

**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**

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

<b>по дисциплине:</b>	Пространственная обработка сигналов в современных системах беспроводной связи
<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: В.А. Ляшев, канд. техн. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры мультимедийных технологий и телекоммуникаций 01.03.2022

## Аннотация

Данный курс предназначен для изучения основных принципов и алгоритмов пространственной обработки сигналов в задачах беспроводной передачи данных, а также основных стандартов физического уровня для практического применения рассматриваемых методов в сетях 4G и 5G. В рамках данного курса студенты освоят модельное описание канала распространения информации, общую структуру цифровых систем 4G и основные отличия 5G, основы методов измерения канала и улучшения его оценки, основы пространственно-временного кодирования, особенности управления ресурсами радиодоступа в 5G и актуальные проблемы ММО-систем в 5G. В результате прохождения данного курса студент сможет овладеть основными методами пространственного разделения каналов в режиме многопользовательского доступа, а также теоретическими и экспериментальными методами исследования с целью изучения перспективных методов и систем на основе ММО-передачи.

Курс будет проводиться в формате лекционных и семинарских занятий. Для успешного прохождения курса необходимо посещение и конспектирование лекций, выполнение практических работ на семинарах, а также самостоятельная работа с дополнительной литературой.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- Изучение основных принципов и алгоритмов пространственной обработки сигналов в задачах беспроводной передачи данных;
- Изучение основных стандартов физического уровня для практического применения рассматриваемых методов в сетях 4G и 5G.

### Задачи дисциплины

- освоение студентами модельного описания канала распространения информации, а также освоение методологии измерения параметров канала для последующего использования в задачах пространственной обработки;
- приобретение практических навыков применения стандартов 4G и 5G в задачах пространственной обработки сигналов;
- приобретение знаний для ориентации в современных технологиях цифровой 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	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные и прикладные научные знания в области естественных наук

своей профессиональной деятельности, определять пути их решения и оценивать эффективность сделанного выбора	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 цифровых систем беспроводной связи 4G и основные отличия 5G;
- основы методов измерения канала и улучшения его оценки;
- основы пространственно-временного кодирования;
- современные проблемы в MIMO-системах 5G;
- основы управления ресурсами радиодоступа в 5G.

уметь:

- применять знания основ пространственной обработки и стандартов 5G при разработке и построении беспроводных систем передачи данных 5G.

владеть:

- основными методами пространственного разделения каналов в режиме многопользовательского доступа;
- теоретическими и экспериментальными методами исследования с целью изучения перспективных методов и систем на основе MIMO передачи.

### 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	Введение в системы беспроводной связи	4			4
2	Режимы работ систем беспроводной связи с использованием адаптивных антенных решеток: massive-MIMO	6	4		14
3	Методы извлечения информации о канале: пилотные сигналы, методы представления канала кодовыми книгами	6	4		10
4	Пространственно-временной кодирование сигналов	4	2		6

5	Обзор проблем динамически изменяющихся параметров канала в задачах подвижной связи	4	2		5
6	Особенности управления ресурсами радиодоступа в massive-MIMO системах	6	3		6
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. Введение в системы беспроводной связи

Понятие термина «информация», методов расчета отношений сигнал/шум на бит и на символ, понятия информационной емкости канала, способы определения информационной емкости в SISO и MIMO системах, описание модели канала и ее эволюция по мере использования все более прецизионных систем.

##### 2. Режимы работ систем беспроводной связи с использованием адаптивных антенных решеток: massive-MIMO

Режимы работы систем связи с использованием антенных решеток (SISO, SIMO, MISO, MIMO), а также режимы пространственного мультиплексирования (SU, MU), базовые методы пространственной обработки сигналов, понятие канальной матрицы, ее свойства и эффективный канал; методы построения линейных пространственных фильтров (прекодеров), основы пространственной обработки сигналов в угловом базисе.

##### 3. Методы извлечения информации о канале: пилотные сигналы, методы представления канала кодовыми книгами

Краткое введение в 3GPP стандарт физического уровня, виды пилотных символов и кодовых книг для извлечения информации о канале, методы оценки канала (спускающийся канал, восходящий канал).

##### 4. Пространственно-временное кодирование сигналов

Свойства эффективного канала по мере роста числа антенн в системе связи, проблемы калибровки, проблемы устаревания канальной информации, проблемы интерполяции полученных измерений, вычислительная сложность.

##### 5. Обзор проблем динамически изменяющихся параметров канала в задачах подвижной связи

Свойства эффективного канала по мере роста числа антенн в системе связи, проблемы калибровки, проблемы устаревания канальной информации, проблемы интерполяции полученных измерений, вычислительная сложность.

##### 6. Особенности управления ресурсами радиодоступа в massive-MIMO системах

Введение в теорию распределения ресурсов, критерии планирования и целевая функция, распределение ресурсов по времени и частоте, переиспользование ресурсов в пространстве за счет пространственного мультиплексирования, задача координации интерференции и совместной (когерентной) передачи, проблема оценки эффективного отношения сигнал/шум и определения транспортного блока в системах 4G и 5G. Связь «планировщика» с расчетом пространственных фильтров в системах massive-MIMO.

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

Аудитория с мультимедийным проектором и компьютером, аудиторная доска.  
Программный пакет Octave.

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

1. Цифровая связь : Теоретические основы и практическое применение [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Б. Скляр ; [пер. с англ. Е. Г. Грозы [и др.] ; под ред. А. В. Назаренко] .— 2-е изд., испр. — М. : Вильямс, 2007 .— 1104 с.
2. Введение в смарт-антенны [Текст]/К. А. Баланис, П. И. Иоанидес , -М., Техносфера, 2012

### **Дополнительная литература**

1. Компьютерные сети [Текст] = Computer Networks /Э. Таненбаум, Д. Уэзеролл ; пер. с англ. А. Гребенькова, [учебник для вузов]. -СПб, Питер, 2015

## **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-Р
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)**

В процессе практических занятий используются программный пакет Octave.  
Примеры расчетов типовых задач также приводятся в среде Octave.

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

Успешное освоение курса «Пространственная обработка сигналов в современных системах беспроводной связи» 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 работ в среде Octave,
- 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

**Разработчик:** В.А. Ляшев, 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 «Пространственная обработка сигналов в современных системах беспроводной связи» обучающийся должен:

### знать:

- общую структуру цифровых систем беспроводной связи 4G и основные отличия 5G;
- основы методов измерения канала и улучшения его оценки;
- основы пространственно-временного кодирования;
- современные проблемы в MIMO-системах 5G;
- основы управления ресурсами радиодоступа в 5G.

### уметь:

- применять знания основ пространственной обработки и стандартов 5G при разработке и построении беспроводных систем передачи данных 5G.

### владеть:

- основными методами пространственного разделения каналов в режиме многопользовательского доступа;
- теоретическими и экспериментальными методами исследования с целью изучения перспективных методов и систем на основе MIMO передачи.

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

Перечень типовых вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю:

1. Понятия «информация», «отношение сигнал/шум» и емкость канала.
2. Свойства преобразования Фурье.
3. Сферические и плоские радиоволны.
4. MIMO системы: емкость канала передачи данных в таких системах.
5. Виды систем беспроводной передачи данных на основе антенных решеток.
6. Режимы работы: SU-MIMO и MU-MIMO в системах беспроводной связи.
7. Понятие эффективного канала, базовые принципы пространственного разделения каналов.
8. Методы расчета весовых коэффициентов прекодера на основе различных критериев в режиме SU-MIMO.
9. Методы расчета весовых коэффициентов прекодера на основе различных критериев в режиме SU-MIMO.
10. Методы расчета весовых коэффициентов прекодера на основе различных критериев в режиме MU-MIMO.
11. Пространственная обработка сигналов в угловом базисе.
12. Методы измерения канальной информации в нисходящем канале LTE/5G.
13. Методы измерения канальной информации в восходящем канале LTE/5G.
14. Методы улучшения канальных оценок (удаления шума, улучшение разрешения).
15. Пространственно-временное кодирование: принципы, методы, приложения.
16. Свойства эффективного канала по мере роста числа антенн в системе связи.
17. Эффект Допплера, понятие спектра Допплера и порождаемая ими интерференция в системах MIMO.
18. Принципы управления радио ресурсами базовой станции. Понятие «планировщик».
19. Критерии планирования (выделения) ресурсов и приоритизации пользователей. Особенности работы планировщика в режиме MU-MIMO.
20. Система беспроводной связи как система с обратной связью: адаптация модуляционно-кодовой схемы, запросы на повторную передачу, устойчивость системы к ошибкам в оценках параметров канала связи в MIMO-системе.

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

Перечень контрольных вопросов для сдачи дифференцированного зачета в 9-ом семестре:

1. Понятие термина «информация», методов расчета отношений сигнал/шум на бит и на символ.
2. Понятия информационной емкости канала, способы определения информационной емкости в SISO и MIMO системах.
3. Описание модели канала и ее эволюция по мере использования все более прецизионных систем.
4. Режимы работы систем связи с использованием антенных решеток (SISO, SIMO, MISO, MIMO), а также режимы пространственного мультиплексирования (SU, MU).
5. Базовые методы пространственной обработки сигналов.
6. Понятие канальной матрицы, ее свойства и эффективный канал.
7. Методы построения линейных пространственных фильтров (прекодеров), основы пространственной обработки сигналов в угловом базисе.
8. Введение в 3GPP стандарт физического уровня, виды пилотных символов и кодовых книг для извлечения информации о канале.
9. Методы оценки канала (нисходящий канал, восходящий канал).
10. Общая схема пространственно-временного кодирования, MIMO-системы с/без обратной связи.
11. Ортогональное пространственно-временное кодирование, решетчатые коды, вероятность битовой ошибки и спектральная эффективность таких методов.

12. Свойства эффективного канала по мере роста числа антенн в системе связи, проблемы калибровки, проблемы устаревания канальной информации, проблемы интерполяции полученных измерений, вычислительная сложность.
13. Введение в теорию распределения ресурсов, критерии планирования и целевая функция.
14. Распределение ресурсов по времени и частоте, переиспользование ресурсов в пространстве за счет пространственного мультиплексирования.
15. Задача координации интерференции и совместной (когерентной) передачи.
16. Проблема оценки эффективного отношения сигнал/шум и определения транспортного блока в системах 4G и 5G.
17. Связь «планировщика» с расчетом пространственных фильтров в системах massive-MIMO

#### 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 зачета обучающемуся предоставляется 20 минут на подготовку. Опрос обучающегося проводится в течение 30 минут.

Во время проведения дифференцированного зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины.