

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Ястребов Олег Александрович

Должность: Ректор

Дата подписания: 26.05.2026 11:56:08

Уникальный программный ключ:

ca953a01204891083f939673078ef1a989dae18a

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования**

**«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»**

**Факультет физико-математических и естественных наук**

(наименование основного учебного подразделения (ОУП)-разработчика ОП ВО)

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

### **ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ ПОСЛЕДУЮЩИХ ПОКОЛЕНИЙ**

(наименование дисциплины/модуля)

**Рекомендована МССН для направления подготовки/специальности:**

#### **01.04.02 ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА**

(код и наименование направления подготовки/специальности)

**Освоение дисциплины ведется в рамках реализации основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОП ВО):**

#### **ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ СТАТИСТИКА**

(наименование (профиль/специализация) ОП ВО)

**2026 г.**

## 1. ЦЕЛЬ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина «Построение и анализ моделей беспроводных сетей последующих поколений» входит в программу магистратуры «Теория вероятностей и математическая статистика» по направлению 01.04.02 «Прикладная математика и информатика» и изучается во 2 семестре 1 курса. Дисциплину реализует Кафедра теории вероятностей и кибербезопасности. Дисциплина состоит из 3 разделов и 23 тем и направлена на изучение подходов к управлению качеством обслуживания в сотовых сетях связи текущего (LTE) следующего поколения (mmWave/5G+/6G).

Целью освоения дисциплины является рассмотрение вопросов качества в таких сетях на различных уровнях; знакомство с методами анализа и расчета показателей качества отдельных элементов сетей, а также сети в целом; освоение и исследование точных и приближенных методов анализа качества обслуживания в сотовых сетях связи следующего поколения.

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Освоение дисциплины «Построение и анализ моделей беспроводных сетей последующих поколений» направлено на формирование у обучающихся следующих компетенций (части компетенций):

*Таблица 2.1. Перечень компетенций, формируемых у обучающихся при освоении дисциплины (результаты освоения дисциплины)*

Шифр	Компетенция	Индикаторы достижения компетенции (в рамках данной дисциплины)
УК-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними; УК-1.2 Осуществляет поиск информации для решения поставленной задачи по различным типам запросов; критически оценивает надежность источников информации, работает с противоречивой информацией из разных источников; УК-1.3 Предлагает варианты решения задачи, анализирует возможные последствия их использования;
ПК-1	Проведение работ по обработке и анализу научно-технической информации и результатов исследований	ПК-1.1 Знает основы научно-исследовательской деятельности в области прикладной математики и информационных технологий; владеет знанием основ философии и методологии науки; владеет методами научных исследований, умеет применять их на практике.; ПК-1.2 Знает принципы построения научной работы, методы сбора и анализа полученного материала, способы аргументации; владеет навыками подготовки научных обзоров, публикаций, рефератов и библиографий по тематике проводимых исследований на русском и иностранном языке; способен готовить публикации в научно-технических тематических изданиях; ПК-1.3 Умеет применять полученные знания в области прикладной математики и информатики, а также решать стандартные задачи собственной научно-исследовательской деятельности; умеет решать научные задачи с пониманием существующих подходов к верификации моделей по тематике исследований в соответствии с выбранной методикой;

## 3. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОП ВО

Дисциплина «Построение и анализ моделей беспроводных сетей последующих поколений» относится к блоку по выбору блока образовательной программы высшего образования.

В рамках образовательной программы высшего образования обучающиеся также осваивают другие дисциплины и/или практики, способствующие достижению запланированных результатов освоения дисциплины «Построение и анализ моделей беспроводных сетей последующих поколений».

Таблица 3.1. Перечень компонентов ОП ВО, способствующих достижению запланированных результатов освоения дисциплины

Шифр	Наименование компетенции	Предшествующие дисциплины/модули, практики*	Последующие дисциплины/модули, практики*
УК-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий	Теория случайных процессов; Математическая теория телеграфика; Статистический анализ данных; Математические основы защиты информации и информационной безопасности; Моделирование беспроводных сетей; Информационные базы данных;	Преддипломная практика; Научно-исследовательская работа; Практикум по машинному обучению; Показатели эффективности беспроводных сетей последующих поколений; Карта бизнес-процессов и информационная модель управления телекоммуникациями; Компьютерный анализ временных рядов;
ПК-1	Проведение работ по обработке и анализу научно-технической информации и результатов исследований	Теория случайных процессов; Математическая теория телеграфика; Моделирование беспроводных сетей;	Преддипломная практика; Научно-исследовательская работа; Прикладные задачи математического моделирования; Computer Skills for Scientific Writing; Показатели эффективности беспроводных сетей последующих поколений; Практикум по машинному обучению; Карта бизнес-процессов и информационная модель управления телекоммуникациями; Компьютерный анализ временных рядов;

\* - заполняется в соответствии с матрицей компетенций и СУП ОП ВО

\*\* - элективные дисциплины /практики

#### 4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Построение и анализ моделей беспроводных сетей последующих поколений» составляет «4» зачетные единицы.

Таблица 4.1. Виды учебной работы по периодам освоения образовательной программы высшего образования для очной формы обучения.

Вид учебной работы	ВСЕГО, ак.ч.		Семестр(-ы)
			2
<i>Контактная работа, ак.ч.</i>	36		36
Лекции (ЛК)	18		18
Лабораторные работы (ЛР)	0		0
Практические/семинарские занятия (СЗ)	18		18
<i>Самостоятельная работа обучающихся, ак.ч.</i>	108		108
<i>Контроль (экзамен/зачет с оценкой), ак.ч.</i>	0		0
<b>Общая трудоемкость дисциплины</b>	<b>ак.ч.</b>	<b>144</b>	<b>144</b>
	<b>зач.ед.</b>	<b>4</b>	<b>4</b>

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Таблица 5.1. Содержание дисциплины (модуля) по видам учебной работы

Номер раздела	Наименование раздела дисциплины	Наименование темы		Содержание темы	Вид учебной работы*
Раздел 1	Эволюция беспроводных сотовых сетей	1.1	Особенности развития сетей связи, история развития ССС, процесс стандартизации ССС, назначение электромагнитного спектра	Развитие сетей связи характеризуется переходом к интеллектуальному управлению, виртуализации функций и поддержке массовых подключений интернета вещей. История ССС включает эволюцию от аналогового голоса (1G) к цифровой передаче (2G/3G), высокоскоростному мобильному интернету (4G) и сверхмалым задержкам (5G). Стандартизация, проводимая организациями ITU и 3GPP, гарантирует единство технологий и совместимость оборудования во всем мире. Электромагнитный спектр выступает фундаментом связи: низкие частоты обеспечивают покрытие больших территорий, а высокие частоты — максимальную пропускную способность для передачи данных.	ЛК, СЗ
		1.2	Развитие сетей ССС, особенности поколения, технологические свойства и отличия	Раздел кратко описывает эволюцию сотовой связи от 1G до 5G, показывая основные отличия поколений: от передачи только голоса к быстрому мобильному интернету, мультимедиа, IP-сетям и поддержке интернета вещей.	ЛК, СЗ
Раздел 2	Методы анализа сотовых сетей связи	2.1	Сети 4G+: сетевые механизмы наращивания емкости	Раздел кратко объясняет, как в 4G+ повышают емкость сети за счет агрегации частот, MIMO, малых сот и более эффективной модуляции, что позволяет обслуживать больше пользователей и увеличивать скорость передачи данных.	ЛК, СЗ
		2.2	Сети 5G “Новое Радио” основные особенности	Сети 5G New Radio (NR) характеризуются использованием расширенного спектра частот, включая миллиметровые волны, что обеспечивает сверхвысокую пропускную способность. Основные особенности включают технологию Massive MIMO для точного формирования луча (Beamforming), ультранизкую задержку сигнала (до 1 мс) и концепцию сетевого слайсинга (Network Slicing), позволяющую создавать изолированные виртуальные сети под конкретные задачи, такие как промышленная автоматизация или интернет вещей.	ЛК, СЗ
		2.3	Сети 5G “Новое Радио” функциональные особенности радиодоступа	Раздел посвящен функциональным особенностям радиодоступа 5G NR: гибкой структуре радиоинтерфейса, поддержке разных диапазонов частот, Beamforming, Massive MIMO, низким	ЛК, СЗ

Номер раздела	Наименование раздела дисциплины	Наименование темы		Содержание темы	Вид учебной работы*
				задержкам и возможности эффективно обслуживать как высокоскоростную передачу данных, так и устройства интернета вещей	
		2.4	Сети 5G “Новое Радио” сценарии использования	Раздел кратко описывает основные сценарии применения 5G NR: сверхбыстрый мобильный интернет, связь для Интернета вещей, промышленную автоматизацию, автономный транспорт, умные города и сервисы, требующие низкой задержки и высокой надежности.	ЛК, СЗ
		2.5	Сети терагерцового доступа 6G: приложения	Раздел кратко описывает приложения терагерцового доступа 6G: сверхскоростную передачу данных, связь с минимальной задержкой, высокоточные сенсорные системы, поддержку AR/VR, автономных устройств и массового интернета вещей.	ЛК, СЗ
		2.6	Сети терагерцового доступа 6G: открытые задачи	Раздел кратко рассматривает открытые задачи терагерцовых сетей 6G: преодоление больших потерь сигнала, создание новых антенн и приемопередатчиков, снижение энергопотребления, борьбу с помехами, обеспечение надежности связи и разработку эффективных методов управления спектром.	ЛК, СЗ
		2.7	Совмещение методов стохастической геометрии и СМО для анализа сетей 5G NR	Раздел кратко объясняет, как совместное использование стохастической геометрии и СМО помогает анализировать сети 5G NR: первая описывает случайное расположение пользователей и базовых станций, а вторая — очереди, задержки и загрузку сети. Это позволяет оценивать производительность, покрытие и качество обслуживания в реальных условиях.	ЛК, СЗ
Раздел 3	Математические модели для сетей LTE/5G/6G	3.1	Моделирование mmWave: потери распространения	Описывает моделирование mmWave и потери распространения: на этих частотах сигнал сильнее ослабляется из-за расстояния, препятствий и поглощения в среде, поэтому для связи нужны направленные антенны, beamforming и точное планирование покрытия.	ЛК, СЗ
		3.2	Моделирование mmWave: пространственные характеристики блокировки	Раздел рассматривает пространственные характеристики блокировки в миллиметровом диапазоне: как физические объекты (здания, деревья, люди) прерывают прямую видимость сигнала. В нем описываются математические модели вероятности блокировки, их зависимость от геометрии среды и влияние этих факторов на общую надежность и стабильность	ЛК, СЗ

Номер раздела	Наименование раздела дисциплины	Наименование темы	Содержание темы	Вид учебной работы*
			соединения в сетях mmWave.	
		3.3 Моделирование mmWave: временные характеристики блокировки	Раздел описывает временные характеристики блокировки в mmWave-сетях: как часто возникают препятствия, как долго они длятся и как быстро меняются условия канала. Рассматривается влияние движения людей и объектов на устойчивость связи, а также модели, которые помогают оценивать переключения между состояниями «есть линия видимости» и «нет линии видимости».	ЛК, СЗ
		3.4 Моделирование mmWave: антенные решетки	Раздел раскрывает тему антенных решеток в mmWave-сетях: их роль в формировании узких направленных лучей, увеличении усиления и компенсации высоких потерь распространения. Также рассматриваются принципы beamforming и влияние конфигурации решетки на покрытие, пропускную способность и устойчивость связи.	ЛК, СЗ
		3.5 Моделирование mmWave: линейная шкала и особенности терагерцового распространения	В данном разделе рассматривается специфика распространения сигналов при переходе от миллиметровых волн к терагерцовому диапазону. Основное внимание уделяется резкому возрастанию молекулярного поглощения (особенно парами воды) и чрезвычайно высоким потерям при отражении и дифракции. В контексте линейной шкалы анализируется, как сокращение длины волны требует сверхплотного размещения узлов сети и использования сверхмассивных антенных решеток для поддержания связи в пределах прямой видимости.	ЛК, СЗ
		3.6 Моделирование mmWave: функциональные преобразования случайных величин для моделирования беспроводных сетей связи	Этот раздел описывает математический аппарат, используемый для анализа производительности сетей mmWave. Основное внимание уделяется методам преобразования плотностей вероятности случайных величин, таких как расстояние до базовой станции или углы прихода сигнала, в распределения целевых метрик сети (например, отношения сигнал/шум SNR или мощности интерференции).	ЛК, СЗ
		3.7 Моделирование mmWave: методы оценки помехи	В этом разделе рассматриваются основные подходы к оценке помех в mmWave-сетях. Подчеркивается влияние узкой направленности антенн, высокой чувствительности к взаимному расположению передатчиков и приемников, а также значительная роль блокировок и отражений. Описываются аналитические и численные методы вычисления суммарной	ЛК, СЗ

Номер раздела	Наименование раздела дисциплины	Наименование темы		Содержание темы	Вид учебной работы*
				помехи, включая учет пространственного распределения источников, диаграмм направленности и вероятности совпадения лучей, что позволяет оценивать качество связи и устойчивость сети.	
		3.8	Моделирование mmWave: оценка помехи	В этом разделе рассматривается оценка помехи в mmWave-сетях. Из-за узкой направленности лучей и сильного затухания вклад помехи часто определяется немногими близкими источниками и условиями прямой видимости. Для оценки используют модели пространственного распределения узлов, параметры антенн, вероятности блокировки и ослабление сигнала на пути, чтобы вычислить уровень интерференции и его влияние на качество связи.	ЛК, СЗ
		3.9	Моделирование mmWave: 3D модели оценки помехи. Параметризация ресурсных СМО	Этот раздел посвящен анализу трехмерных моделей распространения сигнала, которые учитывают высоту расположения антенн и вертикальную плоскость диаграммы направленности. В отличие от 2D-моделей, 3D-подход позволяет более точно оценивать помехи в условиях плотной городской застройки и многоэтажных зданий. Вторая часть подтемы рассматривает параметризацию систем массового обслуживания (СМО) для описания использования радиоресурсов. Здесь определяются ключевые параметры, такие как интенсивность поступления запросов на обслуживание, время удержания канала и дисциплины обслуживания очередей. Это позволяет связать физические характеристики сигнала и уровень помех с показателями качества обслуживания (QoS) и пропускной способностью сети	ЛК, СЗ
		3.10	Борьба с блокировками: мультисвязность для поддержки соединения	В этом разделе рассматриваются методы борьбы с блокировками в mmWave-сетях с помощью мультисвязности. Такой подход позволяет устройству поддерживать несколько параллельных соединений с разными базовыми станциями или точками доступа, чтобы сохранить связь при ухудшении одного из каналов. Это повышает устойчивость сети, уменьшает вероятность разрыва соединения и улучшает качество обслуживания пользователей в условиях препятствий и динамичной среды.	ЛК, СЗ

Номер раздела	Наименование раздела дисциплины	Наименование темы		Содержание темы	Вид учебной работы*
		3.11	Борьба с блокировками: мультисвязность для поддержки QoS	Данная подтема фокусируется на использовании мультисвязности (Multi-connectivity) для обеспечения гарантированного качества обслуживания (QoS) в условиях нестабильного миллиметрового канала. Основное внимание уделяется механизмам мгновенного переключения между базовыми станциями или одновременной передачи данных через несколько узлов при возникновении блокировок.	ЛК, СЗ
		3.12	Оценка SINR и емкости	В рамках темы рассматриваются методы вычисления SINR с учетом затухания, интерференции и особенностей среды распространения, а также способы оценки емкости на основе полученных значений. Это позволяет прогнозировать производительность сети, сравнивать разные сценарии размещения станций и принимать решения для повышения эффективности связи.	ЛК, СЗ
		3.13	Ресурсные СМО	Тема «Ресурсные СМО» посвящена системам массового обслуживания, в которых ограниченные ресурсы распределяются между поступающими заявками по заданным правилам. Здесь изучаются модели очередей, механизмы обслуживания, вероятность отказов и загрузка системы при разных интенсивностях потока.	ЛК, СЗ
		3.14	Борьба с блокировками: резервация ресурсов	Тема «Борьба с блокировками: резервация ресурсов» посвящена методам обеспечения надежности соединения в условиях высокой динамики беспроводной среды, особенно в высокочастотных диапазонах. Основная идея заключается в предварительном выделении или сохранении части сетевых ресурсов на нескольких базовых станциях или узлах доступа одновременно.	ЛК, СЗ

\* - заполняется только по **ОЧНОЙ** форме обучения: ЛК – лекции; ЛР – лабораторные работы; СЗ – практические/семинарские занятия.

## 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Таблица 6.1. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Тип аудитории	Оснащение аудитории	Специализированное учебное/лабораторное оборудование, ПО и материалы для освоения дисциплины (при необходимости)
Лекционная	Аудитория для проведения занятий лекционного типа, оснащенная комплектом специализированной мебели; доской (экраном) и техническими средствами мультимедиа презентаций.	Компьютер/ноутбук с доступом сети Интернет и электронно-образовательной среде Университета, браузер, ПО для просмотра PDF, MS Teams или ЯндексТелемост.
Семинарская	Аудитория для проведения занятий семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, оснащенная комплектом специализированной мебели и техническими средствами мультимедиа презентаций.	Компьютер/ноутбук с доступом сети Интернет и электронно-образовательной среде Университета, браузер, ПО для просмотра PDF, MS Teams или ЯндексТелемост.
Для самостоятельной работы	Аудитория для самостоятельной работы обучающихся (может использоваться для проведения семинарских занятий и консультаций), оснащенная комплектом специализированной мебели и компьютерами с доступом в ЭИОС.	ОС Windows или ОС Linux, офисный пакет MS Office или LibreOffice, ПО для просмотра pdf (например, acrobat reader или evince), интерпретатор Python версии 3.5 и старше, компилятор языка C/C++ gcc, редактор app-editors/jedit.

\* - аудитория для самостоятельной работы обучающихся указывается **ОБЯЗАТЕЛЬНО!**

## 7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература:

1. Молчанов Д.А., Бегишев В. О., Самуйлов К. Е., Кучерявый Е. А. Сети 5G/6G: архитектура, технологии, методы анализа и расчета: монография /. – Москва: РУДН, 2022. – 516 с.: ил.
2. Молчанов Д.А., Бегишев В.О., Самуйлов А.К., Самуйлов К.Е. Модели и методы оценки характеристик сетей связи 5G: учебно-методическое пособие. – Москва: РУДН, 2020. – 95 с.
3. Молчанов Д.А., Бегишев В.О. Сопин Э.С. Имитационное моделирование сетей и систем телекоммуникаций: учебное пособие /. – М.: РУДН, 2024. – 110 с.: ил.

4. Сопин Э.С., Самуйлов К.Е. Ресурсные системы массового обслуживания и их применения к анализу беспроводных сетей: монография /. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2026. – 160 с.

5. Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Левин, Б. Р. – Советское радио, 1976.

6. Бочаров, П.П. Теория вероятностей. Математическая статистика / П.П. Бочаров, А.В. Печинкин. – 2-е изд. – Москва : Физматлит, 2005. – 296 с.

*Дополнительная литература:*

1. Moltchanov, D., Sopin, E., Begishev, V., Samuylov, A., Koucheryavy, Y., & Samouylov, K. A Tutorial on Mathematical Modeling of 5G/6G Millimeter Wave and Terahertz Cellular Systems //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Т. 24. – №. 2. – С. 1072 - 1116. (Квартиль Q1 TOP-1% по Scopus, SJR по Scopus 14.184).  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9726709>

2. Sopin, E., Daraseliya, A., Begishev, V., Samouylov, K., Koucheryavy, Y. Improving fairness and utilization in 5G/6G mmWave/sub-THz systems via virtual queuing //Computer Networks. – 2025. – С. 111317.

*Ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»:*

1. ЭБС РУДН и сторонние ЭБС, к которым студенты университета имеют доступ на основании заключенных договоров

- Электронно-библиотечная система РУДН – ЭБС РУДН

<https://mega.rudn.ru/MegaPro/Web>

- ЭБС «Университетская библиотека онлайн» <http://www.biblioclub.ru>

- ЭБС «Юрайт» <http://www.biblio-online.ru>

- ЭБС «Консультант студента» [www.studentlibrary.ru](http://www.studentlibrary.ru)

- ЭБС «Знаниум» <https://znanium.ru/>

2. Базы данных и поисковые системы

- Sage <https://journals.sagepub.com/>

- Springer Nature Link <https://link.springer.com/>

- Wiley Journal Database <https://onlinelibrary.wiley.com/>

- Научометрическая база данных Lens.org <https://www.lens.org>

*Учебно-методические материалы для самостоятельной работы обучающихся при освоении дисциплины/модуля\*:*

1. Курс лекций по дисциплине «Построение и анализ моделей беспроводных сетей последующих поколений».

\* - все учебно-методические материалы для самостоятельной работы обучающихся размещаются в соответствии с действующим порядком на странице дисциплины **в ТУИС!**

**РАЗРАБОТЧИК:**

Доцент кафедры теории  
вероятностей и  
кибербезопасности

---

*Должность, БУП*

---

*Подпись*

Бегишев Вячеслав  
Олегович

---

*Фамилия И.О.*

**РУКОВОДИТЕЛЬ БУП:**

Заведующий кафедрой теории  
вероятностей и  
кибербезопасности

---

*Должность БУП*

---

*Подпись*

Самуйлов Константин  
Евгеньевич

---

*Фамилия И.О.*

**РУКОВОДИТЕЛЬ ОП ВО:**

Профессор кафедры  
математического  
моделирования и  
искусственного интеллекта

---

*Должность, БУП*

---

*Подпись*

Севастьянов Леонид  
Антонович

---

*Фамилия И.О.*