

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ»

**МОДЕЛИ
И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ
ХАРАКТЕРИСТИК
СЕТЕЙ СВЯЗИ 5G**

Учебно-методическое пособие

Москва
Российский университет дружбы народов
2020

УДК 378.147.88:004(072.8)
ББК 74.58+32.81с
М74

Утверждено
РИС Ученого совета
Российского университета
дружбы народов

Рецензенты:

заведующий кафедрой «Сети связи и системы коммутации» МТУСИ
доктор технических наук, профессор *С.Н. Степанов*;
профессор кафедры прикладной информатики
и теории вероятностей РУДН,
доктор физико-математических наук, доцент *Ю.В. Гайдамака*

Авторы:

Д.А. Молчанов, В.О. Бегишев, А.К. Самуйлов, К.Е. Самуйлов

М74 **Модели и методы оценки характеристик сетей
связи 5G** : учебно-методическое пособие / Д. А. Молчанов,
В. О. Бегишев, А. К. Самуйлов, К. Е. Самуйлов. – Москва :
РУДН, 2020. – 95 с. : ил.

Пособие представляет перечень знаний, ряд практических задач на получение обучающимися основных навыков имитационного моделирования для оценки базовых характеристик современных сетей пятого поколения.

Издание рекомендуется для студентов первого курса магистратуры направления «02.04.02 Фундаментальная информатика и информационные технологии», требуется для обеспечения как аудиторной, так и самостоятельной работы студентов по дисциплине «Анализ информационных технологий».

ISBN 978-5-209-10283-0

© Молчанов Д.А., Бегишев В.О.,
Самуйлов А.К., Самуйлов К.Е., 2020
© Российский университет
дружбы народов, 2020

Оглавление

Предисловие	5
1. Сети беспроводного доступа 5G	6
1.1. Услуги сетей связи 5G.....	8
1.2. Сети доступа «Новое Радио»	11
1.3. Характеристики обслуживания	13
2. Модели компонентов системы связи 5G «Новое Радио»	14
2.1. Модели в двухмерном пространстве	14
2.1. Модели в трехмерном пространстве.....	21
2.3. Упражнения	26
3. Оценка характеристик сетей 5G «Новое Радио»	27
3.1. Методология оценки характеристик	27
3.2. Функции случайных величин	28
3.3. Модели прямого взаимодействия устройств	35
3.4. Упражнения	42
4. Оценка интерференции в случайных сетях	43
4.1. Двухмерный сценарий развертывания	44
4.2. Трехмерный сценарий развертывания.....	49
4.3. Численные примеры	55
4.4. Упражнения	59
5. Оценка характеристик сетей 5G «Новое Радио»	60
5.1. Общая методология оценки характеристик сети.....	60
5.2. Двухмерный сценарий развертывания	61

5.3. Трехмерный сценарий развёртывания.....	65
5.4. Численные примеры	68
5.5. Упражнения	74
Учебно-методический комплекс.....	75
Программа дисциплины	76
1. Цели и задачи дисциплины	76
2. Место дисциплины в структуре ОП ВО	76
3. Требования к результатам освоения дисциплины	77
4. Объем дисциплины и виды учебной работы	79
5. Содержание дисциплины	80
6. Лабораторный практикум.....	81
7. Практические занятия (семинары)	82
8. Материально-техническое обеспечение дисциплины ..	82
9. Информационное обеспечение дисциплины.....	83
10. Учебно-методическое обеспечение дисциплины	83
11. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины... ..	86
Паспорт фонда оценочных средств	87
Примерный перечень оценочных средств	93
Сведения об авторах	95

Предисловие

Учебно-методическое пособие «Модели и методы оценки характеристик беспроводных каналов сети 5G» предназначено для студентов первого курса магистратуры направления «02.04.02 Фундаментальная информатика и информационные технологии», требуется для обеспечения как аудиторной, так и самостоятельной работы студентов по дисциплине «Анализ информационных технологий» факультета физико-математических и естественных наук Российского университета дружбы народов.

Данная дисциплина является обязательной составной частью основной профессиональной образовательной программы (ОПОП) высшего образования и представляет собой вид учебной работы, направленный на развитие практических навыков и умений, а также формирование компетенций по избранному направлению подготовки в процессе выполнения определенных видов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Учебное пособие состоит из пяти глав. В первой главе рассматриваются особенности сетей связи пятого поколения. Во второй главе приведены модели компонентов системы сетей связи 5G NR (англ. New Radio, NR, «Новое Радио»), включая модели расположения узлов, распространения сигнала, фазовых антенных решеток и т.д. Эти модели используются далее в последующих главах: в третьей главе для разработки общей методологии оценки характеристик производительности систем связи, а также в четвертой и пятых главах для оценки уровня помех (интерференции от англ. interference), отношения сигнал-помеха и достижимой скорости в сетях 5G. В конце каждого раздела приведены упражнения для лучшего освоения учебного материала.

1. Сети беспроводного доступа 5G

В течение последних десяти лет объем трафика, который передается по беспроводным сетям связи, стремительно вырос по сравнению с предыдущими годами. Согласно прогнозам компании Cisco, увеличение объема передаваемого трафика в 2017-2019 годах составило более 70%, и в ближайшем будущем ожидается сохранение этой тенденции. Это связано с достижением высокого уровня технологии мобильного широкополосного доступа четвертого поколения (4G), дающей значительные улучшения в ряде новых пользовательских приложений и услуг сотовой связи. К примеру, технология доступа 4G LTE (англ. Long Term Evolution) существенно увеличила скорость доступа к данным, предлагая в то же время широкий набор современных интернет-услуг и эффективно конкурируя с другими типами беспроводных решений, включая и Wi-Fi.

Значительное увеличение пропускной способности беспроводного интерфейса направляет нас на начало новой эры доступа в интернет. Однако, многие считают, что технология 4G LTE не сможет справиться с указанным ростом трафика уже в ближайшем будущем, что может нанести серьезные проблемы на уровень (англ. Quality of Service, QoS) качества обслуживания пользователей и вызвать колоссальный дефицит пропускной способности сети на беспроводном участке доступа.

Одним из возможных решений на вышеописанные проблемы является развертывание более плотных сетей с меньшими зонами покрытия, к примеру, за счет применения пикосот, радиус покрытия которых не превышает 500 м, и фемтосот – радиус покрытия до 50 м. Такое решение может потенциально обеспечить необходимые улучшения в скорости передачи данных за счет увеличения пространственной емкости сети и энергоэффективности мобильных устройств за счет

уменьшения мощности, требуемой для передачи. Однако, в таких развертываниях возникают дополнительные проблемы, связанные с увеличением уровня помех. В дополнение к помехам, перед операторами мобильной связи встают вопросы экономического характера, связанные с высокой оплатой за аренду и растущими расходами на развертывание и обслуживание. Не смотря на эти трудности, тенденция уплотнения сетей является сегодня как одно из основных решений для повышения степени пространственного использования частот и, следовательно, удовлетворения постоянно растущего запроса на передачу информации в системах пятого поколения (англ. Fifth Generation, 5G).

Другим возможным вариантом удовлетворения растущих потребностей пользователей на абонентском участке доступа является значительное расширение доступного спектра частот. Этот метод был взят за основу организациями по стандартизации сетей связи 5G – ITU-R (англ. International Telecommunication Union-Radio) и 3GPP (англ. 3rd Generation Partnership Project) при разработке новой технологии доступа «Новое Радио» (англ. New Radio, NR). Используя миллиметровый диапазон частот (30-100 ГГц), в частности, 28 ГГц, 38 ГГц и 72 ГГц такие системы будут обладать значительно более широким спектром частот, достигающим нескольких сотен мегагерц, что позволит значительно повысить скорость на абонентском участке доступа. Работа в новых, более высоких диапазонах частот позволит использовать узкие диаграммы направленности как на передающей, так и принимающей сторонах, что положительно скажется на уровне помех и позволит динамически наращивать емкость сотовых сетей связи 5G. Однако, такие системы связи будут значительно сильнее ограничены в радиусе покрытия одной базовой станцией (БС), а также сильно подвержены влиянию атмосферных эффектов,

таких как молекулярная абсорбция и дополнительное ослабление сигнала, вызванное такими атмосферными явлениями, как дождь и туман.

Для того, чтобы эффективно разрабатывать механизмы управления ресурсами в сетях связи 5G, необходимы новые модели и методы анализа оценки производительности плотных развертываний сотовых сетей связи. Решение сформулированной проблемы ограничено недостатками в теоретических основах, в том числе, из-за отсутствия соответствующих моделей обслуживания и методов их анализа. Таким образом, актуальной задачей является разработка новых путей исследования вероятностно-временных характеристик (ВВХ) на основе построения моделей оценки производительности сетей связи 5G. Более того, анализ стандартов и рекомендаций международных организаций, таких как 3GPP, ETSI (англ. European Telecommunications Standards Institute), IEEE (англ. Institute of Electrical and Electronics Engineers), определил, что необходимы комплексные модели, которые наиболее адекватно описывали бы особенности методов управления доступом и механизмами резервирования ресурсов сетей 5G с учетом не только процесса обслуживания абонентов на базовых станциях, но и специфику использования беспроводного интерфейса доступа на абонентском участке.

1.1. Услуги сетей связи 5G

В настоящее время операторы сотовой связи активно тестируют возможности сетей пятого поколения, запуск которых ожидается к 2020 году. Если заглянуть в историю, можно заметить, что каждое новое поколение мобильной связи рождается с периодичностью 10 лет после появления предыдущего. Вспомним, первое поколение появилось в 80-х годах, второе в начале 90-х, третье в начале 00-х, а четвертое в 2009

году. Не трудно заметить, что сети связи 5G будут запущены именно в 2020 году.

Стандарт мобильной связи пятого поколения (англ. Fifth Generation, 5G) – новый уровень развития современных технологий, которые призваны расширить спектр возможностей доступа в Интернет через сети радиодоступа. Процедурой стандартизации сетей мобильной связи всех поколений занимается партнерский проект 3GPP. В 2017 году консорциум 3GPP официально объявила, что 5G станет официальным названием следующего поколения мобильной связи и представила новый логотип стандарта связи.

Основные услуги, для которых необходимы сети пятого поколения мобильной связи, следующие (см. Рис. 1):

- сверхнадежная межмашинная связь с низкими задержками (англ. Ultra-Reliable Low Latency Communication, URLLC);
- сверхширокополосная мобильная связь (англ. Enhanced Mobile Broadband, eMBB);
- массовая межмашинная связь (англ. Massive Machine-Type Communications, mMTC).

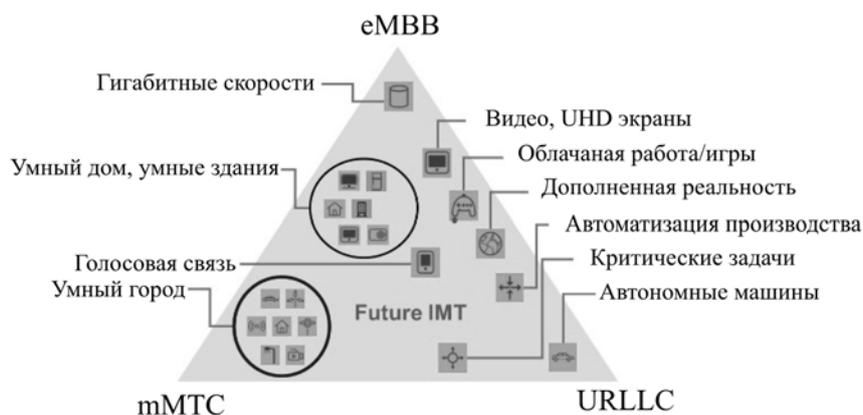


Рис. 1. Диаграмма услуг и приложений сетей связи 5G.

В ближайшие годы ожидается гораздо больше количество подключенных к сети устройств, большинство из которых будут следовать правилу «всегда онлайн». При этом низкое энергопотребление всегда будет являться очень важным параметром.



Рис. 2. Требования к сетям связи 5G.

Для технологии мобильной связи 5G определены следующие свойства (см. Рис. 2):

- рост пиковой скорости до 20 Гбит/с по нисходящей линии (от базовой станции к мобильному терминалу); и до 10 Гбит/с в обратном направлении;
- повышение практической скорости на абонента до 100 Мбит/с и более;
- увеличение спектральной эффективности в 2-5 раз. На нисходящей линии: 30 бит/с/Гц, на восходящей линии – 15 бит/с/Гц;

- улучшение энергоэффективности в 2 раза, что позволит устройствам «Интернета вещей» работать без подзарядки аккумулятора в течение 10 лет;
- снижение временной задержки на радиоинтерфейсе до 0,5 мс (для услуг сверхнадежной межмашинной связи URLLC) и до 4 мс (для услуг сверхширокополосной мобильной связи eMBB);
- увеличение скорости передвижения абонента до 500 км/ч;
- увеличение общего количества подключенных устройств до 1 млн./км².

1.2. Сети доступа «Новое Радио»

Для того, чтобы удовлетворить всё возрастающие требования к скорости передачи данных на абонентском участке доступа, для сетей связи 5G были разработаны новые технологии, объединённые под общим названием «Новое Радио», (англ. New Radio, NR). 5G NR – это новая технология радиодоступа (англ. Radio Access Technology, RAT), разработанная 3GPP для мобильных сетей 5G (пятое поколение). Спецификации и стандарты 38 серии 3GPP предоставляет технические детали, лежащие в основе NR RAT, за пределами LTE.

Исследование NR в 3GPP началось в 2015 году, и первая спецификация была доступна к концу 2017 года. Хотя процесс стандартизации 3GPP продолжается, отрасль уже приложила усилия по внедрению инфраструктуры, соответствующей проекту стандарта, ожидая, что первый масштабный коммерческий запуск 5G NR произойдет в 2020-2022 годах.

Разработка 5G NR началась практически «с нуля», с учётом высоких требований к сетям 5G (см. Рис. 2) и с использованием лучших современных технологий. Следовательно, в

5G NR будут внедрены новейшие технологии модуляции и радиодоступа, которые смогут обеспечить высокую скорость передачи данных и увеличится срок службы аккумуляторных батарей пользовательских устройств 5G.

Отметим важные свойства радиодоступа 5G NR:

- это подключение новых диапазонов спектра от 2,5 до 40 ГГц;
- улучшенная технология мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов OFDM (англ. Orthogonal Frequency Division Multiplexing);
- разработка технологии для формирования направлений лучей (англ. Beamforming), что предоставляет возможность распределить радиоволны от базовой станции к конкретным пользовательским устройствам без возникновения помех для связи;
- улучшенные антенны MIMO (англ. Multiple Input Multiple Output) – это метод пространственного кодирования сигнала, который позволяет расширить полосу пропускания канала. В сетях 5G этот метод был значительно усовершенствован и оптимизирован;
- разработка технологии совместного использования спектра (англ. Spectrum sharing) для эффективного управления радиоресурсами сети;
- унифицированное межчастотное взаимодействие (англ. Unified design across frequencies) для обеспечения надежного взаимодействия при переходе канала из одной частоты на другую при возникновении хэндовера между базовыми станциями сетей 5G;
- разработка сот с малым покрытием (Small cells). Технология 5G сможет обеспечить эффективное координирование их работой, перераспределяя нагрузку между антеннами.

1.3. Характеристики обслуживания

В секторе стандартизации Международного союза электросвязи ИТУ-Т (англ. International Telecommunication Union – Telecommunication sector) подготовлены документы с рекомендацией требований по предоставлению услуг в телекоммуникации. На основе таких документов, для анализа качества в сетях 5G принято использовать три уровня оценки. На уровне обычного пользователя качество работы сети оценивается на основе восприятия человеком определённого вида информации. На уровне качества услуги – это схемы модуляции, скорость передачи данных, и т.д. На транспортном уровне проводится анализ качества по доле потери данных, задержки и другие. В этой связи на каждом из уровней рекомендованы свои критерии оценки качества: показатели качества восприятия QoE (англ. Quality of Experience), показатели качества обслуживания QoS (англ. Quality of Service) и показатели качества функционирования сети NP (англ. Network Performance).

Далее определим по каким критериям определяются уровни качества. QoE складывается из общей положительной оценки использования прикладных программ или услуги конечным пользователем. На финальный результат QoE влияет слаженность механизмов работы всех параметров и элементов сети, к этому списку относятся терминалы, клиентское оборудование, инфраструктура сервисов, время ожидания пользователя, получающий услугу, нельзя также пренебречь состоянием слуха и зрения абонента. В итоге, оценка показателей качества восприятия определяется эффектом, исходящим от конечного потребителя.

Совокупность показателей качества услуги в сетях определяют QoS. К ним относят скорость передачи данных, задержки в процессе передачи, числом потерянных пакетов и т.д. Для оценки качества функционирования сети NP используют параметры, которые устанавливаются оператором сети и

в дальнейшем могут применены для построения, эксплуатации и технического обслуживания сети. Производительность оборудования и действия пользователя на эти показатели никак не влияют, все зависит только от используемой сетевой технологии.

Поведём итоги. Важно отметить, что необходимо комплексное решение для анализа качества показателей эффективности беспроводной сети, такие решения могут быть разработаны для новых моделей, методов исследования и расчета ВВХ. Помимо перечисленных параметров на этапе рождения новой технологии необходимо определить ее основные характеристики функционирования. К таким характеристикам относятся уровень интерференции, отношение сигнал-помеха (англ. Signal-to-Interference Ratio, SIR) и скорость каналов связи при заданной плотности развертывания сетей 5G NR. Последующие главы посвящены оценке именно этих характеристик.

2. Модели компонентов системы связи 5G «Новое Радио»

В данной главе определим модели компонентов систем связи миллиметрового диапазона частот для анализа систем в двух- и трехмерных пространствах. К ним относятся модели расположения узлов, модели антенн и их диаграмм направленности, модели распространения сигнала и модели блокировки.

2.1. Модели в двумерном пространстве

Модели расположения узлов

Рассмотрим модель расположения узлов сети доступа, представленную на Рис. 3. Модель включает в себя приемник,

расположенный в некоторой точке, например, в начале координат. Указанный приемник находится в случайном поле интерферирующих узлов. Для определения местоположения интерферирующих узлов используем Пуассоновский точечный процесс (англ. Poisson Point Process, PPP) с некоторой фиксированной интенсивностью λ . Предположим, что ориентация диаграмм направленности равномерно распределена в интервале $[0; 2\pi)$. Каждый из узлов, физически, представляет собой проекцию тела человека (например, пользователя сети с мобильным устройством), представленном цилиндром с радиусом r_B . На плоскости вокруг интересующего нас приемника опишем круг радиусом R . Этот радиус рассчитан таким образом, что интерференция от узлов вне рассматриваемого круга меньше порога теплового шума.

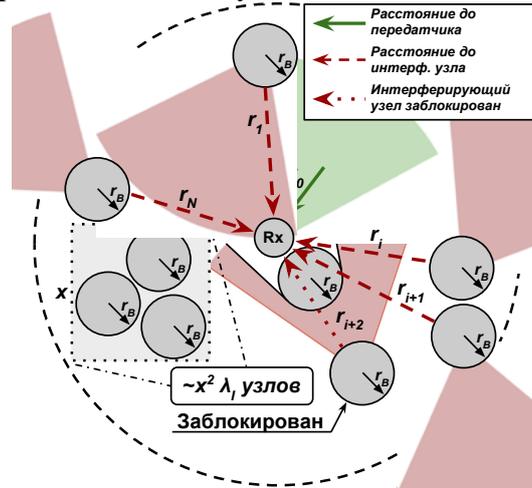


Рис. 3. Модель сети доступа.

Модели диаграмм направленности антенных решеток

В качестве моделей диаграмм направленности антенных решеток на приемнике и передатчике рассмотрим модели,

проиллюстрированные на Рис. 4 и Рис. 5. Диаграмма направленности первого типа представлена одним главным лепестком, коэффициент усиления которого на волновом фронте постоянен и равен G . Диаграмма направленности второго типа представлена главным лепестком, коэффициент усиления на волновом фронте которого постоянен и равен G_1 , а также множеством боковых лепестков, коэффициент усиления которых постоянен и равен G_2 .

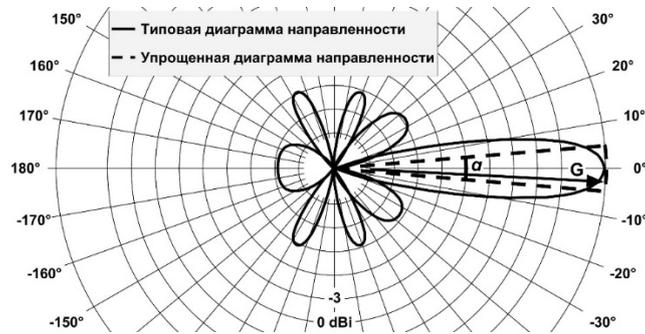


Рис. 4. Упрощенная диаграмма направленности «Тип 1».

Для того, чтобы использовать предложенные диаграммы направленности необходимо определить коэффициенты усиления G , G_1 и G_2 как функции от угла диаграммы направленности, α . Отметим, что диаграмма направленности первого типа концентрирует всю излучаемую мощность в главном лепестке.

Это указывает на то, что коэффициент усиления G увеличивается обратно пропорционально площади сегмента сферы, S , который можно определить по следующей формуле

$$S = 2\pi r^2 [1 - \cos(\alpha/2)] \quad (2.1)$$

Учитывая ослабление мощности в процессе распространения, искомый коэффициент усиления главного лепестка определяется следующим образом

$$G = 2 / (1 - \cos(\alpha / 2)). \quad (2.2)$$

Вводя некоторый коэффициент потери на боковые лепестки для диаграммы направленности второго типа могут быть получены следующие коэффициенты усиления

$$\begin{cases} G_1 = 2[(1 - \cos(\alpha / 2)) + k(1 + \cos(\alpha / 2))]^{-1} \\ G_2 = kG_1 \end{cases}, \quad (2.3)$$

где k – коэффициент потери на боковые лепестки.



Рис. 5. Упрощенная диаграмма направленности «Тип 2».

Коэффициенты G_{Tx} и G_{Rx} могут быть получены как функции от угла диаграммы направленности с использованием формул для G , G_1 и G_2 , приведенных выше.

Коэффициенты усиления основного лепестка антенны, а также угол направленности основного лепестка могут быть рассчитаны из параметров используемых антенных решеток. В частности, для линейных антенных решеток, часто используемых на практике значения усиления, а также угол направленности приведены в Таблица 1 и Таблица 2, соответственно.

Таблица 1. Коэффициенты усиления основного лепестка антенны.

Решетка	Усиление	Усиление, дБ
64x1	57.51	17.59
32x1	28.76	14.58
16x1	14.38	11.57
8x1	7.20	8.57
4x1	3.61	5.57

Таблица 2. Угол направленности основного лепестка антенны.

Решетка	Вычисление	Аппроксимация
64x1	1.585	1.594
32x1	3.171	3.188
16x1	6.345	6.375
8x1	12.71	12.75

Модель распространения сигнала

Из-за высокого уровня молекулярного поглощения модель распространения сигнала в диапазоне частот в миллиметрах отличается от моделей, используемых в диапазонах дециметровых и сантиметровых волн (например, используемых в Wi-Fi, LTE и других технологиях, которые работают в этой полосе 2-6 ГГц). Количество помех на приемнике I можно определить следующим образом:

$$I = A \sum_{i=1}^N r_i^{-2} e^{-Kr_i}, \quad (2.4)$$

где N – число узлов, осуществляющих вклад в помехи на приемнике, r_i – расстояние между интерферирующим передатчиком до приемника, K является коэффициентом абсорбции, A – константа, которая учитывает влияние рабочей частоты, коэффициента усиления антенны и мощности передачи в соответствии со следующим выражением:

$$A = P_{Tx} G_{Tx} G_{Rx} \frac{c^2}{16\pi^2 f^2} = H G_{Tx} G_{Rx}, \quad (2.5)$$

где P_{Tx} – мощность передачи, G_{Tx} – коэффициент усиления антенны на передатчике, G_{Rx} – коэффициент усиления антенны на приемнике, c – скорость света, f – рабочая частота, а H – константа, равная

$$H = P_{Tx} \frac{c^2}{16\pi^2 f^2}. \quad (2.6)$$

Также отметим, что явление молекулярного поглощения является селективным и может быть опущено в некоторых частотных диапазонах. В частности, ослабление сигнала из-за молекулярного поглощения показано на Рис. 6. Отметим, что основными эффектами являются кислород и водяной пар. Однако, в начале миллиметрового спектра на частотах до 60 ГГц ослабление не является значительным.

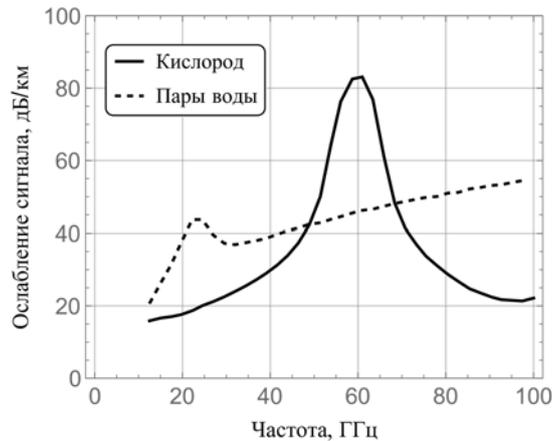


Рис. 6. Ослабление сигнала молекулярной абсорбцией в канале.

В тех случаях, когда ослабление сигнала незначительно можно использовать стандартизированные 3GPP в документе TR.38901 для частот от 6 до 100 ГГц. Одной из часто используемых моделей является модель Urban Micro (UMi), которая определяет потери распространения в децибелах следующим образом:

$$L_{dB}(x) = 32.4 + 21.0 \log_{10}(x) + 20 \log_{10}(f_c), \quad (2.7)$$

где x – расстояние между взаимодействующими устройствами, измеряемый в километрах, а f_c – несущая частота, выраженная в ГГц.

Отметим, что в математических исследованиях удобно использовать линейную модель распространения, которую

можно представить в следующем виде: $P_R(r) = Ar^{-\zeta}$, где ζ – коэффициент потери мощности (экспонента затухания), A – некоторый множитель, учитывающий мощность передачи, рабочую частоту и коэффициенты усиления антенны, а r – расстояние между взаимодействующими устройствами. Константы A и ζ могут быть получены следующим образом:

$$A = 10^{-2 \log_{10} f_c + 3.24}, \quad \zeta = 2.1. \quad (2.8)$$

Модели блокировки

При работе в миллиметровом диапазоне частот, человеческое тело блокирует прохождение миллиметрового сигнала. Другими словами, ослабление сигнала при прохождении сквозь тело настолько велико, что вклад заблокированного сигнала в интерференцию на приемнике не имеет значения.

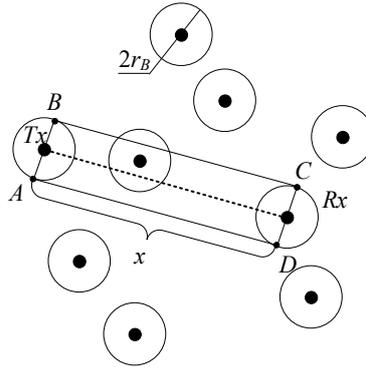


Рис. 7. Иллюстрация блокировки в двухмерном сценарии.

Отметим, что в поле интерферирующих устройств сами абоненты являются блокираторами сигнала. Определим зону блокировки LoS (англ. Line of Sight), как показано на Рис. 7. Отметим, что наличие хотя бы одного блокирующего объекта в данной зоне блокирует путь прямой видимости LoS. Так как вероятность отсутствия событий в Пуассоновском потоке пропорциональна площади зоны блокировки, запишем

$$p_B(x) = 1 - e^{-\lambda_B 2r_B x}, \quad (2.9)$$

где r_B является радиусом блокатора.

Также важно отметить, что блокаторы в зоне покрытия приемника также могут блокировать распространение помех. При моделировании местоположения блокаторов с использованием процесса Пуассона с интенсивностью λ_B предыдущая формула остается применимой, если λ_I заменяется на $(\lambda_I + \lambda_B)$, где λ_B является интенсивностью блокаторов.

2.1. Модели в трехмерном пространстве

Модели расположения узлов

Рассмотрим модель сети схематически показана на Рис. 8. Предполагается, что расположение узлов R_x , обозначаемых через R_i , $i=0,1,\dots$, моделируется Пуассоновским пространственным процессом с интенсивностью λ . Каждый приемник назначен соответствующему передатчику, обозначаемому через T_i . Положения передатчиков равномерно распределены в круге с радиусом R_T , центрированным в точке распределения соответствующего приемника. Предполагается, что все передатчики используют один и тот же частотный канал, что является причиной помех для целевого приемника. Высоты передатчиков и приемников H_T и H_R имеют экспоненциальное распределение с параметрами μ_T и μ_R . Это отражает возможность того, что ПУ находится не только в руке пользователя, но и по всему телу. Передатчик и приемник относятся к физическим объектам, представленным в виде цилиндров с радиусом r_B и высотой H_B , и имеют экспоненциальное распределение с параметром μ_B .

Среди пар передатчик-приемник мы произвольно выбираем целевую пару (R_0, T_0) и ограничиваем область помех вокруг целевого приемника кругом радиуса R_L . Помехи, создава-

емые передатчиками, расположенными вне круга, будут считаться незначительными, то есть ниже уровня шума. R_l рассчитывается на основе модели распространения сигнала, мощности передачи и направленности антенны. На Рис. 8 зеленые линии представляют взаимодействие целевой пары, в то время как другие цилиндры соответствуют конкурирующим объектам связи, передача сигнала которых может влиять на целевой приемник.

Также предположим, что сами целевые объекты могут перекрывать линию прямой видимости между мешающим передатчиком и приемным устройством. Помехи от конкретного передатчика могут воздействовать на целевой приемник только в том случае, если его антенна ориентирована в направлении целевого приемника и не заблокирована.

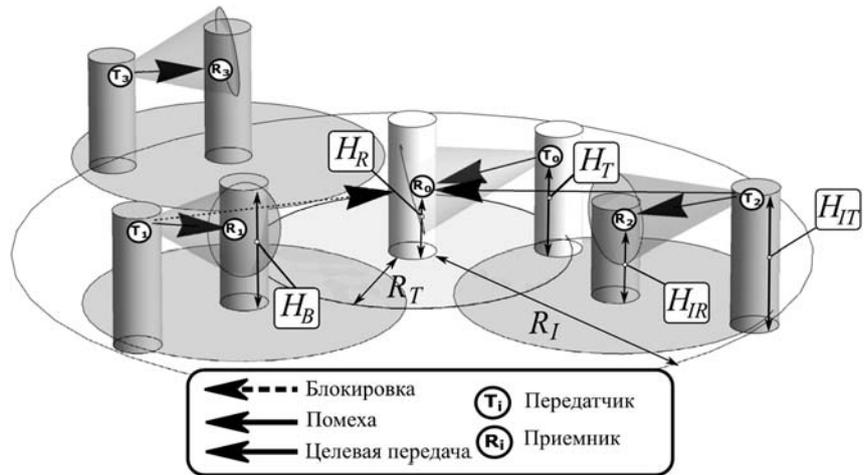


Рис. 8. Модель системы в трехмерном пространстве.

На Рис. 8. красная линия является примером взаимодействия мешающей пары, которая влияет на целевой приемник, в то время как синяя линия соответствует паре передатчик-приемник, линия прямой видимости которой заблокирована.

Модели распространения

Определим ζ как показатель потери мощности, A , как некоторый множитель учитывающий мощность передачи, рабочую частоту и усиление антенны, и r как расстояние между передатчиком и приемником. Таким образом, принятую мощность можно определить следующей формулой: $P_R(r) = Ar^{-\zeta}$.

Модели диаграмм направленности антенн

Предположим, что антенна моделируется пирамидальной зоной с вертикальным и горизонтальными углами, $\alpha_{T,V}$ и $\alpha_{T,H}$, соответственно, как показано на Рис. 9. Также мы предполагаем постоянную мощность основного лепестка на некотором заданном расстоянии между передатчиком и приемником, а также отсутствие боковых и заднего лепестков. Очевидно, что данная модель является абстракцией, которая учитывает основные свойства и является удобной для математического моделирования систем связи.

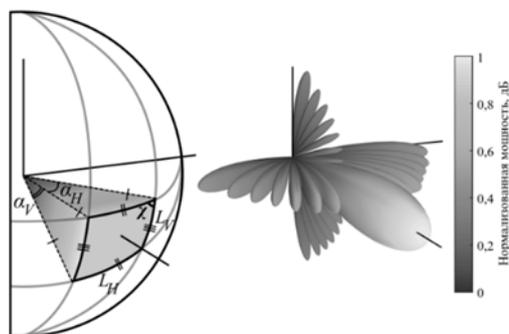


Рис. 9. Модель излучения антенны в трехмерном пространстве.

На Рис. 9 проиллюстрирован волновой фронт антенны, соответствующий определенным направленностям. Напомним, что для параметризации антенны необходимо определить ее коэффициент усиления, A , соответствующий этим направленностям. Используя сферический закон косинусов, можно записать $\cos\theta$ следующим образом:

$$\begin{aligned}\cos \chi &= \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{L_H}{2}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{L_H}{2}\right)\cos(L_V)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{L_H}{2}\right)\sin(L_V)} = \\ &= \tan\left(\frac{L_H}{2}\right)\tan\left(\frac{L_V}{2}\right).\end{aligned}\quad (2.10)$$

Избыток сферического прямоугольника может быть записан как $(\rho - \pi/2)$. Используя это наблюдение

$$\cos\left(\rho - \frac{\pi}{2}\right) = \tan\left(\frac{L_H}{2}\right)\tan\left(\frac{L_V}{2}\right), \quad (2.11)$$

где L_H, L_V являются геодезическими линиями.

Исходя из указанного выше найдем площадь сферического прямоугольника через

$$S_A = 4 \arcsin\left(\tan\frac{\alpha_V}{2}\tan\frac{\alpha_H}{2}\right). \quad (2.12)$$

Напомним, что плотность мощности энергии на волновом фронте определяется как $P_R(r) = Ar^{-\zeta}$. Площадь волнового фронта, соответствующее углам α_V и α_H можно записать следующим образом

$$G(\alpha_V, \alpha_H) = \frac{4\pi}{S_A} = \frac{\pi}{\arcsin\left(\tan\frac{\alpha_V}{2}\tan\frac{\alpha_H}{2}\right)}, \quad (2.13)$$

что в итоге дает $A = P_T G(\alpha_{T,V}, \alpha_{T,H}) G(\alpha_{R,V}, \alpha_{R,H})$.

Наконец, принимаемая мощность на расстоянии r имеет вид:

$$P_R(r) = \frac{\left[\arcsin\left(\tan\frac{\alpha_{V,R}}{2}\tan\frac{\alpha_{H,R}}{2}\right)\right]^{-1}}{\arcsin\left(\tan\frac{\alpha_{V,T}}{2}\tan\frac{\alpha_{H,T}}{2}\right)} P_T \pi^2 r^{-\zeta}. \quad (2.14)$$

Модели блокировки

В этом сценарии одна миллиметровая точка доступа и абонент находятся на расстоянии x и расположены на высоте h_T и h_R , соответственно. Статические блокирующие объекты формируют Пуассоновский точечный процесс с плотностью λ_B . Предполагается, что данными объектами являются человеческие тела, моделируемые в виде цилиндров с высотой h_B и радиусом основания r_B .

Определим зону блокировки LoS как прямоугольник со сторонами $2r_B$ и длиной $d(x)$, как показано на Рис. 10. Наличие хотя бы одного блокирующего объекта в данной зоне вызывает блокировку LoS, если высота данного объекта выше, чем линия LoS в данной точке.

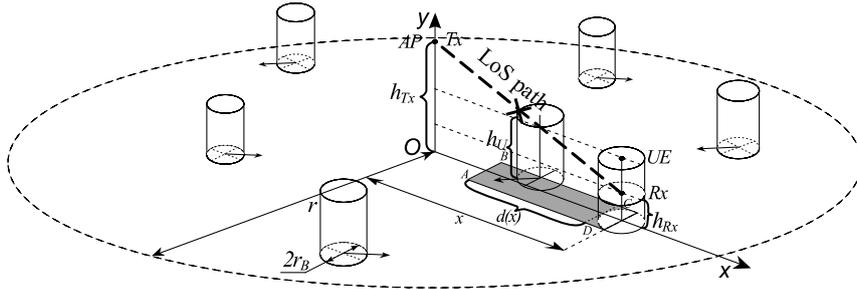


Рис. 10. Иллюстрация блокировки в трехмерном сценарии.

Используя свойство Пуассоновских процессов, можно получить вероятность отсутствия блокировки p_{nB} , как вероятность отсутствия блокирующих объектов в LoS. Находим

$$p_{nB}(x) = \exp(-\lambda_B 2r_B d(x)) = \exp\left(-\lambda_B 2r_B \left[x \frac{h_B - h_U}{h_A - h_U} + r_B \right]\right). \quad (2.14)$$

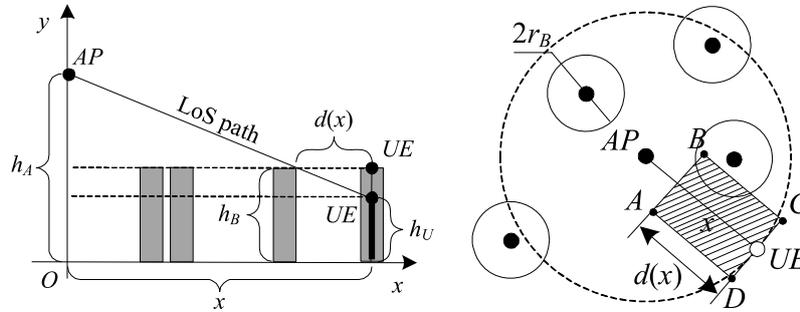


Рис. 11. Геометрия блокировки в трехмерном сценарии.

Характеристики производительности сети

К основным показателям производительности беспроводных сетей связи можно отнести уровень помехи и отношение сигнала к помехе (signal-to-interference, SIR). Используя приведенные выше модели эти характеристики можно записать следующим образом:

$$I = A \sum_{i=1}^N d_i^{-\zeta}, S = \frac{A d_0^{-\zeta}}{A \sum_{i=1}^N d_i^{-\zeta}} = \frac{d_0^{-\zeta}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-\zeta}}, \quad (2.15)$$

где N - пуассоновская СВ со средним значением $\lambda \pi R_l^2$, а d_i , $i=1,2,\dots,N$, - расстояния между целевым приемником и интерферирующими узлами.

2.3. Упражнения

Задание 1.

Рассчитайте усиление в направлении передачи, G , для фазовой антенной решетки с 32, 16 и 8 горизонтальными элементами и 1 вертикальным элементом для двухмерной и трехмерной антенны. Используйте таблицы для определения

угла направленности. Сравните полученные результаты между собой и с результатами, приведенными в Таблица 1.

Задание 2.

Рассчитайте вероятность блокировки в двухмерной и трехмерной модели для высоты базовой станции 10 м, высоты приемника 1.4 м, высоты человека 1.7 м. В случае двухмерного сценария высоту базовой станции взять равной высоте приемника. Построить график зависимости вероятностей от интенсивности блокирующих объектов, оценить и сравнить полученные результаты.

3. Оценка характеристик сетей 5G «Новое Радио»

В этой главе представлена общая методология оценки характеристик сетей связи 5G NR. Вводится математический аппарат функционального преобразования случайных величин, лежащий в основе данной методологии. Далее, представлены численные примеры.

3.1. Методология оценки характеристик

Помеха и отношение сигнал к помехе и шуму (Signal-to-interference plus noise ratio, SINR) являются одними из важнейших показателей производительности беспроводных сетей связи. Они также остаются актуальными в контексте сотовых сетей связи 5G NR. Формально отношение SINR можно записать через

$$SINR = \frac{gcl^{-\alpha}}{I + \sigma^2}, \quad (3.1)$$

где g – мощность рассматриваемого сигнала; l – расстояние между передатчиком и приемником, c и α – коэффициенты затухания радиосигнала, I – суммарная мощность интерферирующих сигналов, а σ^2 – мощность шума.

Кроме того, чтобы учесть эффекты замирания, необходимо умножить на соответствующую случайную величину. Для частотно-избирательных широкополосных каналов необходимо дополнительно интегрировать их по всей полосе частотного канала. Затем, применяя теорему Шеннона, SINR можно использовать для получения пропускной способности мобильных пользователей с учетом интерференции. Согласно (3.1), SINR является функцией условий распространения сигнала между интересующим и интерферирующими устройствами. При этом явно или неявно предполагается, что SINR является функцией расстояний $d_i, i = \overline{1, N}$ между устройствами.

По этой причине при оценке производительности сотовых систем основной задачей является выявление неопределенности в местоположении пользователя. Действительно, из-за мобильного характера современных гетерогенных сетей, расстояния $d_i, i = \overline{1, N}$ не являются фиксированными, а могут изменяться динамически и непредсказуемо. Поэтому текущая позиция пользователя относительно его обслуживающей базовой станции может часто меняться, и, таким образом, задача оценки производительности современных сотовых систем становится вероятностной задачей, использующей методы из стохастической геометрии.

3.2. Функции случайных величин

Рассмотрим сценарий, в котором есть два беспроводных передатчика Tx_0 и Tx_1 , находящиеся на определенном расстоянии друг от друга, характеризуемым случайной величиной (с.в) U с плотностью распределения $f_U(u)$. В свою очередь, данное расстояние может зависеть от случайного положения рассматриваемых передатчиков. Положения соответствующих приемников Rx_0 и Rx_1 равномерно распределены в кругах фиксированных радиусов вокруг Tx_0 и Tx_1 . В дальнейшем

логическое соответствие между передатчиком и приемником будет называться кластером. В данном контексте Tx_1 рассматривается, как ближайший источник помех для Rx_0 , тогда, как плотность распределения расстояния от Tx_0 до Rx_0 представляет собой случайную величину с плотностью $f_L(l)$.

Без потери общности координаты Tx_0 и Tx_1 выровнены относительно горизонтальной оси. Для полного определения рассматриваемого интерференционного пути. Предположим, что $\gamma = \angle Tx_1Tx_0Rx_0$ распределен согласно равномерному распределению. Однако, может быть рассмотрено любое другое распределение. Все три с.в U , L , и γ в свою очередь, предполагаются взаимно независимыми.

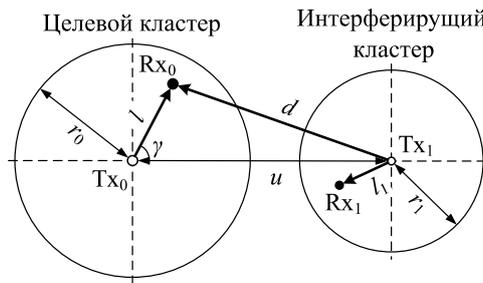


Рис. 12. Модель системы, состоящей из двух взаимодействующих пар устройств.

Частный случай

В качестве примера, рассмотрим частный случай на Рис. 12. Расстояние от фиксированной точки за пределами круга и случайной точки, равномерно распределенной внутри круга, определяется с использованием геометрической интерпретации вероятности, то есть отношения между конкретной областью и общей площадью. В этом случае решение задается площадью пересечения двух дисков с коэффициентом πr^2 .

Для круга радиуса r плотность распределения расстояния между точкой, равномерно распределенной внутри этого

круга, и неподвижной точкой, расположенной на расстоянии $r_1 + r$ от центра круга, составляет

$$g(\rho) = \frac{2\rho}{\pi r^2} \arccos\left(\frac{r_1}{\rho} + \frac{\rho^2 - r_1^2}{2\rho(r+r_1)}\right), \quad (3.2)$$

где $r_1 \leq \rho \leq r_1 + 2r$.

Таким образом, плотность распределения расстояния между двумя точками, где r_1 – СВ с плотностью $f_{r_1}(x)$, определяется как:

$$g_2(\rho) = \int_r^\infty \frac{2\rho}{\pi r^2} \arccos\left(\frac{x}{\rho} + \frac{\rho^2 - x^2}{2\rho(r+x)}\right) f_{r_1}(x) dx. \quad (3.3)$$

Метод, на основе которого получена (3.3) сложно расширить на случай произвольного вида распределения расстояния от центра окружности до рассматриваемой точки.

Общий случай

Теперь рассмотрим общий случай, когда треугольник определяется распределением его двух сторон и углом между ними. Нас интересует распределение расстояния между передатчиком Tx_1 , приемником Rx_0 для заданных распределений расстояний L , U и угла γ . При этом все три с.в независимы друг от друга. Кроме того, γ равномерно распределен между 0 и π , что позволяет нам извлечь выгоду из симметрии задачи. Общая методология, которая приводится далее для нахождения искомого распределения расстояния, основана на последовательном применении функциональных преобразований случайных величин, которые подробно описаны в [1].

Введем обозначения

$$\xi_1 = L, \xi_2 = U, \xi_3 = \gamma, \eta_1 = D, \quad (3.4)$$

с плотностями распределений

$$w_{\xi_1, \xi_2, \xi_3}(x) = f_{L,U,\gamma}(x), W_{\eta_1}(y_1) = f_D(y_1), \quad (3.5)$$

где $f_{L,U,\gamma}(x_1, x_2, x_3)$ – это совместная плотность СВ L , U и γ , а $f_D(y_1)$ – искомое распределение.

Из-за попарной независимости L , U и γ получаем

$$f_{L,U,\gamma}(x) = f_L(x_1) f_U(x_2) f_\gamma(x_3). \quad (3.6)$$

Применив теорему косинусов, получим функциональную зависимость

$$\eta_1 = f(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2 - 2\xi_1\xi_2\cos\xi_3}. \quad (3.7)$$

Введем две вспомогательные переменные $\eta_2 = \xi_2$ и $\eta_3 = \xi_3$, в результате чего имеем

$$\begin{cases} y_1 = f(x_1, x_2, x_3) = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 - 2x_1x_2\cos x_3}, \\ y_2 = x_2, \\ y_3 = x_3. \end{cases} \quad (3.8)$$

Тогда искомое распределение D может быть получено применением следующего выражения.

$$f_D(y_1) = \sum_{j=1,2} \int_{Y_j} w_{\xi_1, \xi_2, \xi_3}(\phi_j(y_1, y_2, y_3), y_2, y_3) \left| \frac{\partial \phi_j(y_1, y_2, y_3)}{\partial y_2} \right| dy_3, \quad (3.9)$$

где ϕ_j – это обратная функция правой части выражения для y_1 из (3.8) с двумя ветвями обратного преобразования:

$$\begin{cases} \phi_1(y_1, y_2, y_3) = y_2 \cos y_3 + \sqrt{y_1^2 - y_2^2 + y_2^2 \cos^2 y_3}, \\ \phi_2(y_1, y_2, y_3) = y_2 \cos y_3 - \sqrt{y_1^2 - y_2^2 + y_2^2 \cos^2 y_3}. \end{cases} \quad (3.10)$$

Область интегрирования Y_j из (3.9) получается путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \phi_j(y_1, y_2, y_3) \geq 0, i = 1, 2 \\ y_1 \geq 0, \\ y_2 \geq 0, \\ 0 \leq y_3 \leq \pi. \end{cases} \quad (3.11)$$

Легко показать, что в результате получаются области вида

$$\begin{aligned} Y_1^1 &= \begin{cases} 0 \leq y_2 \leq y_1, \\ 0 \leq y_3 \leq \pi, \end{cases} \\ Y_1^2 &= \begin{cases} y_2 \geq y_1, \\ 0 \leq y_3 \leq \arccos \sqrt{\frac{y_2^2 - y_1^2}{y_2^2}}, \end{cases} \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$Y_2 = \begin{cases} y_2 \geq y_1, \\ 0 \leq y_3 \leq \arccos \sqrt{\frac{y_2^2 - y_1^2}{y_2^2}}, \end{cases}$$

где $Y_1 = Y_1^1 \cup Y_1^2$.

Таким образом, финальное выражение для распределения длины D имеет вид

$$f_D(y_1) = \sum_{j=1,2} \int_Y f_L(\phi_j(y_1, y_2, y_3), y_2, y_3) f_U(y_2) \frac{1}{\pi \sqrt{y_1^2 - y_2^2 + y_2^2 \cos^2 y_3}} dy_3 dy_2 \quad (3.13)$$

Важно отметить, что даже для данной частной задачи решение в явном виде (3.13) можно получить только для некоторых частных распределений. Тем не менее, для получения желаемого результата всегда можно использовать численное интегрирование.

Но, как следует из (3.13), D на самом деле зависит от L , и поэтому для расчета числовых характеристик SIR, необходимо использовать совместное распределение с.в L и D . Следуя методу, описанному выше, полученное выражение для искомого совместного распределения становится:

$$W_{L,D}(y_1, y_2) = \sum_{j=1,2} \int_{Y_{3,j}} \frac{f_L(y_1) f_U(\phi_j(y_1, y_2, y_3)) f_Y(y_3) y_2}{\sqrt{y_2^2 - y_1^2 + y_1^2 \cos^2 y_3}} dy_3, \quad (3.14)$$

где ϕ_j – обратная функция (3.8) по отношению к y_2 ,

$$\begin{cases} \phi_1(y_1, y_2, y_3) = y_1 \cos y_3 + \sqrt{y_2^2 - y_1^2 + y_1^2 \cos^2 y_3}, \\ \phi_2(y_1, y_2, y_3) = y_1 \cos y_3 - \sqrt{y_2^2 - y_1^2 + y_1^2 \cos^2 y_3}, \end{cases} \quad (3.15)$$

а $Y_{3,j}$ – пределы интегрирования для y_3 :

$$Y_{3,1} = Y_{3,1}^1 \cup Y_{3,1}^2, \quad Y_{3,1}^1 = \begin{cases} 0 \leq y_2 \leq y_1, \\ 0 \leq y_3 \leq \frac{1}{2} \arccos \frac{y_1^2 - 2y_2^2}{y_1^2}, \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned}
Y_{3,1}^2 &= \begin{cases} y_2 \geq y_1, \\ 0 \leq y_3 \leq \pi, \end{cases} \\
Y_2 &= \begin{cases} 0 \leq y_2 \leq y_1, \\ 0 \leq y_3 \leq \frac{1}{2} \arccos \frac{y_1^2 - 2y_2^2}{y_1^2}. \end{cases}
\end{aligned}$$

Численный пример

В качестве примера рассмотрим следующий типичный D2D (англ. Device-to-Device) сценарий. Местоположения передатчиков определяются точечным процессом Пуассона с интенсивностью λ . Соответствующие им приемники распределены равномерно внутри единичного круга вокруг передатчика. При выборе случайного передатчика нас интересует распределение расстояния до приемников, на которые он будет оказывать интерференцию.

Распределения участвующих переменных известны и имеют вид

$$\begin{aligned}
f_L(l) &= \frac{2l}{r_0^2}, 0 \leq l \leq r_0, \\
f_U(u) &= 2\pi\lambda u e^{\pi\lambda r_0^2 - \pi\lambda u^2}, u \geq r_0, \lambda > 0.
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Рассматривая единичную окружность, то есть $r_0 = 1$, и применяя описанный выше подход, сразу же решаем целевую задачу.

Форма результирующего распределения и его реакция на различные значения λ приведены на Рис. 13. Здесь предполагается что расстояния безразмерны с целью обобщения полученных результатов. Например, можно предположить, что это значение измеряется в метрах или километрах. Таким образом, мы наблюдаем интересный эффект – перекося формы направо.

Рассматриваемое распределение не ограничено, но в то же время характеризуется коротким хвостом. Кроме того, мы

замечаем, что это распределение не похоже ни на одно из ранее известных непрерывных распределений.

Данные результаты можно применить к анализу SINR, который является основным показателем качества в беспроводных сетях. Для рассматриваемого D2D сценария с ограничениями по помехам, можно оценить среднее значение SIR, то есть SINR в случае незначительного шума. Возьмем данные, приближенные реальным, при которых рассматриваемый приемник распределяется равномерно внутри круга радиусом 30 метров, а интерферирующий передатчик находится вне этого круга.

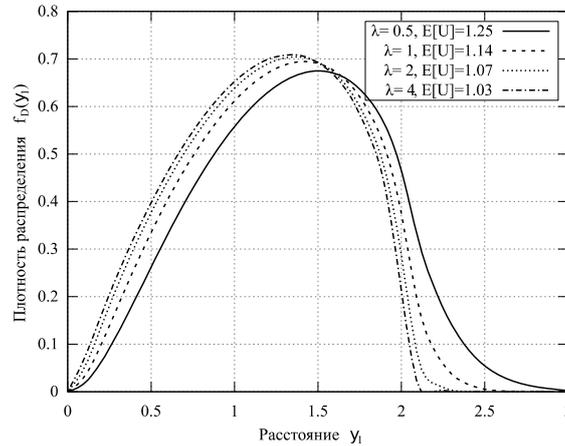


Рис. 13. Распределение интерференционного расстояния.

Также возьмем модель затухания радиосигнала пропорциональную расстоянию с показателем распространения $\alpha = 2.61116$ и $c = 0.000201944$. При этом предполагается, что передатчики излучают с единичной мощностью.

Применив (3.14) для расчета n -момента величины SIR, получим

$$E[SIR^n] = \int_{0 \leq y_1 \leq r_0} \int_{y_2 \geq 0} \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^{n\alpha} W_{L,D}(y_1, y_2) dy_2 dy_1. \quad (3.18)$$

Так на Рис. 14 приведены математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение SIR в зависимости от расстояния до источника помех.

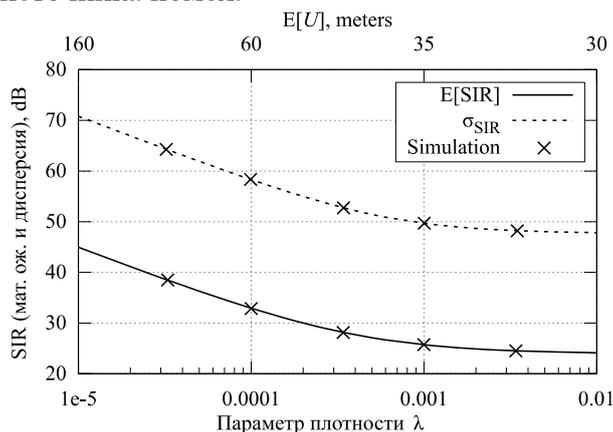


Рис. 14. Численные характеристики SIR.

3.3. Модели прямого взаимодействия устройств

В скором времени в сетях 5G ожидается активное участие новых технологий, большинство которых могут даже занять роль сетевой инфраструктуры в обеспечении беспроводной связи. К примеру, терминалы пользователя будут применять для передачи данных технологию прямого взаимодействия D2D с поддержкой приложений ретрансляции различных типов медиа-услуг и т.д. Важность применения подобных технологий крайне велика в случаях возникновения природных катаклизмов и техногенных катастроф, когда рабочие узлы сотовой связи частично или полностью выведены из строя. И в течение всего времени при проведении восстановительных работ D2D-устройства позволят поддержать рабочее состояние сети. Предположительно, что технологии D2D могут стать полезной платформой, чтоб избежать перезагрузки участков беспроводной сети с огромным числом мобильных

терминалов, например, на массовых мероприятиях, стадионах, в крупных торгово-развлекательных центрах и т.д. В результате продолжающегося уплотнения сети абонентские терминалы усовершенствуют свои возможности, тогда как число базовых станций становятся все меньше.

Многим известно, что учет влияния интерференции на качество предоставления услуг является важнейшим фактором в сетях беспроводной связи. Ухудшение спектральной эффективности и пропускной способности – это есть следствие возникновения интерференции, так как образуется помеха при передаче данных в беспроводном канале. Такую особенность необходимо учесть при оценке величины отношения сигнала к интерференции и шуму SINR между взаимодействующими устройствами. В методическом пособии исследована и представлена оценка воздействия интерференции с предположением, что шум равен нулю $\sigma^2 = 0$ на беспроводном канале. Поэтому результаты исследований будут изложены для величины отношения сигнал к интерференции (SIR), формула для расчета которой имеет вид $SIR = S/I$, где S интерпретируется как мощность полезного сигнала от рассматриваемого нас передатчика, I – мощность интерферирующего сигнала от других передатчиков. Затем по формуле Шеннона, рассчитав значение SIR, вычисляем спектральную эффективность и пропускную способность канала.

С помощью методов стохастической геометрии часто проводится анализ характеристик с.в. SIR, когда исследуемые объекты разбросаны на геометрической плоскости для вычисления интерференции в интересующей точке. Процедура получения формул распределения расстояния между взаимодействующими устройствами в замкнутом аналитическом виде является самым трудоемким в исследовании. В этой связи наиболее часто применяются известные модели Пуассоновского точечного процесса, в которых уже вычислены распределения расстояний до любой соседней точки.

При анализе показателей производительности в беспроводных сетях основной трудностью является неопределённость местоположения взаимодействующих устройств. Всем известно, что современные пользовательские устройства практически всегда являются мобильными и их позиции на плоскости могут динамически меняться. Поэтому инструментом для исследований часто могут быть вероятностные методы, обеспечивающие требуемые уровни QoS.

Таким образом, возможной методологией для анализа технологии D2D может являться стохастическая геометрия.

Вкратце представим модель для оценки с.в. SIR и опишем сценарий взаимодействия одного передатчика и нескольких принимающих устройств (приемники). Эти взаимодействующие устройства расположены на плоскости в пределах круга радиуса r_0 . Передатчик расположен в геометрическом центре круга, а приемники согласно равномерному закону распределены внутри этого круга, который будем называть кластером. Примером такого сценария могут быть занятия руководителем с подчиненными.

Рассмотрим одну из задач исследования с.в. SIR идентичным для сценария D2D. Предметом исследования являются прямоугольные кластеры с определенными размерами, в которых равномерно распределены D2D устройства. Далее наше внимание направим только на две соседние ячейки, в которых могут быть расположены не более одной активно взаимодействующей пары устройств. Основываясь на эту схему, для разработки математической модели применим аппарат стохастической геометрии. Этот метод позволит нам получить интегральные выражения для распределений с.в. SIR и ее ВВХ.

Обратим внимание на Рис. 15, на нем представлено типичное расположение помещений торгового центра и в одной из комнат находятся пара T_0R_0 взаимодействующих устройств, которые будем называть целевой, а другие пары

устройств T_iR_i , $i=1..7$, которые создают помеху, будем называть интерферирующими.

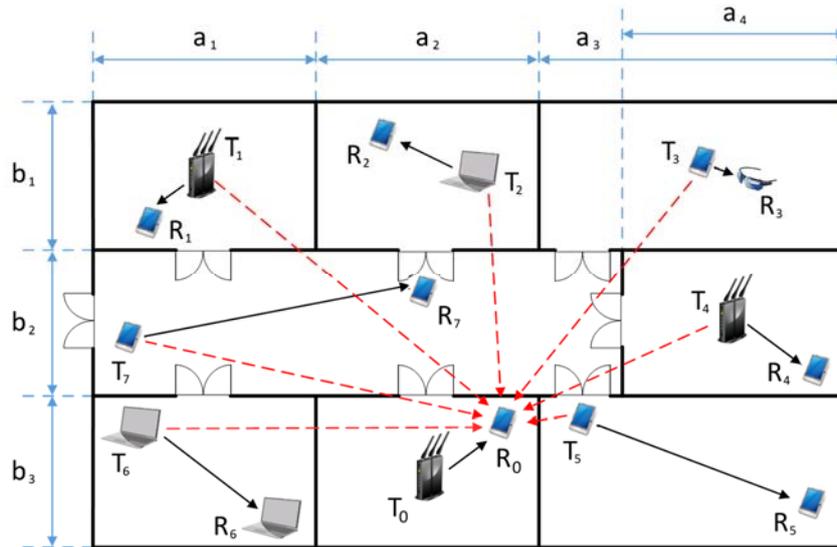


Рис. 15. Схема расположения беспроводных устройств.

Предлагаются два сценария расположения взаимодействующих устройств – это приближенные модели. В первой модели приемники расположены в геометрических центрах кластеров, а передатчики равномерно распределены в пределах соответствующих кластеров – этот сценарий будем называть *uplink*. Во втором приближении роли устройств меняются, передающие устройства зафиксированы в центрах кластеров, а приемники равномерно распределены (*download*). Эти модели будем называть восходящей (*uplink*, см. Рис. 16) и нисходящей (*download*, см. Рис. 17) линии связи соответственно. На рисунках сплошными линиями указаны передача данных между целевыми парами, пунктирные линии показывают интерферирующий сигнал.

Чтобы упростить процедуру вывода формул для анализа интерференции, исследуем среду распространения сигнала в квадратных кластерах.

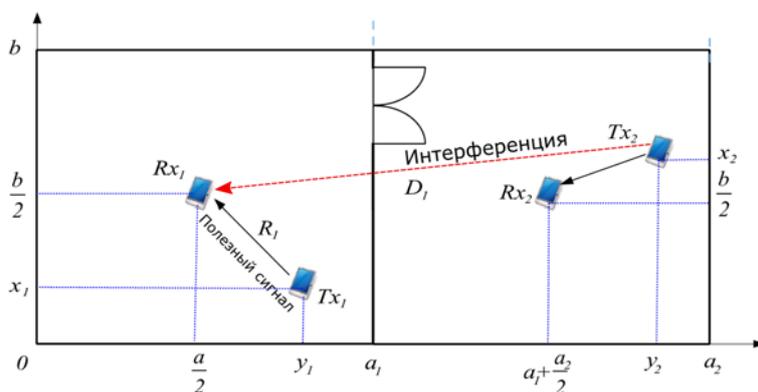


Рис. 16. Сценарий восходящей линии связи в двух кластерах.

Получив формулы оценки SIR для квадратных кластеров, не трудно вывести аналитические выражения для случая прямоугольных аналогичным способом.

В сценарии восходящей линии связи (Рис. 16) рассматривается по одному целевому и интерферирующему кластеру, имеющий длины сторон $c=a_1=a_2=b$. Приемники Rx_0 и Rx_1 зафиксированы в центрах кластера, а передатчики Tx_0 и Tx_1 равномерно разбросаны в соответствующих кластерах. Для этой конфигурации расстояние между Tx_0 и Rx_0 измеряется через R_0 , а дистанция Tx_1 и Rx_0 определяется через D_1 .

Напомним, что величина SINR вычисляется по следующей формуле

$$SINR = S / \left(\sum_{i=1}^N I_i + \sigma^2 \right), \quad (3.19)$$

где S – мощность принимаемого сигнала, N определяет количество интерферирующих источников, I_i отвечает за мощность интерференции от i -го источника, а σ^2 характеризует

мощность шума. Ранее мы вводили упрощение, что шум принимаем близкое к нулю. С учетом такого предположения формула (3.19) вычисления величины SIR примет следующий вид:

$$SIR = S / \left(\sum_{i=1}^N I_i \right), \quad (3.20)$$

где S – мощность принимаемого сигнала определяется функцией расстояния между передатчиком и приемником, а мощность интерференции I_i функцией от расстояния между целевым устройством и i -ым интерферирующим источником.

Учитывая все указанные выше предположения, формула (3.20) может быть представлена в виде (см. Рис. 15):

$$SIR = S(R_0) / \left(\sum_{i=1}^7 I_i(D_i) \right), \quad (3.21)$$

$$\text{где } S(R_0) = gR_0^{-\alpha_0}, \quad \sum_{i=1}^7 I_i(D_i) = g \sum_{i=1}^7 D_i^{-\alpha_i}, \quad (3.22)$$

и α_0 – экспонента затухания полезного сигнала, а α_i – экспонента затухания интерферирующего сигнала.

Снова введем упрощающее предположение, что мощность сигналов принимает одинаковые значения, тогда формула (3.21) имеет следующий вид:

$$SIR = gR_0^{-\alpha_0} / g \sum_{i=1}^7 D_i^{-\alpha_i} = R_0^{-\alpha_0} / \sum_{i=1}^7 D_i^{-\alpha_i}. \quad (3.23)$$

Таким образом, для сценария на Рис. 16 величина SIR определяется через

$$SIR = gR_0^{-\alpha_1} / gD_1^{-\alpha_2} = R_0^{-\alpha_1} / D_1^{-\alpha_2} = D_1^{\alpha_2} / R_0^{\alpha_1}. \quad (3.24)$$

Заметим, что с.в. SIR вычисляется через величины R_0 , D_1 , которые тоже являются случайными величинами с заданными функциями распределения. Задача в этом исследовании состоит в поиске числовых характеристик с.в. SIR. Для решения этой задачи необходимо отдельно вычислить плотности

распределений D_1 и R_0 и рассчитать их соотношение. Следует подчеркнуть, что этот метод применим только для случая up-link в силу свойства независимости с.в. Для сценария downlink возможен путь исследования SIR по координатам расположения устройств в декартовой системе.

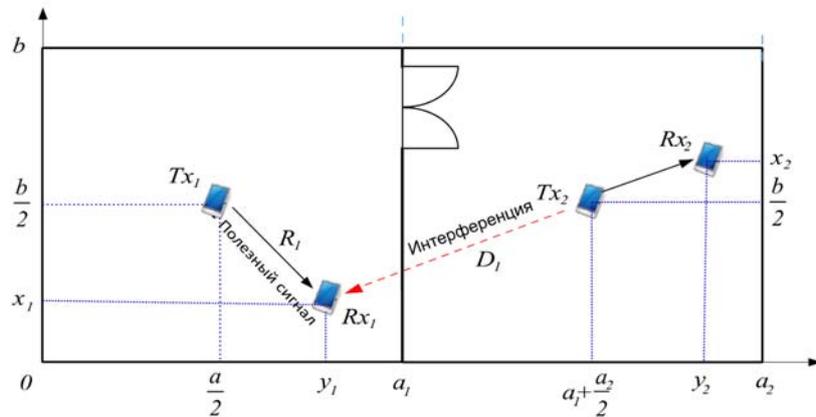


Рис. 17. Сценарий нисходящей линии связи в двух кластерах.

Подведем итоги, что благодаря инструментам стохастической геометрии можно провести оценку производительности беспроводных технологий 5G, которые расположены в соседних комнатах прямоугольной формы. Могут быть рассмотрены как прямое взаимодействие устройств, так и связь устройства с точкой доступа. Таким образом, нами проведено сравнение полученных аналитических результатов с результатами имитационного моделирования, что полностью подтверждает достоверность предложенной математической модели для анализа и оценки взаимодействующих устройств в смежных кластерах.

3.4. Упражнения

Задание 1.

Сгенерировать выборку случайных чисел размером 100 и 1000 для двух распределений – экспоненциального и нормального. Для созданных выборок сделать следующее:

1. Посчитать выборочное среднее и дисперсию, сравнить с математическим ожиданием соответствующих распределений;
2. Посчитать 0.5 и 0.99 квантили, сравнить с соответствующими теоретическими значениями;
3. Построить гистограмму распределения;
4. Построить функцию распределения случайной величины на основе выборки (на одном графике показать функции распределения, полученные из выборок разного размера и теоретическую);
5. Построить плотность распределения случайной величины на основе выборки (на одном графике показать плотности распределения, полученные из выборок разного размера и теоретическую).

В итоге проанализировать зависимость точности аппроксимации от количества экспериментов.

Задание 2.

Сгенерировать три выборки размера 100, 1000 и 10000 для случайных расстояний между двумя точками, равномерно распределенные в прямоугольнике со сторонами 10 и 30. Получить среднее значение расстояния между точками, построить функцию распределения вероятностей и плотности вероятностей случайных расстояний. Показать разницу между соответствующими функциями на одном графике.

Задание 3.

Построить согласно описанному ниже алгоритму имитационную модель, позволяющую рассчитать вероятность блокировки линии прямой видимости, и сравнить полученную характеристику с результатами математической модели.

- В квадратной области со стороной A согласно точечному Пуассоновскому процессу с плотностью q разместить объекты (окружности с фиксированным радиусом r), которые могут заблокировать линию прямой видимости между двумя точками, размещенными на расстоянии x друг от друга внутри обозначенной области. Проверить блокирует ли хотя бы один объект линию прямой видимости.*
- Количество блокирующих объектов определяется согласно распределению Пуассона с параметром qA^2 , а объекты вбрасываются независимо друг от друга. При этом центры блокирующих объектов должны быть распределены равномерно внутри рассматриваемой области.*

На основе описанного выше алгоритма получить 1000 реализаций факта блокировки линии прямой видимости и рассчитать вероятность блокировки линии прямой видимости в поле блокирующих объектов. Полученный результат сравнить с результатами математической модели.

4. Оценка помехи в сетях 5G «Новое Радио»

В данном разделе рассмотрим методологию оценки первых моментов интерференции в сетях доступа, работающих в миллиметровом диапазоне частот. Сначала рассмотрим упрощенный двухмерный сценарий и далее перейдем к анализу более реалистичного трехмерного сценария. Напомним, что модели компонентов системы введены в Главе 2. Анализ стро-

ится на основе использования теоремы Кэмпбелла. Напомним, что искомая метрика в данном разделе – мощность интерференции, которая может быть записана следующим образом:

$$I = A \sum_{i=1}^N d_i^{-\zeta}, \quad (4.1)$$

где A – некоторый коэффициент, зависящий от мощности передатчика, усиления антенн в направлении передачи и приема, и также некоторого набора дополнительных констант.

4.1. Двухмерный сценарий развертывания

Формула Кэмпбелла для моментов интерференции

Рассмотрим методику получения моментов помех на примере двумерной модели с использованием диаграммы направленности антенны без потерь сигнала на боковых и задних лепестках.

Давайте сначала рассмотрим случай, когда направленные антенны используются только на стороне передачи или только на стороне приема. Источник помех в пределах радиуса R приемника не будет создавать помехи только в двух случаях: (i) зона покрытия передатчика не включает приемник или зона покрытия приемника не включает передатчик (для упрощения вычисления вероятности экспозиции далее мы предполагаем первый вариант), и (ii) распространение помех блокируется другими узлами-источниками помех.

Вероятность второго события определяется вероятностью блокировки, p_B , полученной в Разделе 2. Для первого события вероятность того, что зона охвата передатчика включает в себя приемник, p_C , для диаграммы направленности первого типа (см. Раздел 2), может быть получена следующим образом:

$$p_C = \alpha x / 2\pi x = \alpha / 2\pi, \quad (4.2)$$

что проиллюстрировано на Рис. 18.

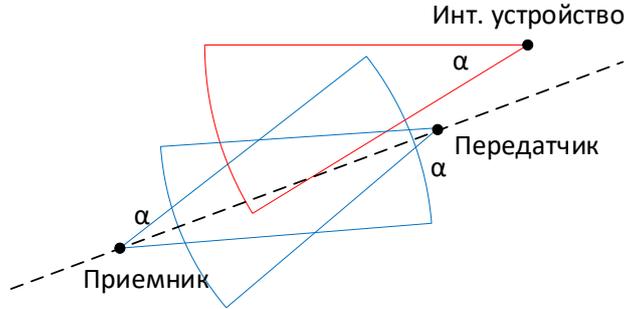


Рис. 18. Вероятность экспозиции для двухмерного сценария.

Рассмотрим приращение dr . Поскольку процесс расположения узлов помех является Пуассоновским, одновременное появление нескольких событий в dr невозможно. Следовательно, вероятность того, что источник помех расположен на расстоянии r от приемника, пропорциональна значению dr . Таким образом, элементарный прирост кольца можно рассчитать по формуле:

$$\pi(r + dr)^2 - \pi r^2 = 2\pi r dr + O(1), \quad (4.3)$$

из которой можно понять, что вероятность нахождения источника помех в кольце $(r, r+dr)$ $-2\pi\lambda_1 r dr$.

Если источник помех, находящийся на расстоянии r от приемника не заблокирован, и приемник находится в зоне покрытия источника помех, вклад этого узла в помехи в приемнике составляет $A r^{-2} e^{-K r}$. Учитывая этот факт, среднее значение помех на приемнике, $E[I]$, может быть рассчитано по следующей формуле, которая является частным случаем формулы Кэмпбелла:

$$E[I] = \int_{r_B}^R A r^{-2} e^{-K r} p_C [1 - p_B(r)] 2\lambda_1 \pi r dr. \quad (4.4)$$

Подставляя вероятности p_B и p_C , запишем среднее значение помехи на приемнике через

$$\begin{aligned}
E[I] &= \\
&= \int_{r_B}^R A r^{-2} e^{-Kr} e^{-\lambda_I(x-r_B)r_B} \frac{\alpha}{2\pi} 2\lambda_I \pi r dr = A\alpha\lambda_I \Theta(R, r_B, \lambda_I, K), \quad (4.5)
\end{aligned}$$

где $\theta(R, r_B, \lambda_I, K)$ определяется как

$$\begin{aligned}
\Theta &= \\
&= e^{-\lambda_I r_B^2} Ei(-R[K + \lambda_I r_B]) - Ei(-r_B^2[K + r_B \lambda_I]), \quad (4.6)
\end{aligned}$$

где $Ei(x)$ является интегральной показательной функцией.

Рассмотрим несколько частных случаев. Если не учитывать эффект блокировки, среднее значение помехи может быть записано в более простой форме:

$$E[I] = A\alpha\lambda_I \int_{r_B}^R \frac{1}{r} e^{-Kr} dr = A\alpha\lambda_I \Theta_1(R, r_B, K), \quad (4.7)$$

где $\theta_1(R, r_B, K) = Ei(-KR) - Ei(-Kr_B)$.

Если используются всенаправленные антенны, среднее значение помехи принимает следующий вид:

$$E[I] = 2\pi\lambda_I A \Theta(R, r_B, \lambda_I, K). \quad (4.8)$$

Если же мы рассмотрим всенаправленные антенны и отсутствие блокировки одновременно, финальное выражение значительно упрощается:

$$E[I] = 2\pi\lambda_I A \Theta_1(R, r_B, K). \quad (4.9)$$

В том случае, когда предполагается направленные антенны как на передатчике, так и на приемнике, среднее значение помехи на приемнике получается умножением указанных результатов на $\alpha/2\pi$:

$$\text{С блокировкой : } E[I] = \frac{A\alpha^2\lambda_I}{2\pi} \Theta(R, r_B, \lambda_I, K), \quad (4.10)$$

$$\text{Без блокировки : } E[I] = \frac{A\alpha^2\lambda_I}{2\pi} \Theta_1(R, r_B, \lambda_I, K).$$

Помеха для диаграммы направленности второго типа

Напомним, что диаграмма направленности второго типа учитывает помехи на боковые и задние лепестки, что позволяет уточнить результаты, приведенные выше. В этом случае необходимо различать следующие три случая:

1. Линия прямой видимости между приемником и интерферирующим узлом заблокирована.
2. Линия прямой видимости между приемником и интерферирующим узлом не заблокирована, и приемник расположен в основном лепестке интерферирующего узла.
3. Линия прямой видимости между приемником и интерферирующим узлом не заблокирована, и приемник расположен не в основном лепестке интерферирующего узла.

Вероятность первого из перечисленных событий определяется как p_B . При этом вклад источника помех в совокупную помеху на приемнике принимается равным нулю. Вероятность второго события можно получить как $p_C(1-p_B)$. При этом вклад источника помех узла в совокупную помеху на приемнике, как $A_1 r^{-2} e^{-Kr}$, где A_1 – коэффициент основного лепестка антенны (см. Раздел 2). Наконец, вероятность последнего события, как $(1-p_C)(1-p_B)$, а вклад источника помех в совокупную помеху на приемнике равен $A_2 r^{-2} e^{-Kr}$, где A_2 – коэффициент усиления в направлении боковых и задних лепестков антенны (см. Раздел 2).

Учитывая указанные события, среднее значение помехи на приемнике при использовании диаграммы направленности второго типа, определяется следующим выражением:

$$E[I] = \int_{r_B}^R A_1 r^{-2} e^{-Kr} p_C p_A 2\lambda_1 \pi r dr + \int_{r_B}^R A_2 r^{-2} e^{-Kr} (1-p_C) p_A 2\lambda_1 \pi r dr. \quad (4.11)$$

Вычисляя интеграл в (4.11) получим:

$$E[I] = A_1 \alpha \lambda_l \Theta(R, r_B, \lambda_l, K) + A_2 [2\pi - \alpha] \lambda_l \Theta(R, r_B, \lambda_l, K). \quad (4.12)$$

Рассмотрим теперь несколько специальных случаев.

Если не принимать во внимание эффект блокировки путей распространения сигнала, среднее значение помехи на приемнике определяется следующим образом:

$$E[I] = A_1 \alpha \lambda_l \Theta_1(R, r_B, K) + A_2 [2\pi - \alpha] \lambda_l \Theta_1(R, r_B, K). \quad (4.13)$$

Если направленные антенны используются как на приемнике, так и на передатчике, получаем:

С блокировкой :

$$E[I] = \frac{A_1 \alpha^2 \lambda_l}{2\pi} \Theta(R, r_B, \lambda_l, K) + \frac{A_2 [2\pi - \alpha^2] \lambda_l}{2\pi} \Theta(R, r_B, \lambda_l, K),$$

Без блокировки :

$$E[I] = \frac{A_1 \alpha^2 \lambda_l}{2\pi} \Theta_1(R, r_B, K) + \frac{A_2 [2\pi - \alpha^2] \lambda_l}{2\pi} \Theta_1(R, r_B, K). \quad (4.14)$$

Отметим, что предлагаемый подход позволяет моделировать различные углы диаграммы направленности как на источниках помех, так и на приемнике.

Учет эффекта молекулярного шума

Молекулярный шум является одним из явлений, характерных для частотных диапазонов, превышающих миллиметровые. В частности, это присуще терагерцовому диапазону частот (300 ГГц - 3 ТГц). Существование молекулярного шума было теоретически предсказано, но еще не подтверждено.

Подход, рассмотренный выше, может быть модифицирован для учета влияния молекулярного шума. Поскольку молекулярный шум, вызванный передачей источников помех, также может вносить вклад в интерференцию на приемнике, этот эффект можно учесть при оценке среднего значения по-

мех на приемнике, заменяя Ar^2e^{-Kr} на Ar^2 . В этом случае среднее значение помех в приемнике для диаграммы направленности первого типа будет определяться следующим образом:

$$E[I] = \int_{r_B}^R Ar^{-2} e^{-\lambda_I(x-r_B)r_B} \frac{\alpha}{2\pi} 2\lambda_I \pi r dr = A\alpha\lambda_I \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I), \quad (4.15)$$

где $\Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I)$ вычисляется как:

$$\Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I) = e^{-\lambda_I r_B} E(-\lambda_I r_B R) - E(-\lambda_I r_B^2). \quad (4.16)$$

Для диаграммы направленности второго типа:

$$E[I] = A_1 \alpha \lambda_I \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I) + A_2 [2\pi - \alpha] \lambda_I \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I). \quad (4.17)$$

Предполагая направленности как на передатчике, так и на приемниках, среднее значение помехи с учетом молекулярного шума приводит к следующим выражениям:

$$\text{Диаграмма первого типа: } E[I] = \frac{A\alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I),$$

$$\text{Диаграмма второго типа:} \quad (4.18)$$

$$E[I] = \frac{A_1 \alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I, K) + \frac{A_2 [2\pi - \alpha^2] \lambda_I}{2\pi} \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I, K).$$

4.2. Трехмерный сценарий развертывания

Перейдем теперь к рассмотрению трехмерного сценария развертывания системы. Напомним, что модели компонентов такого сценария, включая модели антенн, распространения и блокировки представлены в Разделе 2.

В случае трехмерного развертывания моменты суммарной интерференции получаются аналогично двумерному сценарию используя формулу Кэмпбелла в следующем виде

$$E[I^n] = \int_0^{R_i} E[I_1^n(r)] p_c(r) [1 - p_B(r)] 2\lambda \pi r dr, \quad (4.19)$$

где $2\lambda \pi r dr$ – вероятность наличия узла помех в элементарном приращении окружности, $p_c(r)$ – вероятность такой ориентации передающих и принимающей антенн, что источник помех

вносит вклад в совокупную помеху на приемнике (вероятность экспозиции), $p_V(r)$ – вероятность того, что прямая видимость блокируется, $E[I_1^n(r)]$ – моменты помехи от одного источника помех на фиксированном расстоянии r .

Получим неизвестные в (4.19) при помощи нескольких следующих утверждений.

Утверждение 1. Начальные моменты мощности сигнала на приемнике могут быть получены следующим образом:

$$E[P_R^n] = A^n 2^{\frac{1}{2}-\zeta n} [W(\mu_T, \mu_R) + W(\mu_R, \mu_T)] \times \frac{\pi^{\frac{3}{2}} \csc\left(\frac{\pi\zeta n}{2}\right) \sec\left(\frac{\pi\zeta n}{2}\right) R_T^{-\left(\frac{n\zeta-5}{2}\right)}}{\mu_R^2 \mu_T^2 (\mu_R + \mu_T) \Gamma\left(\frac{n\zeta}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n\zeta-1}{2}\right)}, \quad (4.20)$$

где $W(x,y)$ принимают следующий вид:

$$W(x, y) = x^3 \left(\begin{aligned} & 2\sqrt{2} y^{\zeta n} R_T^{\frac{n\zeta+1}{2}} + R_T^2 2^{\frac{\zeta n}{2}} y^{\frac{n\zeta+3}{2}} \Gamma\left(\frac{n\zeta-1}{2}\right) \times \\ & \times \left(\cos\left(\frac{\pi\zeta n}{2}\right) H_{\frac{3-n\zeta}{2}}^{yR_T} - J_{\frac{n\zeta-3}{2}}^{yR_T} - \sin\left(\frac{\pi\zeta n}{2}\right) J_{\frac{3-n\zeta}{2}}^{yR_T} \right) \end{aligned} \right). \quad (4.21)$$

Доказательство. Запишем мощность принимаемого сигнала следующим образом:

$$P_R = A \left(\sqrt{(H_T - H_R)^2 + r^2} \right)^{-\zeta} \quad (4.22)$$

где H_T , H_R , и r являются случайными величинами.

Отметим, что $|H_T - H_R|$ может быть найдена как модуль разности экспоненциально распределенных с.в. Получаем для плотности вероятности $|H_T - H_R|$ следующее выражение:

$$f_{|H_T-H_R|}(y) = \frac{(e^{-y\mu_R} + e^{-y\mu_T})\mu_R\mu_T}{\mu_R + \mu_T}, y > 0. \quad (4.23)$$

Используя (4.23) начальные моменты $E[P_R^n(r)] n=1,2,\dots$, мощности сигнала на приемнике могут быть записаны в следующей интегральной форме:

$$E[P_R^n] = \int_0^{R_T} \int_0^\infty \frac{A^n (e^{-y\mu_R} + e^{-y\mu_T}) \mu_R \mu_T 2r}{(r^2 + y^2)^{\frac{n\zeta}{2}} (\mu_R + \mu_T) R_T^2} dy dr. \quad (4.24)$$

Вычисляя интегралы в (15), получаем (11). \square

Сформулированный результат приводит к следующему следствию, устанавливающему первое неизвестное в (4.19).

Следствие 1. Условные начальные моменты помехи можно получить из (4.20), фиксируя расстояние между источником помехи и приемником r :

$$E[I_1^n(r)] = \frac{[W_1(\mu_T) + W_1(\mu_R)] \left[(\mu_R + \mu_T) \Gamma\left(\frac{n\zeta}{2}\right) \right]}{2^{\frac{n\zeta+1}{2}} A^n \pi^{\frac{3}{2}} \mu_R \mu_T}, \quad (4.25)$$

где функция $W_1(x)$ принимает вид

$$W_1(x) = \left[\frac{r}{x} \right]^{\frac{1-n\zeta}{2}} \times \quad (4.26)$$

$$\times \left[2J_{\frac{n\zeta-1}{2}}^{rx} \csc(n\pi\zeta) - J_{\frac{1-n\zeta}{2}}^{rx} \sec\left(\frac{n\pi\zeta}{2}\right) + \csc\left(\frac{n\pi\zeta}{2}\right) H_{\frac{1-n\zeta}{2}}^{rx} \right].$$

Для того, что вычислить вероятность блокировки прямой видимости, определим зону блокировки прямой видимости $ABCD$, см Рис. 19. Нетрудно видеть, что, если по крайней мере один центр блокатора попадает в эту зону, линия прямой видимости прерывается. Установим вероятность блокировки $p_B(r)$ в следующем утверждении.

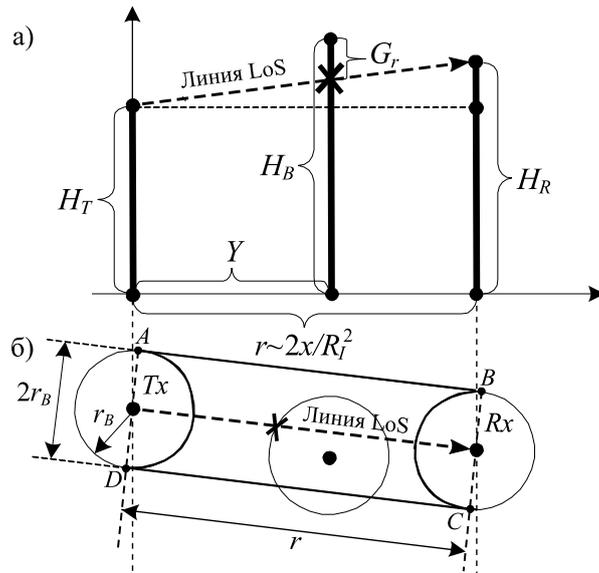


Рис. 19. Иллюстрация блокировки в трех измерениях.

Утверждение 2. Вероятность блокировки Пуассоновском поле блокаторов с экспоненциально распределенными высотами устанавливается следующим образом:

$$p_B(r) = 1 - \left(\frac{\mu_R \mu_T}{(\mu_B + \mu_R)(\mu_B + \mu_T)} \right)^{\frac{2r_B r \lambda \mu_R \mu_T}{\mu_B (\mu_B + \mu_R + \mu_T)}}. \quad (4.27)$$

Доказательство. Пусть G_r , $0 < r < R_I$ является с.в., определяющей разницу между высотой линии прямой видимости и высотой блокатора, H_B , расстоянии r от передающего узла. Отметим, что центры блокаторов, находящихся в зоне блокировки прямой видимости, распределены равномерно на отрезке $[0, R_I]$. Полагая $H_R > H_T$, запишем:

$$G_r = \frac{(H_R - H_T)Y}{r} + H_T - H_B. \quad (4.28)$$

Вероятность, что блокатор, расположенный на расстоянии r от приемника, перекрывает линию прямой видимости определяется следующим выражением:

$$p_{B,1}(r) = 1 - Pr \left\{ \frac{(H_R - H_T)Y}{r} + H_T - H_B > 0 \right\}. \quad (4.29)$$

Определив $p_{B,1}(r)$, можно вычислить полную вероятность блокировки через

$$\begin{aligned} p_B(r) &= 1 - \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(2\lambda r_B r)^i}{i! e^{2\lambda r_B r}} [1 - p_{B,1}(r)]^i = \\ &= 1 - e^{-2\lambda r_B r} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(2\lambda r_B r)^i}{i! e^{2\lambda r_B r}} [1 - p_{B,1}(r)]^i \end{aligned} \quad (4.30)$$

где $p_{B,1}(r) = Pr\{G_r - H_B > 0\}$ – неизвестное, которое может быть получено, используя преобразование случайных величин. В частности, имеем:

$$\begin{aligned} p_{B,1}(r) &= 1 - \int_0^r \int_0^{\infty} f_{\eta\eta_4}(y_1, y_4) dy_1 dy_4 = \\ &= \frac{\mu_R \mu_T \log \left(\frac{\mu_R \mu_T}{(\mu_B + \mu_R)(\mu_B + \mu_T)} \right)}{\mu_B (\mu_B + \mu_R + \mu_T)} \end{aligned} \quad (4.31)$$

Подставляя (4.31) в (4.30) и упрощая, получим (4.27).

Перейдем к определению вероятности экспозиции, см. Рис. 20. Отметим, что вероятность экспозиции на расстоянии r между приемником и источником помехи $p_C(r)$:

$$p_C(r) = p_V(r) p_H(r), \quad (4.32)$$

где $p_H(r)$ – вероятность, что источник помехи оказывает влияние на приемник в горизонтальной плоскости, $p_V(r)$ – вероятность того, что источник помехи оказывает влияние на приемник в вертикальной плоскости.

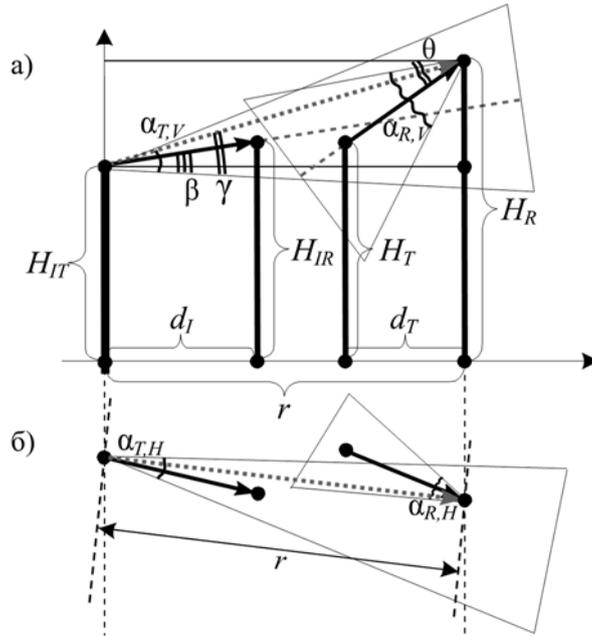


Рис. 20. Иллюстрация экспозиции в трех измерениях.

Вероятность горизонтальной экспозиции получается непосредственно следующим образом, см. Рис. 20(б):

$$p_H(r) = \frac{\alpha_{T,H} r}{2\pi r} \frac{\alpha_{R,H} r}{2\pi r} = \frac{\alpha_{T,H} \alpha_{R,H}}{4\pi^2}, \quad (4.33)$$

где $\alpha_{T,H}$ и $\alpha_{R,H}$ — направленности антенн передатчиков и приемников в горизонтальной плоскости.

Иллюстрация вертикальной экспозиции представлена на Рис. 20(а). Установим ее в следующем утверждении.

Утверждение 3. Вероятность вертикальной экспозиции в системе связи с направленными антеннами на передатчиках и приемниках определяется следующим выражением:

$$p_V(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{y_4 - \frac{\alpha_{T,V}}{2}}^{y_4 + \frac{\alpha_{T,V}}{2}} \int_{y_4 - \frac{\alpha_{R,V}}{2}}^{y_4 + \frac{\alpha_{R,V}}{2}} f_{\gamma, \theta, \beta}(y_1, y_4, y_6) dy_1 dy_6 dy_4 \quad (4.34)$$

где $f_{\gamma,\theta,\beta}(y_1, y_4, y_6)$ – совместная плотность вероятности углов $\{\Theta, \gamma, \beta\}$, см. Рис. 20(a), $\alpha_{T,H}$ и $\alpha_{R,H}$ – вертикальная направленность антенн на передатчиках и приемниках.

Доказательство. Рассмотрим систему с.в. $\{\Theta, \gamma, \beta\}$ (см. Рис. 20), где Θ – это угол между прямой линией, соединяющей передатчик и приемник, и горизонтом, γ – угол между прямой линией, соединяющей источник помехи и приемник, β – угол между прямой линией, соединяющей источник помехи и его приемник и горизонт. Плотность вероятности вычисляется методом преобразования с.в. В результате искомая совместная плотность может быть записана следующим образом:

$$f_{\vec{\eta}}(\vec{y}) = \iiint_{\mathbb{R}^3} f_{\vec{\xi}}(\phi_1(\vec{y}^n), \dots, \phi_n(\vec{y}^n)) |\mathbb{J}| dy_2 dy_5 dy_3, \quad (4.35)$$

где Якобиан записывается через

$$\mathbb{J} = -ry_3 y_5 \sec^2(y_1) \sec^2(y_4) \sec^2(y_6), \quad (4.36)$$

и, в итоге, подынтегральное выражение принимает вид:

$$f_{\vec{\xi}}(\vec{\phi}^n(\vec{y}^n)) = \frac{4y_3 y_5 \mu_R^2 \mu_T^2}{R_T^4} e^{-y_2 \mu_R - \mu_T (y_2 + y_3 \tan[y_1])} \times \quad (4.37)$$

$$\times e^{-\mu_T (y_2 + y_3 \tan[y_4]) - \mu_R (y_4 - y_5 \tan[y_6])}.$$

Интегралы, приведенные выше, могут быть взяты используя стандартные техники интегрирования, что позволит получить выражения в замкнутом виде. \square

4.3. Численные примеры

Ниже приведены численные результаты, иллюстрирующие поведение среднего значения помех на приемнике при различных параметрах системы.

Двухмерная модель

На Рис. 21 показано среднее значение помехи, как функция коэффициента поглощения K для различных углов

излучения и диаграммы направленности первого типа. На Рис. 21 показана связь между коэффициентом поглощения K и средним значением помехи на приемнике, что обосновывает необходимость учета влияния молекулярного поглощения при построении моделей интерференции. Устанавливая угол диаграммы направленности в некоторое фиксированное значение, мы также можем заметить, что среднее значение интерференции должно уменьшаться с увеличением коэффициента поглощения. Аналогично, зафиксировав значение коэффициента поглощения, мы наблюдаем увеличение среднего значения помех на приемнике с увеличением направленности.

На Рис. 22 показана зависимость среднего значения помехи от угла направления для двух рассматриваемых диаграмм направленности. Так как диаграмма направленности первого типа всю излучаемую мощность «собирает» в главном лепестке, среднее значение помехи на приемнике для диаграммы направленности первого типа выше. Однако, напомним, что диаграмма направленности второго типа является более гибкой, так как зависит от коэффициента k , который варьирует долю мощности, излучаемой в направлении боковых лепестков. Зависимость среднего значения помехи на приемнике от угла диаграммы направленности α для диаграммы направленности второго типа имеет принципиально иной вид, чем для диаграммы направленности первого типа. При уменьшении коэффициента k , среднее значение помехи для диаграммы направленности второго типа приближается к среднему значению помехи для диаграммы направленности первого типа.

Величина коэффициента k может значительно варьироваться в зависимости от конкретной антенны (во многих исследованиях коэффициент k принимает значения из диапазона $[0,1-0,2]$). Следовательно, использование диаграммы направ-

ленности второго типа является предпочтительным для точной оценки помех в миллиметровых и терагерцовых сетях связи.

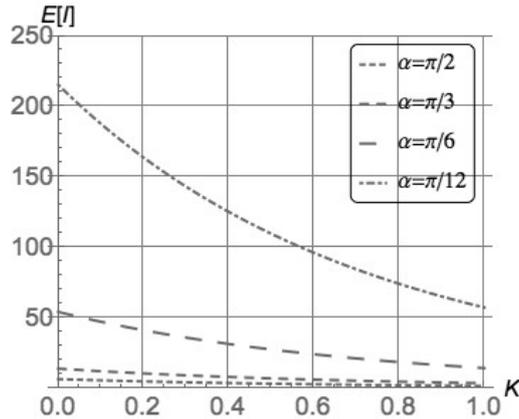


Рис. 21. Среднее значение помехи как функция коэффициента абсорбции.

В то же время использование диаграммы направленности первого типа значительно упрощает анализ и финальные выражения, и, следовательно, является предпочтительным для «грубых» оценок среднего значения помех.

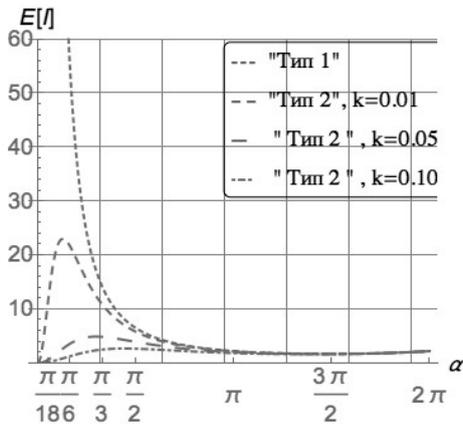


Рис. 22. Среднее значение помехи для диаграмм направленности.

Анализируя полученные результаты, сделаем следующие выводы. Во-первых, среднее значение помехи для диаграммы направленности первого типа увеличивается с уменьшением угла излучения. Во-вторых, среднее значение помехи для диаграммы направленности первого типа уменьшается с увеличением коэффициента поглощения. В-третьих, поведение средней интерференции для диаграммы направленности второго типа принципиально отличается от поведения средней интерференции диаграммы направленности второго типа. В то же время, когда параметр k стремится к нулю, разница между результатами стремится к нулю.

Трехмерная модель

Вероятность вертикальной экспозиции, p_V , является важным параметром, который отличает двухмерные и трехмерные модели друг от друга. Так как вычисление вероятности p_V также является самым сложным этапом расчета в модели, мы оценим точность возможных приближений p_V .

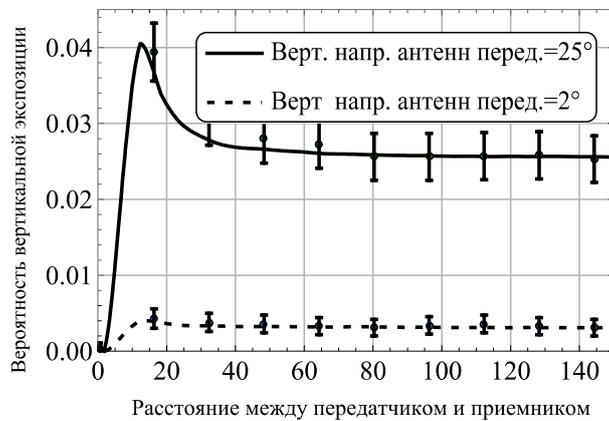


Рис. 23. Вероятность вертикальной экспозиции.

Значение вероятности вертикальной экспозиции в зависимости от расстояния между передатчиком и приемником, а

также от вертикальной направленности антенны передатчика показано на Рис. 23. Анализируя представленные результаты отметим, что модель хорошо аппроксимирует данные моделирования, а значения находятся в доверительных интервалах. Также можно видеть, что доверительные интервалы увеличиваются с уменьшением направленности антенны. Причина этого заключается в том, что при моделировании число экспериментов было установлено равным 10^7 для всех рассмотренных значений. В случае малых значений направленности антенны, количество тестов, в которых приемники подвергаются воздействию помех передатчика, недостаточно для точной оценки в течение разумного времени, что является дополнительной мотивацией для использования разработанной математической модели.

4.4. Упражнения

Задание 1.

Для двухмерной модели развёртывания рассчитайте мощность интерференции с блокировкой и без. Постройте график среднего значения интерференции как функции от дистанции между передатчиков и приемником. Сравните полученные результаты. В качестве параметров выберите следующие: горизонтальная направленность антенны - $\pi/18$, интенсивность блокирующих объектов – 1 объект на квадратный метр, коэффициент $A = 1$.

Задание 2.

Для двухмерной модели развёртывания рассчитайте мощность интерференции с молекулярной абсорбцией и без. Постройте график среднего значения интерференции как функции от дистанции между передатчиков и приемником. Сравните полученные результаты. В качестве параметров

выберите следующие: горизонтальная направленность антенны - $\pi/18$, интенсивность блокирующих объектов – 1 объект на квадратный метр, коэффициент $A = 1$. Сделайте вывод о том, следует ли учитывать молекулярную абсорбцию.

Задание 3.

Для трехмерной модели развёртывания рассчитайте вероятность вертикальной экспозиции для выбранных Вами значений системы связи. Постройте график зависимости указанной вероятности от интенсивности блокирующих объектов.

5. Оценка отношения сигнал-помеха в сетях 5G «Новое Радио»

В данной главе рассмотрим методологию получения более сложных метрик для оценки качества канала связи, в частности, отношение сигнал-интерференция. Аналогично главе 4, сначала рассмотрим более простой двухмерный сценарий развёртывания, а потом перейдем к трехмерному сценарию. Рассмотренная методология может использоваться также и для оценки скоростей каналов связи в плотных развёртываниях сетей 5G NR.

5.1. Общая методология оценки

Известно, что одним из определяющих метрик влияния на качество беспроводного соединения является отношение сигнал-интерференция. Для оценки соотношения сигнал-интерференция требуется предварительно получить распределение интерференции. Распределение интерференции, получается в два этапа. На первом этапе, методом функционального преобразования случайных величин получают распределение

интерференции от одного узла $Ar_i^{-2}e^{-Kr_i}$, а затем строится распределение суммарной интерференции на приемнике $\sum_{i=1}^N Ar_i^{-2}e^{-Kr_i}$ от случайного числа интерферирующих узлов N .

При работе с миллиметровым диапазоном частот применение описанного выше подхода сопряжено с рядом сложностей. Во-первых, распределение незаблокированных интерферирующих узлов в круге не является однородным, так как вероятность блокировки $p_b(x)$ имеет зависимость от дистанции между принимающим и интерферирующим устройствами. Следовательно, вероятность блокировки интерферирующего узла снижается в зависимости от увеличения расстояния между интерферирующим и приемным устройствами. Эта особенность изменяет структуру распределения для оценки интерференции и не позволяет получить аналитические выражения в замкнутой форме.

Таким образом, учитывая выше приведенные ограничения, в практику вводим другой метод, закрепленный на применении разложения функции случайных величин в ряд Тейлора, для оценки отношения сигнал-интерференция.

5.2. Двухмерный сценарий развертывания

Разложение в ряд Тейлора

Для получения оценки соотношения сигнал-интерференция предлагается использование разложения функционального преобразования с.в в ряд Тейлора. Напомним, что среднее значение с.в. $Y=g(X)$, где X – с.в. со средним значением μ_0 и дисперсией $\sigma^2[X]$, может быть выражено как

$$E[Y] = g(\mu_0) + \frac{g''(\mu_0)}{2} \sigma^2[X], \quad (5.1)$$

в то время как дисперсия $Y=g(X)$ вычисляется как

$$\sigma^2[Y] = [g'(\mu_0)]^2 \sigma^2[X] - \frac{1}{4} [f''(\mu_0) \sigma^2[X]]^2. \quad (5.2)$$

Отношение сигнал-интерференция может быть записано через

$$g_1(x) = C/x, \quad (5.3)$$

где $C = Ar_0^{-2} e^{-Kr_0}$ – мощность полезного сигнала на приемнике.

Первая и вторая производные $g_1(x)$ вычисляются как

$$g_1'(x) = -C/x^2, \quad g_1''(x) = 2C/x^3. \quad (5.4)$$

Поиск неизвестных

Для вычисления дисперсии интерференции используется подход, аналогичный рассмотренному в Разделе 4. Так как среднее значение интерференции, $E[I]$, уже было получено в работе, в данной работе мы записываем дисперсию интерференции как $\sigma^2[I] = E[I^2] - (E[I])^2$, и сосредоточимся на вычислении $E[I^2]$. Используя свойство независимости случайных величин, определяющих число интерферирующих узлов в непересекающихся областях, мы применяем интегральное выражение для записи $E[I^2]$. Так как применяемый подход не зависит от направленности передатчика/приемника и учета эффекта блокировки. Далее подробно показан только случай направленности на передатчике без учета эффекта блокировки. Для остальных случаев даны только финальные выражения для дисперсии.

Для указанного случая, $E[I^2]$ определяется формулой

$$\begin{aligned} E[I^2] &= \int_{r_B}^R \left(Ar^{-2} e^{-Kr} e^{-\lambda_I(x-r_B)r_B} \frac{\alpha}{2\pi} \right)^2 2\lambda_I \pi r dr = \\ &= \frac{A^2 \alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Phi(R, r_B, \lambda_I, K), \end{aligned} \quad (5.5)$$

где

$$\Phi(R, r_B, \lambda_l, K) = \frac{4R^2(K + \lambda_l r_B)^2 e^{2R(K + \lambda_l r_B)} Ei(2R(r_B \lambda_l + K)) + 2KR + 2\lambda_l R r_B - 1}{2R^2 e^{-2\lambda_l r_B(r_B - R) - 2KR}} \Big|_{r_B}^R. \quad (5.6)$$

Далее приведены финальные значения дисперсии для интерференции с применением промежуточного коэффициента $\Phi_1(R, r_B, K)$, который вычисляется следующим образом:

$$\Phi_1(R, r_B, K) = \left(2K^2 Ei(-2KR) + e^{-2KR} \left(\frac{K}{R} - \frac{1}{2R^2} \right) \right) \Big|_{r_B}^R, \quad (5.7)$$

С учетом приведенных выше результатов, дисперсия интерференции при отсутствии блокировки для всенаправленных антенн на передающей и приёмной сторонах выглядит как

$$\sigma^2[I] = 2\pi A^2 \lambda_l \Phi_1(R, r_B, K). \quad (5.8)$$

Дисперсия интерференции с блокировкой для всенаправленных антенн имеет вид:

$$\sigma^2[I] = 2\pi A^2 \lambda_l \Phi(R, r_B, \lambda_l, K). \quad (5.9)$$

Дисперсия интерференции без блокировки для направленной антенны на приемной либо передающей стороне вычисляется как

$$\sigma^2[I] = A^2 \alpha \lambda_l \Phi_1(R, r_B, K). \quad (5.10)$$

Дисперсия интерференции с учетом эффекта блокировки для направленной антенны на приемной либо передающей стороне имеет следующий вид:

$$\sigma^2[I] = A^2 \alpha \lambda_l \Phi(R, r_B, \lambda_l, K). \quad (5.11)$$

Дисперсия для интерференции при отсутствии блокировки для направленных антенн в обеих передающей и приемной сторонах вычисляется по формуле

$$\sigma^2[I] = \frac{A^2 \alpha \lambda_l}{2\pi} \Phi_1(R, r_B, K). \quad (5.12)$$

Дисперсия интерференции с учетом эффекта блокировки для случая направленных антенн как на передающей, так и на приемной стороне вычисляется через

$$\sigma^2[I] = \frac{A^2 \alpha \lambda_I}{2\pi} \Phi(R, r_B, \lambda_I, K). \quad (5.13)$$

Приведенные выше выражения используются в следующем подразделе для построения оценки соотношения сигнал-интерференция.

Оценка соотношения сигнал-интерференция

Объединяя приведенные выше выражения с результатами, полученными в Разделе 4.2, среднее значение соотношения сигнал-интерференция при блокировке для направленных антенн либо на приемной, либо на передающей стороне имеет вид:

$$E[S] = \frac{e^{-Kr_0} r_0^{-2}}{\frac{\alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta(R, r_B, \lambda_I, K)} + \frac{e^{-Kr_0} r_0^{-2} \left[\frac{\alpha \lambda_I}{2\pi} \Phi(R, r_B, \lambda_I, K) - \left[\frac{\alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta(R, r_B, \lambda_I, K) \right]^2 \right]}{\left[\frac{\alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta(R, r_B, \lambda_I, K) \right]^3}. \quad (5.14)$$

То же самое значение без учета эффекта блокировки вычисляется как:

$$\begin{aligned}
E[S] = & \frac{e^{-Kr_0} r_0^{-2}}{\frac{\alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta_1(R, r_B, \lambda_I, K)} + \\
& + \frac{e^{-Kr_0} r_0^{-2} \left[\frac{\alpha \lambda_I}{2\pi} \Phi_1(R, r_B, K) - \left[\frac{\alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta_1(R, r_B, \lambda_I, K) \right]^2 \right]}{\left[\frac{\alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta_1(R, r_B, \lambda_I, K) \right]^3}.
\end{aligned} \tag{5.15}$$

Аналогично, среднее значение соотношения сигнал-интерференция для случая направленных антенн как на передающей, так и на приемной стороне вычисляется через выражение

$$\begin{aligned}
E[S] = & \frac{e^{-Kr_0} r_0^{-2}}{\alpha \lambda_I \Theta(R, r_B, \lambda_I, K)} + \\
& + \frac{e^{-Kr_0} r_0^{-2} \left[\alpha \lambda_I \Phi(R, r_B, \lambda_I, K) - \left[\alpha \lambda_I \Theta(R, r_B, \lambda_I, K) \right]^2 \right]}{\left[\alpha \lambda_I \Theta(R, r_B, \lambda_I, K) \right]^3}.
\end{aligned} \tag{5.16}$$

То же самое значение без учета эффекта блокировки вычисляется как:

$$\begin{aligned}
E[S] = & \frac{e^{-Kr_0} r_0^{-2}}{\alpha \lambda_I \Theta_1(R, r_B, K)} + \\
& + \frac{e^{-Kr_0} r_0^{-2} \left[\alpha \lambda_I \Phi_1(R, r_B, K) - \left[\alpha \lambda_I \Theta_1(R, r_B, K) \right]^2 \right]}{\left[\alpha \lambda_I \Theta_1(R, r_B, K) \right]^3}.
\end{aligned} \tag{5.17}$$

5.3. Трехмерный сценарий развёртывания

Разложение в ряд Тейлора

Используем разложение Тейлора для функции $g(x,y)=P_R/I$ для получения среднего значения величины SIR. Получаем приближения второго порядка на основе разложения $g(x,y)$ в окрестности $\vec{\mu} = (E[P_R], E[I]) = (\mu_{P_R}, \mu_I)$, что имеем

$$E[g(\bar{\mu})] \approx g(\bar{\mu}) + \frac{g''_{xx}(\bar{\mu})\sigma_{P_R}^2 + 2g''_{xy}K_{P_R,I} + g''_{yy}(\bar{\mu})\sigma_I^2}{2}, \quad (5.18)$$

где $K_{P_R,I}$ – ковариация между P_R и I , а $\sigma_{P_R}^2$ и σ_I^2 – дисперсии P_R и I , соответственно.

Наблюдая, что

$$g''_{xx}(x, y) = 0, g''_{x,y}(x, y) = -y^{-2}, g''_{yy}(x, y) = 2x / y^2, \quad (5.19)$$

мы приходим к следующему приближению

$$E[P_R / I] \approx \frac{\mu_{P_R}}{\mu_I} - \frac{K_{P_R,I}}{\mu_I^2} + \frac{\sigma_I^2 \mu_{P_R}}{\mu_I^3}. \quad (5.20)$$

Таким образом, в дополнение к параметрам, полученным в Главе 4 также необходимо определить два неизвестных – второй момент интерференции и ковариацию между принимаемым сигналом и интерференцией. Отметим, что в отличие от двухмерного сценария существует зависимость между этими с.в.

Нахождение неизвестных

Аналогично, двухмерному сценарию развертывания, второй момент суммарной интерференции получаются с использованием формулы Кэмпбелла, как показано в Главе 4. В частности, необходимо использовать следующее выражение при $n=2$:

$$E[I^n] = \int_0^{R_I} E[I_1^n(r)] p_C(r) [1 - p_B(r)] 2\lambda \pi r dr. \quad (5.21)$$

В формуле (5.21) $2\lambda \pi r dr$ – это вероятность того, что присутствует интерферирующее устройство в инфинитезимальном приращении окружности $p_C(r)$, что является вероятностью экспозиции. Величина $p_B(r)$ – вероятность возникновения блокировки линии ПВ некоторыми узлами Tx или Rx , а величина $E[I_1^n(r)]$ является моментом мешающего сигнала от одного источника помех, определенный расстоянием между интерферирующим источником и приемником.

Еще одним неизвестным, требующим определения, является ковариация между помехой и мощностью полезного сигнала. Для этого определим изначальное выражение через

$$K_{P_R, I} = E[P_R I] - \mu_{P_R} \mu_I, \text{ где } E[P_R I] = E \left[AX_0^{-\zeta} \sum_{i=1}^N AX_i^{-\zeta} \right], \quad (5.22)$$

X_0 – дистанция между двумя устройствами целевым передатчиком и приемником, $X_i, i=1, 2, \dots, N$ – расстояние между целевым приемником и i -м интерферирующим передатчиком, а N определяет число таких передающих устройств.

Применяя тождество Вальда имеем

$$E[P_R I] = A^2 E[N] E[(X_i X_0)^{-\zeta}], \quad (5.23)$$

где $E[N] = \lambda \pi R_I^2 p_C$, $E[(X_0 X_i)^\zeta]$ – неизвестные.

Записав $E[(X_0 X_i)^\zeta]$ следующим образом

$$E[\left[\frac{((H_R - H_T)^2 - r_0) \left[(H_R - H_I)^2 - r_i \right]^{\frac{\zeta}{2}}}{\left[(H_R - H_T)^2 - r_0 \right]^{\frac{\zeta}{2}} \left[(H_R - H_I)^2 - r_i \right]^{\frac{\zeta}{2}}} \right]} \quad (5.24)$$

где r_0 – константа, приходим к

$$\begin{aligned} E[P_R I] &= A^2 \lambda \pi R_I^2 p_C E[(X_i X_0)^{-\zeta}] = \\ &= \int_0^{R_I} \int_0^{R_T} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\left[(x_1 - x_2)^2 + x_5^2 \right]^{\frac{\zeta}{2}}}{\left[(x_1 - x_3)^2 + x_4^2 \right]^{\frac{\zeta}{2}}} f(x_1, \dots, x_5) dx_1 \dots dx_5, \end{aligned} \quad (5.25)$$

и $E[(X_0 X_i)^{-\zeta}]$ получается путем численного интегрирования.

Частные случаи модели

Отметим, что двухмерная модель является частным случаем трехмерной модели.

Предложенная трехмерная модель имеет ряд вычислительных сложностей. Известно, что простые модели наиболее подходят для приближения SIR в определенных диапазонах параметров системы.

Для таких моделей чувствительность и направленность антенн не будут такими высокими в силу малого числа антенных элементов. Но если ввести предположения, что все принимающие устройства оснащены всенаправленными антеннами, то можно упростить сложность вычислительных операций в исследуемых моделях. Между рассматриваемыми 3D-моделями и моделями, у которых имеются ненаправленные антенны, основное различие состоит в вероятности экспозиции. Вероятность горизонтальной экспозиции имеет вид $p_H(r) = \alpha/2\pi$. Вероятность вертикальной экспозиции также имеет упрощения.

Во многих исследуемых моделях высоты взаимодействующих объектов известны заранее, что значительно упрощает модель. Если же эти параметры высоты являются случайными, то аппроксимацию проводят с применением средних значений этих высот.

5.4. Численные примеры

В этом разделе представлены результаты численных экспериментов, показывающих средние значения соотношения сигнал-интерференция в разных условиях и типах сценариев развертывания. Графики получены на основе данных, описанных в предыдущих разделах.

Двухмерный сценарий развертывания

На Рис. 24 приведена зависимость отношения сигнал-интерференция от плотности интерферирующих узлов при наличии блокировки. Значение величины SIR снижается при росте количества интерферирующих узлов для всех исследуемых типов антенн как на передатчике, так и на приемнике. Отметим, что направленные антенны оказывают сильное влияние на значение SIR во всем диапазоне плотностей интерферирующих узлов.

Подведем промежуточные итоги, которые представлены на Рис. 24, на Рис. 25, иллюстрирующих зависимость отношения сигнал-интерференция от угла диаграммы. При анализе приведенных данных стоит отметить, что отношение сигнал-интерференция существенно улучшается при уменьшении угла диаграммы направленности. Иными словами, использование антенных систем с более высокой направленностью позволяет существенно улучшить отношение сигнал-интерференция на приемнике. Аналогичные зависимости наблюдаются и при отсутствии эффекта блокировки.

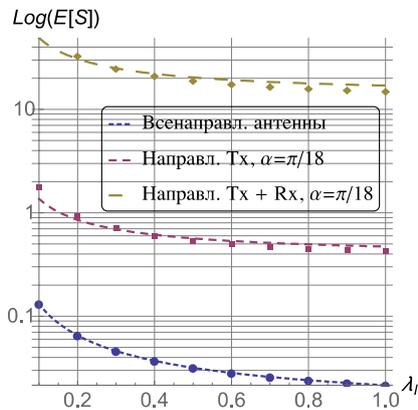


Рис. 24. Отношение сигнал-интерференция как функция от плотности интерферирующих узлов.

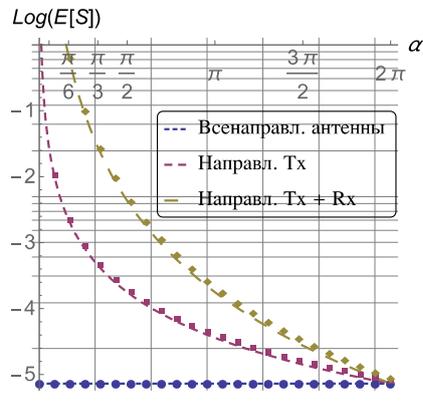


Рис. 25. Отношение сигнал-интерференция как функция от угла диаграммы направленности.

Трехмерный сценарий развертывания

Рассмотрим трехмерный сценарий развертывания и дадим оценку влияния параметров системы на значения SIR.

Известно, что 3D-модель легче интерпретировать через вычисление вертикальной экспозиции, так как иные методы

могут сопровождаться сложностью в вычислениях. На практике всегда полезно сравнивать менее сложную модель, с помощью которой можно предложить подходящее приближение. В этой секции определяем входящие параметры системы, что является частным случаем 3D-модели. Также рассматриваем различные комбинированные модели с определенными/случайными значениями высот (ФВ/СВ), которые могут учитывать вероятность вертикальной экспозиции (\pm ВЭ) или вовсе этим пренебречь. Таким образом, трехмерная модель определяется как СВ+ВЭ. Напомним, задействовав фиксированные высоты и/или исключая вертикальную экспозицию, позволяет нам не рассматривать численное интегрирование для p_V , что приводит более простому варианту моделирования.

Обратим внимание на Рис. 26-Рис. 28, на которых проиллюстрированы для разных типов моделей средние значения SIR в зависимости от двух параметров: вертикальной направленности антенн передатчиков, α_T , и интенсивности общающихся пар устройств, λ . На Рис. 26 заметим, что с ростом интенсивности общающихся пар снижается среднее значение SIR для всех рассмотренных моделей. Таким образом, выбранные модели качественно описывают поведение системы, при этом, на всем диапазоне λ никакие простые модели не обеспечивают такого точного приближения величины SIR.

Интересный факт в том, что 2D-модель полностью блокирует эффекты третьего измерения. Поэтому реальные характеристики величины SIR сильно переоценены. Такая особенность связана исключением фактических высот телекоммуникационных объектов, поэтому вероятность блокировки сильно возрастает и в итоге интерференция почти не создает помех целевому приемнику. Других модели, которые могут учесть параметры третьего измерения, могут недооценить характеристики величины SIR.

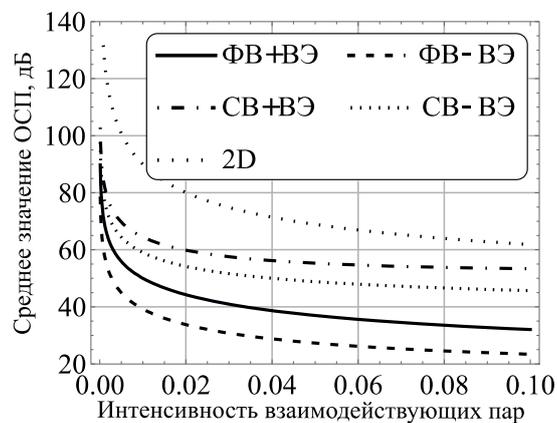


Рис. 26. Эффект изменения интенсивности пар.

Наиболее близкой к предложенной 3D-модели в допустимом диапазоне подходит модель, которая игнорирует вертикальную экспозицию и учитывает случайные высоты объектов. Модель, которая является наименее точной, не учитывает вертикальную экспозицию и имеет фиксированные высоты.

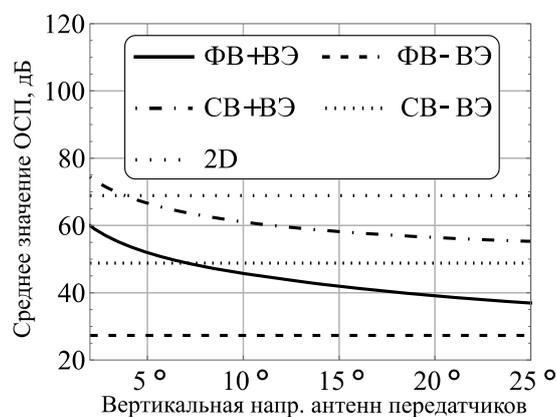


Рис. 27. Эффект изменения $\alpha_{T,V}$, $\alpha_{T,H} = 2^\circ$.

Обратим внимание на Рис. 27 и Рис. 28, на которых проиллюстрирована оценка вертикальной направленности антенн и предоставлены два значения горизонтальной направленности антенн передатчиков, $\alpha_{T,H}=2^\circ$ и $\alpha_{T,H}=25^\circ$ соответственно. Заметим, что для всех рассмотренных значений вертикальной направленности антенн, модели, которые имеют фиксированные высоты, выдают резкие отклонения от фактических средних значений величины SIR. Для двух значений антенн горизонтальной направленности эти отклонения составляют не менее 10 дБ. Анализируя Рис. 26, пришли к выводу, что модель, которая пренебрегает вероятностью вертикальной экспозиции, дает адекватное приближение при небольших значениях вертикальной направленности антенн в диапазоне (1° - 5°). Такое предположение верно до тех пор, пока направленность антенн довольно высока, примерно, составляет 20° или более. Другие оставшиеся модели недостаточно точно дают положительную оценки производительности системы.

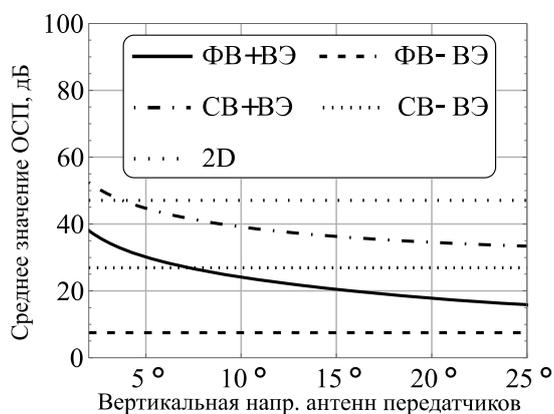


Рис. 28. Эффект изменения $\alpha_{T,V}$, $\alpha_{T,H}=25^\circ$.

Обратим внимание на двумерную модель, которая дает хорошую оценку верхней границы значения SIR на всем диапазоне входных параметров системы. Но модель с определен-

ными заранее известными высотами всегда дает оценку нижней границы значений SIR, хотя не учитывает вертикальную направленность. Разница между двумя такими моделями может составлять 60 дБ, следовательно, ни одна из моделей не может обеспечить точную границу оценки для производительности сети. Другие сложные модели с фиксированной высотой и наличием вертикальной направленности могут предоставить разумную аппроксимацию, хотя для некоторых определенных диапазонов входных параметров отклонение может составлять на более, чем 10 дБ от фактических значений SIR.

Представленные численные результаты и их анализ дополняют выводы, полученные в Главе 4. Напомним, что в нем были сделаны выводы по характеру изменения среднего значения интерференции. Если угол диаграммы направленности уменьшается, то среднее значение интерференции растет и падает при увеличении коэффициента абсорбции. Предложенные результаты должны дать монотонное уменьшение среднего значения величины SIR, если применимы антенны с широкой направленностью. Но стоит заметить, что при тщательном анализе, эффекты, полученные с распространением миллиметрового сигнала в 2D и 3D сценариях развертывания, оказывают сильное влияние на полезный сигнал, чем на интерференцию. Эти выводы подтверждаются результатами численного эксперимента.

Используя разработанную модель трехмерного сценария развертывания, детально исследовали величину SIR в зависимости от параметров системы. Заметим, случайность высот взаимодействующих устройств и вероятность экспозиции необходимы для точной оценки характеристик моделей 3D в сетях 5G NR. Простые 2D модели, основанные на результатах стохастической геометрии, всегда дают оптимистические данные, которые могут быть переоценены значения SIR на 20 дБ.

Подводя итог, следует отметить, что простейшим способом повышения отношения сигнал-интерференция в беспроводных сетях связи миллиметрового диапазона частот является использование антенн с высокой направленностью.

5.5. Упражнения

Задание 1.

Для двухмерной модели развёртывания рассчитайте мощность отношение сигнал-интерференция с блокировкой и без. Постройте график среднего значения интерференции как функции от дистанции между передатчиков и приемником. Сравните полученные результаты. В качестве параметров выберите следующие: горизонтальная направленность антенны - $\pi/18$, интенсивность блокирующих объектов – 1 объект на квадратный метр, коэффициент $A = 1$.

Задание 2.

Для двухмерной модели развёртывания рассчитайте отношение сигнал-интерференция с молекулярной абсорбцией и без. Постройте график среднего значения интерференции как функции от дистанции между передатчиков и приемником. Сравните полученные результаты. В качестве параметров выберите следующие: горизонтальная направленность антенны - $\pi/18$, интенсивность блокирующих объектов – 1 объект на квадратный метр, коэффициент $A = 1$. Сделайте вывод о том, следует ли учитывать молекулярную абсорбцию.

Учебно-методический комплекс

Рекомендуется для направлений подготовки

02.04.02 – Фундаментальная информатика и
информационные технологии

Квалификация (степень) выпускника: магистр

Программа дисциплины

1. Цели и задачи дисциплины

Целью дисциплины «Анализ информационных технологий» является освоение учащимися навыков моделирования беспроводных сетей 5G New Radio (5G NR).

Для достижения цели решаются следующие задачи:

- Оценивание характеристик производительности сетей доступа 5G New Radio;
- Формирование устойчивых навыков решения задач математического моделирования и постановки модельного компьютерного эксперимента.

2. Место дисциплины в структуре ОП ВО

Дисциплина относится к базовой части блока 1 «Дисциплины (модули)» учебного плана по направлению 02.04.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии».

В табл. П.1 приведены предшествующие и последующие дисциплины, направленные на формирование компетенций обучающегося.

Таблица П.1

**Предшествующие и последующие дисциплины,
направленные на формирование компетенций**

№ п/п	Шифр компетенции	Предшествующие дисциплины	Последующие дисциплины (группы дисциплин)
Общекультурные компетенции			
1.	УК: 1	—	Математические основы защиты информации и информационной безопасности, Дизайн интерактивных

			систем, Язык теории категорий в искусственном интеллекте, Карта процессов и информационная модель управления телекоммуникациями, Анализ информационных технологий
Общепрофессиональные компетенции			
1.	ОПК: 1, 2, 3	—	Современная философия и методология науки, Математические основы защиты информации и информационной безопасности, Управление качеством и вероятностные модели функционирования сетей связи следующего поколения, Дизайн интерактивных систем, Теория алгоритмов, Современные концепции инфокоммуникаций, Технологии вычислительного эксперимента, Анализ информационных технологий
Профессиональные компетенции — производственно-технологическая деятельность			
1.	ПК-1	—	Современная философия и методология науки, Дискретные вероятностные модели, Математическая теория телетрафика, Дизайн интерактивных систем, Научное программирование, Технологии вычислительного эксперимента, Анализ информационных технологий
Профессионально-специализированные компетенции специализации			
1.		—	—

3. Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций для направления 02.04.02:

- УК-1; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-3; ПК-1.

УК-1. Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий.

ОПК-1. Способен находить, формулировать и решать актуальные проблемы прикладной математики, фундаментальной информатики и информационных технологий

ОПК-2. Способен применять компьютерные/суперкомпьютерные методы, современное программное обеспечение (в том числе отечественного производства) для решения задач профессиональной деятельности.

ОПК-3. Способен проводить анализ математических моделей, создавать инновационные методы решения прикладных задач профессиональной деятельности в области информатики и математического моделирования.

ПК-1. Проведение работ по обработке и анализу научно-технической информации и результатов исследований

В результате изучения дисциплины студент должен:

Знать:

- основные понятия и определения, относящиеся к концепции информационных технологий;
- основные типы стандартов, их жизненный цикл, современное отраслевые стандарты, подходы к проектированию сложных информационных систем на базе с использованием современных информационных технологий;
- архитектуру беспроводных сетей стандарта 5G.

Уметь:

- находить описание и разбираться в современных информационных технологиях;
- обосновывать применение технологий при проектировании беспроводной сети в зависимости от постановки задач.

Владеть:

- шаблонами проектирования современных систем, нотациями для описания дизайна и процессов, протекающих в современных информационных системах;
- навыками проектирования беспроводных коммуникационных систем;
- терминологией в области беспроводных коммуникационных технологий.

4. Объем дисциплины и виды учебной работы

Общая трудоёмкость дисциплины для направления составляет 5 зачётных единиц.

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры
		1
Аудиторные занятия (всего)	36	36
В том числе:	-	-
<i>Лекции</i>	18	18
<i>Практические занятия (ПЗ)</i>		
<i>Семинары (С)</i>		
<i>Лабораторные работы (ЛР)</i>	18	18
Самостоятельная работа (всего)	117	117
Подготовка и сдача контрольного мероприятия	27	27
Общая трудоёмкость час	180	180
зач. ед.	5	5

5. Содержание дисциплины

5.1. Содержание разделов дисциплины

Раздел 1. Архитектура сетей доступа 5G NR.

Тема 1.1. Гетерогенность, требования к обслуживанию, услуги (URLLC/eMBB/mMTC), стандартизация сетей 5G.

Раздел 2. Модели компонентов сетей связи 5G NR и методология оценки базовых характеристик систем 5G NR

Тема 2.1 Двухмерные и трехмерные сценарии

Тема 2.2. Модели компонентов: размещения пользователей, распространения сигнала, антенн, блокировки в двух и трехмерных сценариях

Тема 2.3. Понятие SIR, функциональные преобразования случайных величин, примеры на основе прямого взаимодействия устройств

Раздел 3. Оценка базовых характеристик систем 5G NR

Тема 3.1. Общая модель на основе случайных полей, статическая модель блокировки.

Тема 3.2. Вероятность экспозиции, вероятность экспозиции совместно с вероятностью блокировки.

Тема 3.3. Оценка помехи, использование формулы Кэмпбелла для оценки помехи.

Тема 3.4. Анализ помехи для других типов антенн, применение антенн с дополнительными потерями мощности.

Тема 3.5. Оценка SIR, математические выражения для SIR, варианты решения, решение разложением в ряд Тейлора, формула Шеннона, спектральной эффективности.

5.2. Разделы дисциплин и виды занятий

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Лекц.	Лаб. зан.	СРС	Конт роль	Всего час.
1.	Архитектура сетей доступа 5G New Radio	2	2	17	4	25
2.	Модели компонентов сетей связи 5G NR и методология оценки базовых характеристик систем 5G NR	6	6	40	8	60
3.	Оценка базовых характеристик систем 5G New Radio	10	10	60	15	95
Итого:		18	18	117	27	180

6. Лабораторный практикум

Раздел 1. Архитектура сетей доступа 5G NR

Лабораторная работа 1. Изучение инструментальной среды имитационного моделирования для исследования характеристик беспроводных сетей стандарта 5G.

Лабораторная работа 2. Методы оценки статических характеристик, связанных с распределением пользователей на плоскости.

Раздел 2. Модели компонентов сетей связи 5G NR и методология оценки базовых характеристик систем 5G NR

Лабораторная работа 3. Исследование распределений и моментов связанных с преобразованием случайных величин

Лабораторная работа 4. Исследование моделей размещения пользователей и распространения сигнала

Лабораторная работа 5. Исследование вероятности экспозиции совместно с вероятностью блокировки на основе модели антенн.

Раздел 3. Оценка базовых характеристик систем 5G New Radio.

Лабораторная работа 6. Построение общей модели на основе случайных полей и статической модели блокировки.

Лабораторная работа 7. Построение моделей помех с применением формулы Кэмпбелла.

Лабораторная работа 8. Анализ помех для разных типов антенн.

Лабораторная работа 9. Исследование спектральной эффективности и скорости.

7. Практические занятия (семинары)

Практические занятия (семинары) не предусмотрены.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Мультимедийная аудитория для проведения лекционных занятий. Компьютерные (дисплейные) классы с доступом к сети Интернет и электронно-образовательной среде Университета для выполнения обучающимися лабораторных работ по дисциплине, самостоятельной работы и компьютерного тестирования обучающихся (при необходимости).

9. Информационное обеспечение дисциплины

а) программное обеспечение:

ОС Linux, офисный пакет LibreOffice (лицензия MPL-2.0), ПО для просмотра pdf (например, evince (лицензия GPL-2+ CC-BY-SA-3.0)), интерпретатор Python версии 3.5, компилятор языка C/C++ gcc (лицензия GPL-3+ LGPL-3+ || (GPL-3+ libgcc libstdc++ gcc-runtime-library-exception-3.1) FDL-1.3+), app-editors/jedit (лицензия BSD GPL-2), javac, app-shells/bash (лицензия GPL-3) app-editors/vim (лицензия vim), app-editors/gedit (лицензия GPL-2+ CC-BY-SA-3.0).

б) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы:

- Сайт библиотеки РУДН <http://lib.rudn.ru/>
- ТУИС <http://esystem.pfur.ru/>
- IETF <https://www.ietf.org/rfc.html>
- 3GPP <https://www.3gpp.org>

10. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

а) основная литература

1. *Левин Б. Р.* Теоретические основы статистической радиотехники / Левин, Б. Р. – Советское радио, 1976.
2. *Молчанов Д.А.* Оценка отношения сигнал-шум в беспроводных сетях доступа пятого поколения. / Д.А. Молчанов, Р.Н. Ковальчуков, А.Я. Ометов, и др. // Электросвязь. — 2019, — № 9, — С. 37–44. — 0.92 / 0.45 п.л.
3. *Молчанов Д.А.* Анализ интерференции в беспроводных сетях связи терагерцового диапазона частот. / В.И. Петров, Д.А. Молчанов, Е.А. Кучерявый, // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика.

Телекоммуникации. Управление. — 2017, — Т. 10, № 1, — С. 27–36. — 1,27 / 0,66 п.л.

4. Молчанов Д.А. Оценка отношения сигнал/помеха в беспроводных сетях связи терагерцового диапазона частот / В.И. Петров, Д.А. Молчанов, Е.А. Кучерявый, // Электросвязь. — 2017. — № 10. — С. 24-29. — 0,43 / 0,17 п.л.

5. Современные информационные каналы и системы связи: учебник / В.А. Майстренко, А.А. Соловьев, М.Ю. Пляскин, А.И. Тихонов ; Минобрнауки России, Омский государственный технический университет, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Академия военных наук Российской Федерации. - Омск : Издательство ОмГТУ, 2017. - 452 с. : табл., граф., схем., ил. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-8149-2458-2 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493441>

6. Мультисервисные сети связи [Текст/электронный ресурс]: Учебно-методический комплекс / К.Е. Самуйлов, П.О. Абаев. - Электронные текстовые данные. - М. : Изд-во РУДН, 2013. - 363 с. - ISBN 978-5-209-05014-8 : 389.82. - http://lib.rudn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=Rudn_FindDoc&id=403183&idb=0

7. Мицель А.А., Катаев М.Ю., Математическое и имитационное моделирование: Методические указания к выполнению практических работ по курсу «Математическое и имитационное моделирование» для студентов, обучающихся по направлению 09.03.03 «Прикладная информатика» всех форм обучения. Юрга: Изд-во ЮТИ(филиал)ТПУ, 2016. – 110 с.

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

б) дополнительная литература

1. *Бегишев В.О., Сопин Э.С., Молчанов Д.А., Самуйлов А.К., Гайдамака Ю.В., Самуйлов К.Е.* // статья: Оценка эффективности механизма резервирования полосы пропускания для технологии mmWave в сетях связи пятого поколения, изд-во: Информационно-управляющие системы, № 5 (102), 2019 г., стр. 51 – 63. DOI <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-5-51-63>.
2. *Молчанов Д.А.* Моделирование отношения сигнал/интерференция в мобильной сети со случайным блужданием взаимодействующих устройств / Ю.В. Гайдамака, Ю.Н. Орлов, Д.А. Молчанов, и др. // Информатика и её применения. — 2017. — Т.11, №2, — С. 50–58. — 1,03 / 0,64 п.л.
3. *Молчанов Д.А.* Оценка характеристик интерференции при взаимодействии беспроводных устройств в смежных помещениях прямоугольной формы. / Ю.В. Гайдамака, А.К. Самуйлов, В.О. Бегишев и др. //Т-Comm. Связь. — 2015, — Т. 10, № 11, — С. 41–45. — 0,58 / 0,33 п.л.
4. *Молчанов Д.А.* Анализ пропускной способности и характеристик частотного спектра в сетях связи сверхмалого радиуса действия в терагерцовом диапазоне / Боронин П.Н., Кучерявый Е.А., Молчанов Д.А. // Электросвязь. — 2014. — № 11. — С. 18-21. — 0,32 / 0,15 п.л.
5. *Кисель Н.Н.* Моделирование распространения радиоволн в пакете Wireless InSite : учебное пособие / Н.Н. Кисель ; Министерство науки и высшего образования РФ, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Инженерно-технологическая академия. - Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2018. - 108 с. : ил. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-9275-2698-7 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=499698>

6. Бочаров П. П. Теория массового обслуживания : учебник для вузов / П. П. Бочаров, А. В. Печинкин. - Москва: Изд-во РУДН, 1995. [Электронный ресурс]. - URL: <http://elib.pstu.ru/vufind/Record/RUPSTUbooks27620>
7. Rappaport T. S. et al. Wireless communications: principles and practice. – New Jersey: prentice hall PTR, 1996. – Т. 2.
8. Andrews, Jeffrey G., et al. "Femtocells: Past, present, and future." IEEE Journal on Selected Areas in Communications 30.3 (2012): 497-508.

11. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Учебным планом на изучение дисциплины отводится 1 семестр (модуль). В течение указанного периода проводятся лекционные и лабораторные работы. Итоговая оценка составляется по набранным за семестр (модуль) баллам.

11.1 Методические указания по самостоятельному освоению теоретического материала по дисциплине

Лекционный материал дисциплины охватывает темы, указанные в разделе 5.1 программы дисциплины. В ТУИС (<http://esystem.pfur.ru>) по темам лекций размещены презентации. Рекомендуется по указанным темам в дополнение к презентациям изучить литературу, указанную в п. 10 программы дисциплины.

11.2 Методические указания по выполнению лабораторных работ

Задания по лабораторным работам выполняются индивидуально каждым студентом в дисплейных классах в соответствии с календарным планом и методическими указаниями по выполнению лабораторных работ по дисциплине. Часть ла-

бораторных работ предусматривает задания для индивидуальной самостоятельной работы студента, обязательные для выполнения. Выполнение заданий для самостоятельной работы позволяет студенту приобрести дополнительные навыки и закрепить знания по изучаемой теме.

По результатам выполнения каждой лабораторной работы студентом готовится отчёт. Отчёты в электронном виде сдаются студентом на проверку через соответствующие разделы ТУИС (<http://esystem.pfur.ru>)

Паспорт фонда оценочных средств

Балльно-рейтинговая система оценки уровня знаний

Код компетенции	Раздел	Формы контроля уровня освоения ООП		Баллы темы	Баллы раздела
		Аудиторная работа	СНС		
		Выполнение ЛР	Экзамен		
УК-1, ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ПК-1	Архитектура сетей доступа 5G New Radio	5	5	10	10
	Модели компонентов сетей связи 5G NR и методология оценки базовых характеристик систем 5G NR	25	7	32	32
	Оценка базовых характеристик систем 5G New Radio	50	8	58	58
Всего		80	20	100	100

Таблица соответствия баллов и оценок

Баллы БРС	Традиционные оценки РФ	Оценки ECTS
95-100	5	A
86-94		B
69-85	4	C
61-68	3	D
51-60		E
31-50	2	FX
0-30		F
51-100	Зачет	Passed

Правила применения БРС

1. Раздел (тема) учебной дисциплины считается освоенным, если студент набрал более 50% от возможного числа баллов по этому разделу (теме).
2. Студент не может быть аттестован по дисциплине, если он не освоил все темы и разделы дисциплины, указанные в сводной оценочной таблице дисциплины.
3. По решению преподавателя и с согласия студентов, не освоивших отдельные разделы (темы) изучаемой дисциплины, в течение учебного семестра могут быть повторно проведены мероприятия текущего контроля успеваемости или выданы дополнительные учебные задания по этим темам или разделам. При этом студентам за данную работу засчитывается минимально возможный положительный балл (51% от максимального балла).
4. При выполнении студентом дополнительных учебных заданий или повторном прохождении мероприятий текущего контроля полученные им баллы засчитываются за конкретные темы. Итоговая сумма баллов не может превышать максимальное количество баллов, установленное по данным темам (в соответствии с приказом Ректора

№ 564 от 20.06.2013). По решению преподавателя предыдущие баллы, полученные студентом по учебным заданиям, могут быть аннулированы.

5. График проведения мероприятий текущего контроля успеваемости формируется в соответствии с календарным планом курса. Студенты обязаны сдавать все задания в сроки, установленные преподавателем.
6. Время, которое отводится студенту на выполнение мероприятий текущего контроля успеваемости, устанавливается преподавателем. По истечении отведённого времени студент должен сдать работу преподавателю, вне зависимости от того, завершена она или нет.
7. Использование источников (в том числе конспектов лекций и лабораторных работ) во время выполнения контрольных мероприятий возможно только с разрешения преподавателя.
8. Отсрочка в прохождении мероприятий текущего контроля успеваемости считается уважительной только в случае болезни студента, что подтверждается наличием у него медицинской справки, заверенной круглой печатью в поликлинике № 25, предоставляемой преподавателю не позднее двух недель после выздоровления. В этом случае выполнение контрольных мероприятий осуществляется после выздоровления студента в срок, назначенный преподавателем. В противном случае отсутствие студента на контрольном мероприятии признается неуважительным.
9. Студент допускается к итоговому контролю знаний с любым количеством баллов, набранных в семестре.
10. Итоговый контроль знаний оценивается из 20 баллов, независимо от числа баллов за семестр.
11. Если в итоге за семестр студент получил менее 31 балла, то ему выставляется оценка F и студент должен повторить эту дисциплину в установленном порядке. Если же в итоге студент получил 31–50 баллов, т. е. FX, то студенту

разрешается добор необходимого (до 51) количества баллов путём повторного одноразового выполнения предусмотренных контрольных мероприятий, при этом по усмотрению преподавателя аннулируются соответствующие предыдущие результаты. Ликвидация задолженностей проводится в период с 07.02 по 28.02 (с 07.09 по 28.09) по согласованию с деканатом.

Критерии оценки по дисциплине

95-100 баллов:

- полное и своевременное выполнение на высоком уровне лабораторных работ с оформлением отчётов, успешное прохождение контрольных мероприятий, предусмотренных программой курса;
- систематизированное, глубокое и полное освоение навыков и компетенций по всем разделам программы дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответов на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- безупречное владение программным обеспечением, умение эффективно использовать его в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- выраженная способность самостоятельно и творчески решать поставленные задачи;
- полная самостоятельность и творческий подход при изложении материала по программе дисциплины;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной программой дисциплины и преподавателем.

86–94 балла:

- полное и своевременное выполнение на хорошем уровне лабораторных работ с оформлением отчётов, успешное прохождение контрольных мероприятий, предусмотренных программой курса;
- систематизированное, глубокое и полное освоение навыков и компетенций по всем разделам программы дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- хорошее владение программным обеспечением, умение эффективно использовать его в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно решать поставленные задачи в нестандартных производственных ситуациях;
- усвоение основной и дополнительной литературы, нормативных и законодательных актов, рекомендованных программой дисциплины и преподавателем.

69–85 баллов:

- своевременное выполнение на хорошем уровне лабораторных работ с оформлением отчётов, прохождение контрольных мероприятий, предусмотренных программой курса;
- хороший уровень культуры исполнения лабораторных работ;
- систематизированное и полное освоение навыков и компетенций по всем разделам программы дисциплины;
- владение программным обеспечением, умение использовать его в постановке и решении научных и профессиональных задач;

- способность самостоятельно решать проблемы в рамках программы дисциплины;
- усвоение основной литературы.

51–68 баллов:

- выполнение на удовлетворительном уровне лабораторных работ с оформлением отчётов, прохождение контрольных мероприятий, предусмотренных программой курса;
- систематизированное и полное освоение навыков и компетенций по всем разделам программы дисциплины;
- удовлетворительное владение программным обеспечением, умение использовать его в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность решать проблемы в рамках программы дисциплины;
- удовлетворительное усвоение основной литературы;

31–50 баллов, НЕ ЗАЧТЕНО:

- невыполнение, несвоевременное выполнение или выполнение на неудовлетворительном уровне лабораторных работ, непрохождение контрольных мероприятий, предусмотренных программой курса;
- недостаточно полный объём навыков и компетенции в рамках программы дисциплины;
- неумение использовать в практической деятельности научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными стилистическими и логическими ошибками;
- слабое владение программным обеспечением по разделам программы дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) производственных задач;
- способность решать проблемы в рамках программы дисциплины;

- удовлетворительное усвоение основной литературы.

0-30 баллов, НЕ ЗАЧТЕНО:

- отсутствие умений, навыков, знаний и компетенций в рамках программы дисциплины;
- невыполнение лабораторных заданий, непрохождение контрольных мероприятий,
- предусмотренных программой курса; отказ от ответов по программе дисциплины;
- игнорирование занятий по дисциплине по неуважительной причине.

Примерный перечень оценочных средств

Учебным планом на изучение дисциплины отводится один семестр (модуль). В дисциплине предусмотрены лекции, лабораторный практикум, контрольные мероприятия по проверке отчётов по лабораторным работам.

Оценивание результатов освоения дисциплины осуществляется в соответствии с балльно-рейтинговой системой. По дисциплине предусмотрен экзамен.

п/п	Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
<i>Аудиторная работа</i>			
1.	Лабораторная работа	Система практических заданий, направленных на формирование практических навыков у обучающихся	Фонд практических заданий
2.	Экзамен	Оценка работы студента в течение семестра (года, всего срока обучения и др.) и призван выявить уровень, прочность и систематичность	Комплект заданий для экзамена

		полученных им теоретических и практических знаний, приобретения навыков самостоятельной работы, развития творческого мышления, умение синтезировать полученные знания и применять их в решении практических задач.	
<i>Самостоятельная работа</i>			
3.	Подготовка отчётов по результатам выполнения лабораторных работ	Форма проверки качества выполнения студентами лабораторных работ в соответствии с утверждённой программой	Фонд практических заданий в рамках лабораторного практикума по дисциплине

Критерии оценки выполнения заданий по лабораторным работам

Оценка работы студента в течение семестра выставляется по сумме набранных баллов за лабораторные работы и итоговый контроль (экзамен).

Предлагаются к выполнению 9 лабораторных работ (5, 5, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, в сумме 80 баллов) и сдача экзамена на 20 баллов. Задания и отчеты по лабораторным работам выполняются и готовятся студентом самостоятельно (индивидуально), на лабораторном занятии студент может получить консультацию и методические указания от преподавателя.

Итоговый контроль (экзамен) по дисциплине проводится в форме компьютерного тестирования. При необходимости может проводиться экзамен в устной (или письменной) форме по билетам.

Сведения об авторах

Самуйлов Константин Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной информатики и теории вероятностей РУДН.

Молчанов Дмитрий Александрович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной информатики и теории вероятностей РУДН.

Самуйлов Андрей Константинович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной информатики и теории вероятностей РУДН.

Бегишев Вячеслав Олегович — кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры прикладной информатики и теории вероятностей РУДН.

Учебное издание

**Молчанов Дмитрий Александрович
Бегишев Вячеслав Олегович
Самуйлов Андрей Константинович
Самуйлов Константин Евгеньевич**

**МОДЕЛИ
И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК
СЕТЕЙ СВЯЗИ 5G**

Издание подготовлено в авторской редакции

Технический редактор *Н.А. Ясько*

Тематический план изданий учебно-методической литературы
2020 г., № 26

Подписано в печать 10.09.2020 г. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 5,58. Тираж 100 экз. Заказ 870.

Российский университет дружбы народов
115419, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Типография РУДН
115419, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, тел. (495) 952-04-41