировать работу цифровых адаптивных фильтров в программных комплексах Matlab и Python.

**владеть:**

- базовыми теоретическими и экспериментальными методами построения линейных и нелинейных цифровых адаптивных фильтров в системах беспроводной связи;
- актуальными методами адаптации коэффициентов фильтра с использованием алгоритмов оптимизации первого и второго порядка.

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

Список типовых вопросов для подготовки к текущему контролю:

1. Эволюция систем цифровой сотовой связи 2G (GSM), 3G (CDMA), 4G (LTE), 5G (MIMO).
2. Обобщенная структура приема-передающего тракта системы цифровой беспроводной связи.
3. Основные характеристики основных элементов структуры приема-передающего тракта системы цифровой беспроводной связи.
4. Модули линейной и нелинейной адаптивной коррекции в приеме-передающем тракте системы цифровой связи.
5. Квадратурное представление комплексной огибающей сигналов.
6. Структура цифрового КИХ-фильтра и его характеристики. Прохождение сигнала через КИХ-фильтр. Выход фильтра в виде линейной свертки.
7. Понятие вектора состояния фильтра и вектора коэффициентов. Адаптивный фильтр как фильтр с изменяющимися коэффициентами. Понятие опорного сигнала.
8. Ошибка адаптации и критерий минимума среднего квадрата ошибки.
9. Временные соотношения сигналов в адаптивном линейном фильтре.
10. Блочная обработка сигналов в линейном адаптивном фильтре.
11. Основные статистические свойства сигнала как стационарного эргодического случайного процесса.
12. Корреляционная матрица и ее свойства.
13. Оценка корреляционной матрицы сигнала по ограниченной выборке. Смещенные и несмещенные выборочные оценки.
14. Векторы градиента, Гессиан, Якобиан скалярной функции векторного аргумента.
15. Минимизации целевой функции методом градиентного спуска
16. Минимизации целевой функции методом градиентного спуска методом Ньютона.
17. Дифференцирования скалярной вещественнозначной функции векторного комплексного аргумента.
18. Решение задачи адаптации коэффициентов КИХ-фильтра по критерию минимума СКО. Уравнение Виннера-Хопфа.
19. Решение уравнения Винера-Хопфа при оценке корреляционной матрицы сигнала. LS алгоритм. Фильтр Винера.
20. Алгоритмов численного решения LS.
21. Использование LS оценки коэффициентов адаптивного фильтра при ограничении полосы сигнала.
22. LMS алгоритм адаптации цифрового фильтра. Устойчивость LMS алгоритма и сходимость LMS и LS оценок.
23. RLS алгоритм адаптации линейного фильтра
24. Рекурсивное Калмановское оценивание.

25. Использование методов адаптивной фильтрации для эквализации канала связи при использовании QAM модуляции высокого порядка
26. Решение задачи квадратурного разбаланса.
27. Нелинейные характеристики АМ-АМ АМ-РМ. Общее описание нелинейной модели.
28. Ряд Вольтера. Построение системы адаптивной коррекции методами прямого и непрямого обучения.
29. Полиномиальная модель нелинейного усилителя без памяти. Преимущества и недостатки.
30. Реализационные проблемы использования полиномиальных моделей усилителей.
31. Табличная аппроксимация и LUT-модель.
32. Модель усилителя с линейной и нелинейной памятью.
33. Структура корреляционной матрицы нелинейного адаптивного фильтра.
34. Сравнение характеристик нелинейной аппроксимации моделей с памятью и без
35. Нейросетевые модели DPD с памятью.
36. Адаптация нейронной сети методом обратного распространения ошибки.
37. Построение нейронной сети в поле комплексных чисел.
38. Проблемы адаптации нейросетевых структур

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

Перечень контрольных вопросов для сдачи дифференцированного зачета:

1. Эволюция систем цифровой сотовой связи 2G (GSM) -> 3G (CDMA) -> 4G (LTE) -> 5G (MIMO).
2. Обобщенная структура приемо-передающего тракта системы (Analog and Digital Front End).
3. Основные характеристики основных элементов структуры (полосы передающего и принимающего сигналов, частоты несущих, частоты АЦП, ЦАП, параметры дуплексора, выходные мощности усилителя).
4. Модули линейной и нелинейной адаптивной коррекции в приемо-передающем тракте системы цифровой связи.
5. Квадратурное представление комплексной огибающей сигналов.
6. Структура цифрового КИХ-фильтра и его характеристики. Прохождение сигнала через КИХ-фильтр. Выход фильтра в виде линейной свертки.
7. Понятие вектора состояния фильтра и вектора коэффициентов.
8. Адаптивный фильтр как фильтр с изменяющимися коэффициентами.
9. Понятие опорного сигнала.
10. Ошибка адаптации и критерий минимума среднего квадрата ошибки.
11. Временные соотношения сигналов в адаптивном линейном фильтре.
12. Блочная обработка сигналов
13. Основные статистические свойства сигнала как стационарного эргодического случайного процесса (начальные и центральные моменты, среднее, дисперсия, спектральная плотность мощности, корреляционная функция).
14. Корреляционная матрица и ее свойства (эрмитовость, неотрицательная определенность). Оценка корреляционной матрицы сигнала по ограниченной выборке. Смещенные и несмещенные выборочные оценки
15. Понятие скалярной и векторной функции скалярного и векторного аргумента.
16. Понятие вектора градиента, Гесссiana, Якобиана.
17. Краткий обзор методов минимизации целевой функции (градиентный спуск, метод Ньютона).
18. Анализ целевой функции минимума СКО как неголоморфной функции и обзор методов дифференцирования скалярной вещественнозначной функции векторного комплексного аргумента (Wirtinger Calculus and Matrix Calculus).
19. Решение задачи адаптации коэффициентов КИХ-фильтра по критерию минимума СКО.
20. Дифференцирование целевой функции по векторному аргументу. Уравнение Винера-Хопфа.
21. Решение задачи минимизации при оценке корреляционной матрицы сигнала. LS алгоритм. Фильтр Винера

22. LU-алгоритм, QR-алгоритм, SVD разложение корреляционной матрицы.
23. Практические аспекты использования LS оценки при ограничении полосы сигнала (плохой обусловленности корреляционной матрицы сигнала).
24. Регуляризация решения и использование псевдоинверсии для расчета коэффициентов фильтра
25. LMS алгоритм. Устойчивость LMS алгоритма и сходимость LMS и LS оценок в предельном переходе с уменьшением шага адаптации.
26. Регуляризация LMS алгоритма методом утечки.
27. RLS алгоритм адаптации линейного фильтра как результат итерационной оценки на основе Леммы об инверсии матрицы (Woodbury matrix identity). Численная устойчивость RLS.
28. Введение в адаптивную Калмановскую фильтрацию.
29. Использование адаптивных фильтров для выравнивания канала связи.
30. Проблема квадратурного разбаланса и ее решение методом адаптивной фильтрации.
31. Нелинейные характеристики АМ-АМ АМ-РМ. Общее описание нелинейной модели. Ряд Вольтера.
32. Построение системы адаптивной коррекции методами прямого и непрямого обучения
33. Полиномиальная аппроксимация, преимущества и недостатки.
34. Численная неустойчивость полиномиальной модели с ростом порядка полинома.
35. Использование ортогональных полиномов для повышения численной устойчивости полиномиальной аппроксимации.
36. Реализационные проблемы использования полиномиальных DPD. Табличная аппроксимация и LUT-модель
37. Полиномиальная модель с памятью.
38. Структура корреляционной матрицы нелинейного адаптивного фильтра.
39. Сравнение характеристик нелинейной аппроксимации моделей с памятью и без.
40. Адаптация нейронной сети методом обратного распространения ошибки.
41. Построение нейронной сети в поле комплексных чисел.
42. Проблемы адаптации нейросетевых структур.
43. Обучение нейросети как невыпуклая задача оптимизации. Наличие локальных экстремумов при адаптации модели

#### Критерии оценивания

Оценка отлично (10) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично (9) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично (8) выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо (7) выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо (6) выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо (5) выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно (4) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно (3) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно (2) выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно (1) выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

Дифференцированный зачет проводится в устной форме.

При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 20 минут на подготовку. Опрос обучающегося проводится в течение 30 минут.

Во время проведения экзамена и зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины.