

С. М. Федоров, И. А. Черноиваненко

СИСТЕМЫ И СЕТИ СВЯЗИ С ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Лабораторный практикум



Воронеж 2021

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

С. М. Федоров, И. А. Черноиваненко

**СИСТЕМЫ И СЕТИ СВЯЗИ
С ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

Лабораторный практикум

Воронеж 2021

УДК 621.391 (076)
ББК 32.88я7
Ф33

Рецензенты:

*кафедра основ радиотехники и электроники
Воронежского института ФСИИ России
(начальник кафедры канд. техн. наук, доц. Р. Н. Андреев);
кафедра информационной безопасности и систем связи
Международного института компьютерных технологий
(г. Воронеж)
(зав. кафедрой канд. техн. наук, доц. О. С. Хорпьяков)*

Федоров, С. М.

Системы и сети связи с подвижными объектами: лабораторный практикум [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные
Ф33 (1,7 Мб) / С. М. Федоров, И. А. Черноиваненко. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2021. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7731-0961-7

Лабораторный практикум содержит материалы и задания для проведения лабораторных занятий по дисциплине «Системы и сети связи с подвижными объектами».

В работе излагаются основные теоретические сведения о сетях связи с подвижными объектами в радиотехнических системах, приводится описание используемых прикладных программ, указания и рекомендации по выполнению лабораторных работ.

Издание предназначено для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» (специализация «Радиоэлектронные системы передачи информации»).

Ил. 37. Табл. 10. Библиогр.: 14 назв.

**УДК 621.391 (076)
ББК 32.88я7**

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ISBN 978-5-7731-0961-7

© Федоров С. М.,
Черноиваненко И. А., 2021
© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2021

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сети мобильной связи являются наиболее распространенным способом общения людей друг с другом из-за их гибкости использования в любом месте и в любое время. Они начинались как двухсторонние радиосистемы, а затем развивались для достижения мобильных сетей с помощью технологий 4G, которые передают высококачественную информацию.

Цель учебного издания – подготовить студентов к пониманию теоретических и практических вопросов по основным разделам дисциплины «Системы и сети связи с подвижными объектами».

Для правильного выполнения лабораторных работ студенту необходимо изучить теоретический материал, изложенный на лекционных занятиях и в рекомендованной учебной литературе, а затем рассмотреть материал данного учебного издания.

В учебном издании представлено 6 лабораторных работ по исследованию основных технических характеристик систем и сетей связи с подвижными объектами (ССПО) и способов их обеспечения, энергетических показателей ССПО при высокоподнятых антеннах и влияния на них параметров земной поверхности, основных способов распространения радиоволн, системы сотовой связи стандарта GSM-900, основных технических характеристик спутниковых систем связи.

Каждая лабораторная работа содержит краткие теоретические сведения, лабораторное задание, методические указания по их выполнению, требования к отчету, а также список контрольных вопросов к этим заданиям.

По всем работам необходимо подготовить отчеты, содержащие цель работы, кратко описанное теоретическое содержание изучаемого явления, исходные данные для расчета, результаты расчетов, выполненных в ходе лабораторного исследования и краткие выводы по результатам работы.

Авторы постарались выдержать доступность и лаконичность изложения основных теоретических сведений и лабораторных заданий, необходимых для успешного освоения дисциплины и получения студентами практических умений при изучении систем и сетей связи.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СЕТИ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 5G

Экспоненциальный рост услуг беспроводной передачи данных, обусловленный мобильным Интернетом и интеллектуальными устройствами, привел к исследованию сотовой сети 5G. Сети 5G будут поддерживать мультимедийные приложения с широким разнообразием требований, включая более высокие скорости передачи данных, уменьшенную задержку, улучшенное покрытие внутри помещений, а также повышенную энергоэффективность.

Основные технологии и подходы для удовлетворения требований к системам 5G можно классифицировать следующим образом [1-2]:

- уплотнение существующих сотовых сетей за счет массового добавления малых ячеек и обеспечения одноранговой (P2P) связи (например, межсетевого взаимодействия [D2D] и межмашинного взаимодействия [M2M] с поддержкой многоуровневых гетерогенных сетей);
- одновременная передача и прием (например, полнодуплексная [FD] связь);
- технологии связи с несколькими входами и выходами (MIMO) и миллиметрового диапазона (миллиметровые волны);
- повышение энергоэффективности за счет обмена информацией и сбора энергии;
- облачная сеть радиодоступа (C-RAN);
- виртуализация беспроводных ресурсов.

Особенности и требования сетей 5G и соответствующих технологий представлены в табл. 1.

Таблица 1

Особенности и требования сетей 5G

Особенности сетей 5G	Требования и тенденции
Повышение емкости и пропускной способности, высокая скорость передачи данных (увеличение пропускной способности примерно в 1000 раз по сравнению с 4G, скорость передачи данных 10 Гбит / с)	Использование разных диапазонов (например, связь миллиметровых волн с использованием диапазонов 28 ГГц и 38 ГГц), многоуровневая сеть, связь D2D, C-RAN, Massive-MIMO
Уменьшенная задержка (сквозные задержки 2-5 миллисекунд)	Полнодуплексная связь, связь C-RAN, D2D
Уплотнение сети (в 1000 раз больше мобильных данных на единицу площади, в 100-10000 раз больше подключаемых устройств)	Гетерогенная и многоуровневая сеть

Расширенные сервисы и приложения (например, умный город, сервисно-ориентированное общение)	C-RAN, виртуализация сети, связь M2M
Повышенная энергоэффективность (срок службы батареи увеличится примерно в 10 раз)	Беспроводная зарядка, сбор энергии
Автономные приложения и управление сетью, Интернет вещей	M2M, самоорганизация и когнитивная сеть

Сети 5G будут состоять из узлов с неоднородными характеристиками и емкостями (например, макросоты, малые соты, пользовательское оборудование D2D [UE]), что приведет к многоуровневой архитектуре. Из-за возрастающей сложности управления сетью и согласования между несколькими сетевыми уровнями узлы будут иметь возможность самоорганизации (например, автономная балансировка нагрузки, минимизация помех, распределение спектра, адаптация мощности) [1]. Кроме того, UE может иметь одновременные активные соединения с более чем одной базовой станцией (BS) или точкой доступа (AP) с использованием одинаковых или разных технологий радиодоступа (RAT). Гетерогенные узлы (например, UE, BS, интеллектуальные машины, носимые устройства) могут быть интегрированы через единую сеть для обеспечения бесшовного подключения. Эффективность связи в системах 5G будет улучшена за счет включения таких методов, как совместная передача и прием координированной многоточечной связи (CoMP), сетевое устранение и подавление помех, повторное использование спектра, а также трехмерное или полномерное MIMO. Кроме того, предполагается использование большого количества удаленных радиоголовок (RRH), подключенных к центральным узлам обработки (например, облакам) [2].

В связи с появлением новых технологий энергосберегающей связи FD и виртуализации спектра, архитектуры устройств 5G будут более сложными, чем архитектуры систем 4G. Устройства в сетях 5G должны работать в нескольких диапазонах спектра, от радиочастот (RF) до миллиметровых волн, при этом быть обратно совместимыми (например, с существующими технологиями, такими как 3G и 4G). Из-за энергоемких мультимедийных приложений энергоэффективность будет важной характеристикой для пользователей 5G, и, следовательно, желательно, чтобы в устройствах были интегрированы технологии сбора энергии [2]. Необходимость поддержки нескольких RAT, связи FD и сбора энергии создаст множество проблем при проектировании и тестировании внутренних микросхем и интерфейсных модулей для устройств 5G.

ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОТОВЫХ СЕТЕЙ 5G

Плотные гетерогенные сети

Как показано на рис. 1, сотовая связь 5G будет многоуровневой гетерогенной сетью, состоящей из макроячеек и большого количества узлов с низким энергопотреблением (таких как небольшие соты, реле, удаленные радиоголовки), вместе с обеспечением для связи P2P (например, D2D и M2M).

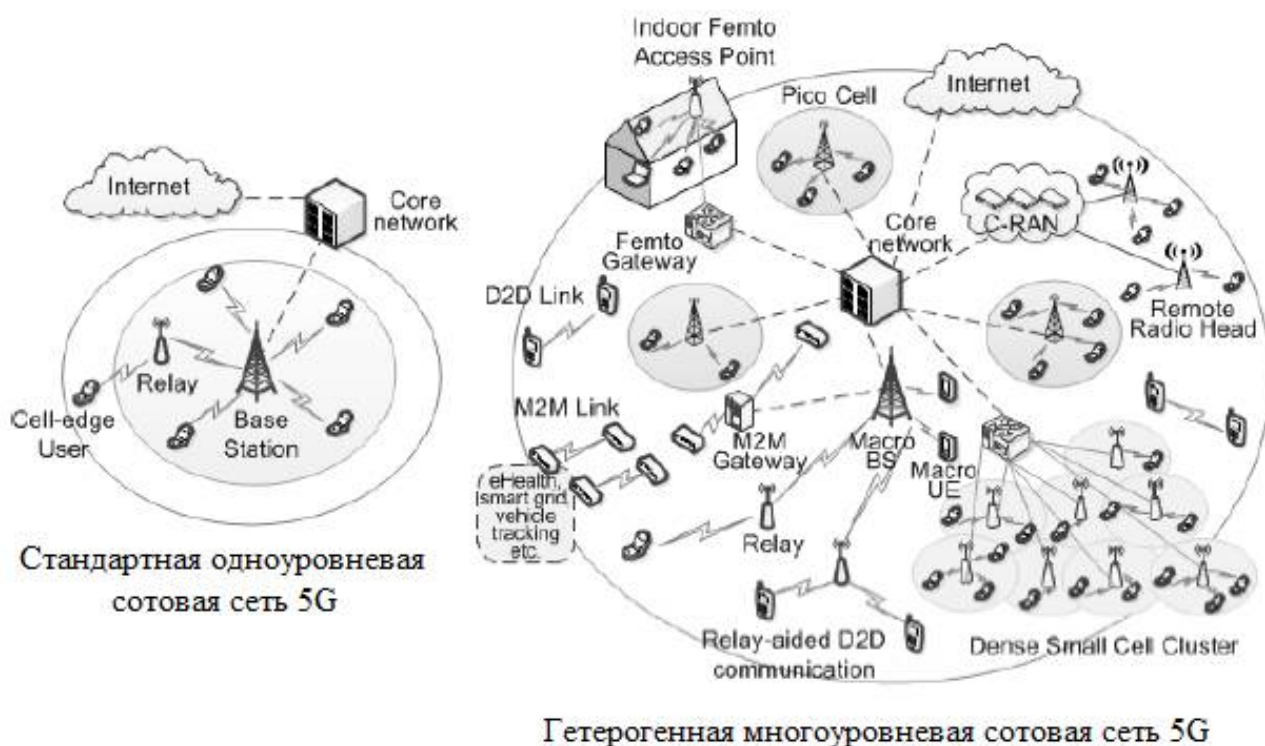


Рис. 1. Стандартная одноуровневая и гетерогенная многоуровневая сотовая сети 5G

Развертывание гетерогенных узлов в системах 5G будет иметь гораздо более высокую плотность, чем современные одноуровневые сети [3]. Неоднородность различных классов BS обеспечивает гибкую зону покрытия и улучшает спектральную эффективность. Уменьшая размер ячейки, спектральная эффективность повышается за счет более частого повторного использования спектра. Кроме того, покрытие можно улучшить, развернув небольшие соты внутри помещений. Беспроводная связь P2P, лежащая в основе сотовой архитектуры, может значительно увеличить общий спектр и энергоэффективность сети. Кроме того, управляемая сетью связь P2P в системах 5G позволит другим узлам (ретранслятор, шлюз M2M) управлять связью между узлами P2P. Учитывая, что межуровневые и внутриуровневые помехи хорошо регулируются, использование нескольких уровней в архитектуре сотовой сети обеспечит лучшую произ-

водительность с точки зрения покрытия, пропускной способности, спектральной эффективности и энергопотребления [4].

Полнодуплексная связь

В схеме связи FD приемопередатчик способен передавать и принимать на одной и той же частоте одновременно. Обычно предполагалось, что беспроводной узел не может декодировать принятый сигнал, когда он одновременно передает в той же полосе частот из-за внутренних помех между схемами передатчика и приемника, что называется самоинтерференцией (SI). Однако с последними достижениями в области антенн и цифровых технологий основной полосы частот, а также методов подавления радиопомех, можно создавать внутрисполосные радиостанции FD. Связь FD может удвоить спектральную эффективность на физическом уровне за счет удаления отдельной полосы частот или временного интервала для передачи как по восходящей, так и по нисходящей линии связи. Системы FD могут обеспечивать значительно более высокие скорости передачи данных, чем обычные полудуплексные (HD) системы связи. Технология FD также может решить проблемы в существующих беспроводных сетях, такие как скрытые терминалы, потеря пропускной способности из-за перегрузки и большие сквозные задержки [2]. Например, схема связи FD может уменьшить задержку путем одновременного приема сигналов обратной связи от приемника во время передачи. Связь FD также позволяет беспроводному узлу, такому как BS, выполнять передачу энергии RF при приеме передач по восходящей линии связи от UE [5].

Одним из возможных подходов к минимизации самоинтерференции в радиостанциях FD является сочетание методов подавления антенных, радиочастотных и цифровых помех. Например, пусть сигнал передачи будет разделен между двумя передающими антеннами. Для конкретной длины волны λ две передающие антенны размещаются в точках d и $\frac{\lambda}{2} + d$ от приемной антенны. Следовательно, смещая два передатчика на половину длины волны, мы можем позволить сигналам деструктивно складываться. В результате антенна приемника принимает гораздо более слабый сигнал (например, с меньшими собственными помехами) по сравнению с любым одним из сигналов локальной передачи. В методе подавления радиочастотных помех микросхема шумоподавления может удалять известный аналоговый сигнал помехи из принятого сигнала. Поскольку передаваемые символы уже известны, на этапе подавления цифровых помех используется механизм когерентного обнаружения для восстановления сигнала.

Учитывая требования к малой мощности передачи для уменьшения влияния SI, сети с низким энергопотреблением (например, сети малых сот [SCN]) и связь ближнего действия (например, связь D2D и M2M, многозвенная ретрансляция) являются потенциальными сценариями, в которых FD технология

может быть практически полезной. Однако в системах FD управление помехами становится значительно более сложным из-за новых ситуаций с помехами. Для ситуации с совместным использованием многопользовательского канала, помимо внутрисотовых помех (между пользователями в соте), существуют межсотовые помехи между нисходящими линиями и восходящими линиями и межсотовые межпользовательские помехи между восходящими линиями и нисходящими линиями связи.

Энергоэффективность сети и сбор энергии

Одна из основных задач в сетях 5G - повысить энергоэффективность беспроводных устройств с ограниченным аккумулятором. В контексте продления срока службы батарей, а также повышения общей энергоэффективности сети, сбор энергии из источников энергии может быть привлекательным решением. Например, UE могут собирать энергию из источников энергии окружающей среды (например, энергии солнца и ветра). Однако из-за стохастической природы источников окружающей среды доступные уровни энергии могут значительно меняться с течением времени, местоположения и погодных условий. Следовательно, сбор энергии из этих источников может оказаться невозможным для надежного и ограниченного качества обслуживания (QoS) беспроводных приложений. В качестве альтернативы, энергия также может быть получена из окружающих радиосигналов (например, сбор радиочастотной энергии). В сети сбора энергии с RF-питанием (RF-EHN) UE могут собирать энергию из гибридной точки доступа (HAP), используя радиочастотные сигналы для обработки и передачи информации [5]. Передача RF-энергии характеризуется низким энергопотреблением и передачей на большие расстояния и, таким образом, подходит для сотовых беспроводных сред (например, для питания большого количества устройств с относительно низким энергопотреблением, распространяющихся на большую территорию). Кроме того, устойчивый характер источников RF-энергии делает RF-EHN перспективным подходом для будущих беспроводных сетей 5G с ограничениями по мощности.

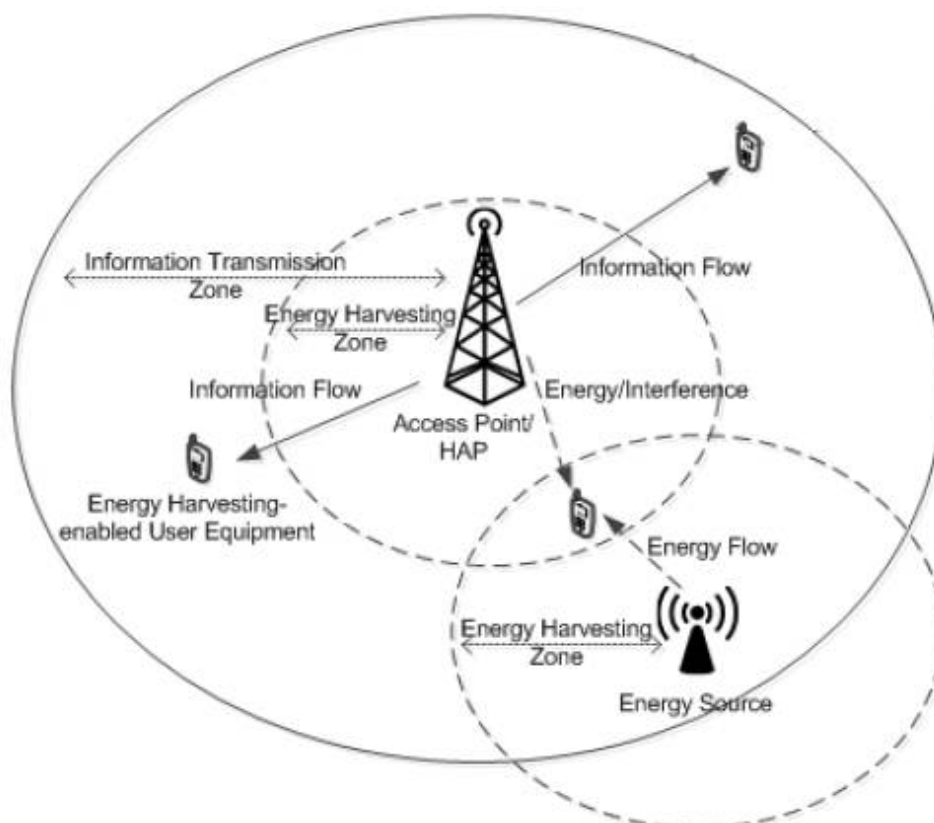


Рис. 2. Схема RF-сети сбора энергии

Как правило, RF-EHN, как показано на рис. 2, состоит из источников радиочастотной энергии, которые могут быть либо выделенными передатчиками радиочастотной энергии, либо окружающими радиочастотными источниками. Точки доступа (AP) относятся к традиционным сетевым узлам (таким как BS, реле и SBS). Обычно точки доступа и источники RF-энергии имеют непрерывное и стационарное электроснабжение. UE с возможностью сбора энергии могут собирать энергию из источников RF. В зависимости от сети точка доступа и источник RF-энергии могут быть одинаковыми (например, действует как HAP). AP имеет зону сбора энергии и зону передачи информации. Поскольку рабочая мощность компонента сбора энергии намного выше, чем мощность компонента декодирования информации, зона сбора энергии меньше, чем зона передачи информации [5].

Как показано на рис. 2, узел сбора RF-энергии, которым может быть пользовательское оборудование (UE), маломощные фемто-точки доступа, состоит из следующих основных компонентов [5]: микроконтроллер малой мощности, обрабатывающий данные из сетевого приложения; маломощный радиопередатчик для передачи или приема информации; накопитель энергии, состоящий из модуля RF-антенны, согласования импеданса, умножителя напряжения и конденсатора, для сбора и преобразования RF-сигналов в электричество. Кроме того, модуль управления питанием используется для принятия решения о том, следует ли использовать собранную энергию немедленно или

хранить её на будущее. Накопитель энергии используется для резервирования собранной радиочастотной энергии для будущей работы.

Поскольку количество собранной радиочастотной энергии зависит от расстояния от источника радиочастот, узлы сети в разных местах могут иметь значительные различия в количестве собранной радиочастотной энергии [5]. Например, когда накопитель энергии находится на расстоянии d от передатчика с единичной мощностью передачи, количество энергии, которое может быть получено из принятого сигнала определяется выражением $E_h(d) = \varepsilon \cdot f(d, \alpha)$, где $f(d, \alpha)$ – принимаемая мощность, а ε – эффективность преобразования, которая зависит от эффективности антенны, точности согласования между антенной и умножителем напряжения, а также энергоэффективности умножителя напряжения, который преобразует принятые радиочастотные сигналы в напряжение постоянного тока. Функция полученной мощности $f(d, \alpha)$ задается формулой $f(d, \alpha) = P_r^{det}(d) \cdot 10^L \cdot |r|^2$, где $P_r^{det}(d)$ – полученная мощность с использованием любой детерминированной модели потерь на трассе в свободном пространстве, коэффициент потерь на трассе $L = -\alpha \log_{10}(d / d_0)$ для показателя потерь на трассе α и эталонного расстояния d_0 , а r – случайное число, соответствующее комплексному гауссовскому распределению.

Одновременная передача информации и сбор энергии с помощью FD

Поскольку радиочастотные сигналы могут нести как энергию, так и информацию, теоретически сбор радиочастотной энергии и прием информации могут выполняться из одного и того же входного радиочастотного сигнала. Эта схема называется одновременной беспроводной передачей информации и мощности (SWIPT) [5]. Поскольку передача информации и мощности работают с различной чувствительностью к мощности в приемнике (например, -10 дБм и -60 дБм для приемников энергии и информации, соответственно) [4], а традиционная архитектура приемника предназначена только для передачи информации, практические оптимальные схемы SWIPT для сбора энергии пока недоступны.

Чтобы реализовать SWIPT, одна из идей состоит в том, чтобы переключать приемник между двумя режимами (например, декодирование информации и сбор энергии) на основе мгновенного канала и условий помех. В настоящее время доступны следующие конструкции приемников: временное переключение (например, антенна, периодически переключающаяся между схемами декодирования информации и сбора энергии) и разделение мощности (например, приемник разделяет принятый сигнал на два потока для информации и приемники энергии с одинаковыми или разными уровнями мощности) [5].

Используя описанный ранее подход к обмену данными FD, узел может одновременно выполнять сбор энергии и передачу данных. В сотовых сетях RF-EHN операции FD обычно поддерживаются с использованием НАР с двумя антеннами [6]. Однако этот подход отличается от традиционных систем связи

FD, поскольку одна из этих антенн выполняет передачу энергии по нисходящей линии связи пользователям, а другая используется для передачи информации по восходящей линии связи. Как и в любых системах FD, самоинтерференция (SI) является критической проблемой для полнодуплексных НАР, и в настоящее время проводятся исследования, направленные на минимизацию SI в НАР [6].

Облачная сеть радиодоступа

Концепция облачной сети радиодоступа (C-RAN) возникла из архитектуры распределенной базовой станции (DBS), в которой сервер BS отвечает за обработку основной полосы частот. Блоки обработки основной полосы (BBU) обычных сотовых станций отделяются от аналоговых блоков радиодоступа, называемых удаленными радиоголовками (RRH), и перемещаются в облако для централизованной обработки сигналов и управления. Объединение BBU обслуживает определенную область с определенным количеством RRH макро- и малых ячеек. На основе сигналов основной полосы частот, полученных из облака, передача радиосигналов пользователям выполняется RRH.

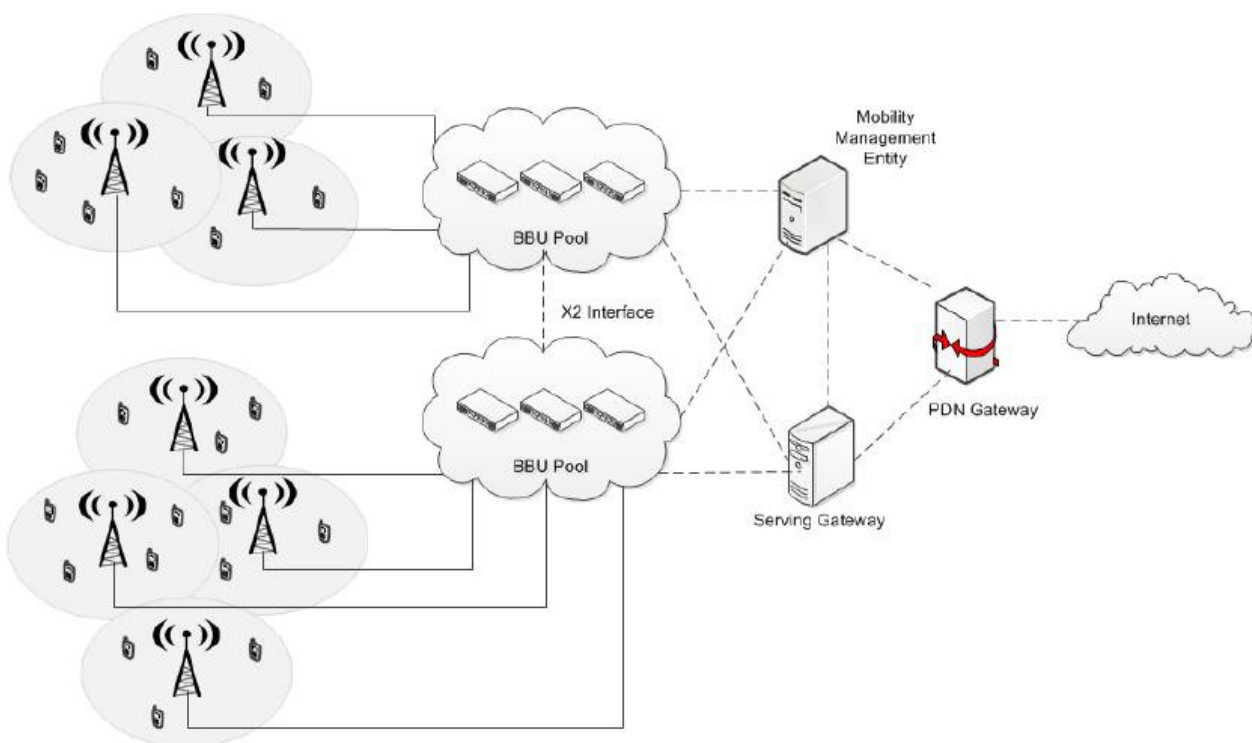


Рис. 3. Система LTE-A, дополненная облачной сетью радиодоступа

В архитектуре 4G (например, сотовой связи на основе LTE-A) функциональные возможности обработки радиосвязи и основной полосы частот интегрированы внутри базовой станции, а координация между базовыми станциями выполняется через интерфейс X2. В C-RAN, как показано на рис. 3, обработка основной полосы частот (кодирование, модуляция, быстрое преобразование Фурье) выполняется в облаке (например, в объединении BBU). Объединение

BBU – это виртуализированный кластер, который может состоять из процессоров общего назначения для выполнения обработки основной полосы частот. На удаленном узле радиоблок совмещен с антеннами и выполняет цифровую обработку, цифроаналоговое преобразование, аналого-цифровое преобразование, усиление мощности и фильтрацию [7]. Обратный канал соединяет облако с основной сетью мобильной связи. Передний канал (обычно оптический транспортный канал) простирается от RRH до облака для передачи цифровых сигналов основной полосы частот.

Усовершенствованный механизм совместной обработки в облаке может уменьшить задержку во время передачи обслуживания внутри объединения BBU в обычных BS. Использование недорогих и плотно развернутых RRH в C-RAN повысит масштабируемость, улучшит пропускную способность сети и расширит покрытие будущих систем 5G. Архитектура C-RAN также значительно снижает капитальные затраты (CAPEX) и эксплуатационные расходы (OPEX). Например, C-RAN снижает стоимость обработки основной полосы частот и снижает энергопотребление, выполняя балансировку нагрузки и совместную обработку сигналов от нескольких BS. Кроме того, C-RAN минимизирует потребление энергии за счет использования концепций MIMO или координированной многоточечной связи (CoMP). Собственная централизованная поддержка мультистандартной работы в C-RAN сделает работу между RAT (например, планирование, координацию помех или управление трафиком) и обслуживание сети (например, обновление до новой технологии) относительно простыми [7].

Виртуализация беспроводной сети

Виртуализация сети станет одной из основных тенденций в системах 5G. Вместе с архитектурой C-RAN виртуализация беспроводной сети (WNV) облегчает совместное использование ресурсов многими операторами. WNV позволяет нескольким сетевым операторам совместно использовать общие ресурсы (например, сетевую инфраструктуру, транспортную сеть, лицензированный спектр, ядро и сеть радиодоступа [RAN], энергию или мощность). Механизм виртуализации абстрагирует физические возможности до ряда виртуальных, которые совместно используются разными потребителями. Основные преимущества WNV включают: высокое использование ресурсов, улучшенную производительность системы, снижение капитальных и операционных затрат, лучшее качество обслуживания (QoE) для конечных пользователей и более простой переход на новые технологии за счет изоляции части сети [8].

Виртуализированные беспроводные сети состоят из поставщика инфраструктуры (InP) и оператора мобильной виртуальной сети (MVNO). InP владеет физической сотовой инфраструктурой и радиоресурсами. MVNO арендует ресурсы у InP, создает виртуальные ресурсы и управляет ими, а также назначает их подписчикам. Сетевые ресурсы (например, инфраструктура, радиочастотный

спектр) принадлежат одному или нескольким InP, виртуализированы и разделены на срезы. MVNO использует срезы из InP в зависимости от конкретных соглашений об уровне обслуживания (SLA) и предоставляет услуги конечным пользователям, не зная, как работает физическая архитектура сети.

Совместное использование физических и виртуальных ресурсов в зависимости от различных степеней виртуализации WNV можно классифицировать:

- Виртуализация между инфраструктурой – позволяет виртуализовать ресурсы через InP и внутри InP. Следовательно, все InP в географическом регионе могут совместно использовать сетевые ресурсы через MVNO;

- Ограниченная виртуализация внутри инфраструктуры – учитывает ресурсы виртуализация в рамках одного InP, например, радиочастотный спектр и сеть доступа совместно используются разными MVNO.

Совместное использование физической сети относится к совместному использованию радиочастотного спектра и инфраструктуры беспроводной сети. Ресурсы радиочастотного спектра относятся к лицензированным или выделенным свободным полосам спектра, подканалам или блокам физических ресурсов (PRB) для сетей LTE-A. Совместное использование инфраструктуры можно разделить на активное и пассивное [8]. Активное использование относится к совместному использованию сетевых элементов (например, радиочастотных антенн, базовых станций, транзитного соединения и магистрали, маршрутизаторов и коммутаторов). Пассивное использование – это совместное использование материалов, не связанных с сетью (например, зданий, местоположений, сотовых станций). Совместное использование инфраструктуры предлагает кросс-инфраструктурную виртуализацию, например, несколько InP могут совместно использовать одну и ту же физическую сеть.

Виртуальные беспроводные ресурсы создаются путем деления физических сетевых ресурсов на виртуальные части. Например, MVNO может иметь базовую сеть, но не иметь радиопокрытия для определенного региона, и может запрашивать срез RAN у InP. Диспетчер ресурсов или контроллер виртуализации отвечает за сопоставление физических ресурсов с виртуальными [8].

Виртуальные ресурсы могут быть разделены на разные уровни следующим образом [8]:

- Разделение на уровне спектра – радиоресурсы разделены и назначаются MVNO с помощью временного или пространственного мультиплексирования или метода повторного использования спектра. Гипервизор планирует ресурс радиointерфейса между BS и UE.

- Разделение на сетевом уровне – позволяет виртуализировать физические сетевые узлы, базовые сети, обслуживающий шлюз и вычислительные модули в близком географическом районе в виртуализированные узлы на основе некоторых показателей.

- Разделение на уровне потока – при срезе на уровне потока срез ресурса определяется как набор виртуальных ресурсов, запрошенных MVNO. Срез ресурса может быть основан на полосе пропускания или радиоресурсе.

ВИДЫ МОДУЛЯЦИЙ ДЛЯ СЕТЕЙ 5G

OFDM – это схема модуляции, широко используемая в современных системах 4G LTE. Обладая высокой спектральной эффективностью, невосприимчивостью к внешним шумовым помехам и низким уровнем межсимвольных помех, она полностью изменила способы связи в современном мире [9]. Однако с нескончаемым спросом на увеличение потребления данных и Интернетом вещей, множественная связь машинного времени в закрытых синхронизированных сетях системы LTE приводит к различным расходам, помимо обычного разряда батареи. Поэтому мы обсудим некоторые потенциальные схемы модуляции для сетей 5G следующего поколения:

- традиционный OFDM;
- F-OFDM;
- W-OFDM;
- FBMC;
- UFMC;
- GFDM;
- SDMA;
- NOMA;
- BFDM.

Рассмотрим краткую характеристику каждого вида модуляции.

Традиционный OFDM

Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов является более совершенной схемой модуляции, чем FDMA, TDMA или даже CDMA, поскольку оно включает в себя передачу одного потока данных по ортогонально выровненным поднесущим с низким объемом данных [9]. OFDM позволяет боковым полосам каждой отдельной поднесущей перекрываться без искажения сигнала из-за межсимвольных помех (ISI).

Доступный спектр делится на n поднесущих, при этом последовательные данные подаются в кодеры. Затем символы преобразуются в созвездия, такие как BPSK, QPSK или QAM. Каждый символ делится на кадры с циклическим префиксом (CP), чтобы устранить межсимвольные помехи. Точная 25%-ная копия цикла дублируется с обратной стороны и добавляется к передней, чтобы демодулятор мог захватывать символ с неопределенностью и по-прежнему иметь возможность выводить информацию для всего периода символа. Хотя циклический префикс может обеспечить надежность системы путем повторной передачи дополнительных данных, они занимают дополнительное место, снижая производительность системы.

Помимо вышеописанных достоинств мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов, существуют различные недостатки использования данной схемы модуляции:

Во-первых, OFDM имеет очень высокое отношение пиковой мощности к средней (PAPR). N сигналов одной и той же фазы при сложении производят пиковую мощность, которая в N раз превышает среднюю мощность, что приводит к появлению резких пиков, которые при прохождении через нелинейный усилитель большой мощности вызывают резкое увеличение частоты битовых ошибок, внеполосное излучение и помехи в соседних каналах.

Во-вторых, OFDM чувствителен к доплеровскому сдвигу частоты – сдвигу частотной ошибки, ухудшающему ортогональность канала, вызывающему помехи между несущими. Это главным образом не подходит для массовых машинных коммуникаций (ММС), где требуются большие соединения. Чтобы смягчить данные эффекты, были разработаны новые варианты, такие как: f -OFDM, w -OFDM, универсальная фильтрованная многонесущая (UFMC), отфильтрованная многополосная несущая (FBMC) и обобщенное мультиплексирование с частотным разделением (GFDM).

OFDM стал одной из передовых стандартных технологий воздушной связи для будущей широкополосной беспроводной связи. OFDM используется для быстрого избавления от результата многолучевого ослабления, так же как и для обеспечения больших скоростей передачи информации. Для дополнительного повышения эффективности измерения информации и производительности системы в системе OFDM широко используются адаптивное распределение ресурсов и хорошие антенные методы.

F-OFDM

F-OFDM (фильтрованный OFDM) – это спектрально локализованный метод, в котором длина фильтра может превышать циклический префикс. Поддиапазоны, разделенные в f -OFDM, имеют различную длину, причем каждая поднесущая имеет свой собственный фильтр и CP, что придает поднесущим большую гибкость, позволяя передавать различные типы служебных данных в одном и том же подкадре. Удобство MIMO, парный асинхронный множественный доступ – это некоторые аспекты f -OFDM, которые дают ему преимущество над обычным OFDM.

Sinc-фильтр с мягким усечением является наиболее широко применяемым фильтром в f -OFDM. Его можно легко использовать в разных приложениях с различными параметрами. Из этого можно сделать вывод, что f -OFDM является очень гибким в частотном мультиплексировании.

W-OFDM

Вейвлет-преобразования состоят из трансмультиплексоров M -диапазона, которые используют фильтры большей длины, чем прямоугольные окна, используемые в системах OFDM на основе дискретного преобразования Фурье. Использование символов большей длительности позволяет получить более

низкие уровни боковых лепестков по сравнению с традиционным OFDM. Лучшее затухание полосы пропускания приводит как к более низким уровням межканальных помех, так и к большей устойчивости к слабым узкополосным помехам.

W-OFDM наиболее часто используется в сетях PLC (технология связи, которая была разработана компанией Panasonic). W-OFDM определяется символами, которые сглаживаются на границе при прокрутке интервала (RI). После добавления циклического префикса добавляется дополнительный этап, на котором символы фильтруются.

В частности, довольно сильно распространено использование банков фильтров с косинусной модуляцией идеальной реконструкции (PR-CMFB) с трансмультиплексором, так как они могут быть реализованы вычислительно эффективным способом (многофазное представление) с использованием алгоритма быстрого дискретного косинусного преобразования.

Поскольку реализация довольно сложна, она менее предпочтительна по сравнению с другими обсуждаемыми методами.

FBMC

Метод банка фильтров с несколькими несущими представляет собой более развитую форму OFDM для решения проблем спектральной избирательности, которая является основной причиной ухудшения производительности системы в OFDM, где подканалы имеют тенденцию перекрываться, вызывая плохое затухание сигнала [9]. FBMC эффективно использует спектр, поскольку циклический префикс не требуется, поэтому используется период символа. Его можно использовать без синхронизации мобильных пользовательских узлов. Полосы фильтра также могут быть повторно использованы для измерения спектра и для передачи с несколькими несущими в когнитивных радиосистемах. Однако основная проблема FBMC – смещение из-за квадратурной амплитудной модуляции (QAM). Его плоскость ограничена только ортогональностью реального поля, что является проблемой, когда дело доходит до воображаемых интерфейсов, в результате которых задачи обработки сигналов становятся более сложными. Возможности системы FBMC на основе MIMO также очень ограничены.

UFMC

UFMC является обобщением отфильтрованного метода модуляции OFDM и FBMC. Эта технология универсальной фильтрации с несколькими несущими (UFMC) недавно появилась как жизнеспособный вариант формы волны для 5G. Операция фильтрации применяется к последовательным поднесущим, чтобы уменьшить перекрытия вне боковой полосы, тем самым минимизируя помехи несущей и асинхронную передачу между множеством пользователей. Использование более короткой длины фильтра по сравнению с циклическим префиксом

делает его более подходящим для коротких пакетных передач. В UFMC для сохранения сложной ортогональности используется QAM, который работает с существующим MIMO.

GFDM

Общее мультиплексирование с разделением полей рассматривается как многообещающий кандидат на физический уровень будущей сети 5G. Ключевая особенность данного метода – совместимость с MIMO. GFDM – это метод многополосной несущей, основанный на неортогональных блоках, где каждая поднесущая фильтруется с помощью фильтра формирования кольцевых импульсов для уменьшения внеполосных излучений и отношения пиковой мощности к средней. Поскольку в одном кадре можно охватить множество сигналов, то добавляется несколько степеней свободы. Причина, по которой GFDM превосходит традиционный OFDM, заключается в том, что один циклический префикс добавляется ко всему блоку, вместо того, чтобы каждый символ обладал своим собственным CP.

SDMA

Множественный доступ с пространственным разделением был впервые представлен в 1990-х годах, а также был интегрирован в качестве стандарта для IEEE 802.11ac. В отличие от традиционных мобильных сетей, которые излучают сигнал во всех направлениях, в SDMA базовая станция (BS) использует антенны с высоким направленным усилением для передачи радиосигналов мобильному пользователю с использованием методов фазированной решетки. В результате резко снижается потребление энергии и предотвращается передача нежелательного сигнала.

NOMA

Неортогональный множественный доступ обслуживает нескольких пользователей одновременно и в одной и той же частотной области. В NOMA входящий сигнал с различной степенью мощности разделяется на приемнике. Хотя разделение мощности может уменьшить мощность, выделяемую каждому пользователю, оно основано на том, что рабочая полоса может быть назначена двум пользователям в соответствии с их использованием данных. NOMA использует суперпозиционное кодирование в передатчике и последовательное подавление помех (SIC) в приемнике.

Рассмотрим пример двух пользователей, подключенных к одной базовой станции. Первый пользователь потребляет больше данных, чем второй. В таком случае первый пользователь будет вычитать сигнал более слабого пользователя через SIC, декодируя его как свой собственный сигнал, тогда как более слабый

пользователь будет рассматривать более сильный входящий сигнал как шум и обнаруживать свой собственный сигнал напрямую. NOMA распределяет пропускную способность между пользователями в соответствии с их потреблением данных, тем самым экономя на неиспользуемых данных.

Будущие перспективы NOMA расширяются за счет MIMO, когда пользователи попарно сгруппированы в ячейки. Однако одновременная кластеризация множества пользователей в ячейки для декодирования сигнала приводит к сложной конструкции системы в дополнение к увеличению энергопотребления. Единственная ошибка во время подавления помех может вызвать волновой эффект в последующей пользовательской информации.

BFDM

В настоящее время системы LTE воспроизводятся в общем канале восходящей линии связи. Исследования продемонстрировали использование дальнейшего расширенного физического канала произвольного доступа для развертывания будущей асинхронной передачи данных.

Многие из методов, обсуждаемых до сих пор, снижают длину защитной полосы для повышения спектральной эффективности, что приводит к увеличению вероятности возникновения помех. При мультиплексировании с биортогональным частотным разделением спектр модулируется биортогональными поднесущими вместо обычных ортогональных. BFDM более устойчив к сдвигам частоты и лучше реагирует на спорадический трафик, поскольку символы в канале произвольного доступа физического уровня относительно длиннее.

ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕТЕЙ 5G

Несмотря на то, что вышеупомянутые технологии значительно улучшают общую производительность сети и качество обслуживания конечного пользователя, существует несколько исследовательских задач (от проектирования и тестирования системы или устройства до управления сетью) для выполнения требований систем 5G. Далее мы рассмотрим проблемы измерения, тестирования и управления радиоресурсами будущих систем 5G.

Проблемы измерения систем 5G

Далее мы кратко представляем ключевые проблемы, связанные с измерением, тестированием и проверкой производительности компонентов системы 5G. В табл. 2 обобщены проблемы, которые затрудняют измерение и тестирование систем 5G.

Фундаментальная проблема измерения и моделирования канала распространения в основном связана с использованием более высоких частот и различной ширины полосы вместе с гораздо более крупными антенными решетками. Рост беспроводного трафика требует дополнительных спектров (например, более высоких частот в миллиметровом диапазоне), а поддерживающие технологии, такие как крупномасштабный MIMO и уплотнение сетевых узлов, предъявляют новые требования к изменению каналов в пространственной области. Ключевые проблемы при измерении и моделировании каналов распространения 5G можно резюмировать следующим образом [8].

- *Эффективные и реалистичные измерения*: поскольку данные измерений имеют решающее значение для необходимых расширений доступных моделей распространения, подход к измерениям должен охватывать различные частотные диапазоны, пространственную согласованность, трехмерные и сферические волны, а также новые модели, такие как D2D / M2M и связь малых сот. Кроме того, измерения должны проводиться для миллиметрового диапазона как в помещении, так и на открытом воздухе с учетом возможных реалистичных сценариев использования (таких как места скопления людей, связь между транспортными средствами).

- *Пространственное распределение и мобильность*: существующие модели каналов основаны на перетаскивании, например, среда рассеяния создается случайным образом для каждого канала. Однако, поскольку ожидается, что плотность соединений в системах 5G возрастет, важно моделировать эти каналы согласованным образом, который также может по своей сути поддерживать неоднородное поведение мобильности различных сетевых узлов.

- *Крупномасштабные антенные решетки и связь в миллиметровом диапазоне*: предполагается, что системы 5G будут использовать очень крупномасштабные антенные решетки для направленной связи. Принимая во внимание эти направленные антенны, современные модели каналов требуют соответствующей

щего улучшения углового разрешения, а также распределения амплитуды на субтрассах. Кроме того, эти крупномасштабные антенные решетки нуждаются в моделировании сферических волн вместо обычно используемого приближения плоских волн. Предлагается использование частот миллиметрового диапазона (особенно на частоте 60 ГГц) для достижения усиления спектра и пространственного мультиплексирования. Однако такие характеристики, как угловые характеристики с высоким разрешением и потери на трассе вне прямой видимости (NLOS), хорошо не известны, и, следовательно, требуют дальнейших измерений.

Проблемы тестирования систем 5G

Использование широкой полосы частот, требований к высокой скорости передачи данных, быстрого времени отклика, более сложных конфигураций антенн и поддержки технологии множественного радиодоступа (RAT) создают серьезные проблемы для разработки базовых станций и устройств следующего поколения. Тестирование систем 5G не ограничивается только оборудованием, оно также потребуется для проверки новых алгоритмов и подходов связи.

С точки зрения радиотехники, некоторые из ключевых проблем проектирования для систем 5G заключаются в следующем [8]:

- требование обрабатывать несколько полос частот (например, от 1,4 до 20 МГц для LTE-A), работоспособность в более высоких полосах (например, 60 ГГц для миллиметровых волн);
- использование различных режимов передачи в LTE-A (например, множественный доступ с ортогональным частотным разделением каналов [OFDMA] для восходящей линии связи, множественный доступ с частотным разделением на одной несущей [SC-FDMA] для нисходящей линии связи), а также обеспечение для обоих режимов передачи;
- поддержка нескольких RAT и одновременной передачи или приема управления, энергии и данных;
- изменения спектра, мощности и времени и необходимость поддержки методов с большим количеством антенн (например, разнесение передатчиков, пространственное мультиплексирование, формирование диаграммы направленности).

Вопросы, связанные с тестированием радиоприемников для систем 5G, могут включать:

- проверка приемника основной полосы частот, например, автономная регулировка усиления, демодуляция основной полосы частот и функциональное тестирование гибридного автоматического запроса на повторение (HARQ);
- характеристики приемника в условиях ухудшения, например, ухудшение фазового шума и аддитивного белого гауссовского шума (AWGN);
- тестирование характеристик приемника, например, тестирование при ухудшении распространения канала;

- тестирование систем с поддержкой MIMO, например, оценка кодирования основной полосы частот, проблемы проверки приемника, такие как изоляция сигналов, тестирование производительности в статических и затухающих каналах.

Существуют также проблемы, связанные с тестированием базовых станций и пользовательского оборудования 5G, как описано ниже.

- *Проблемы тестирования базовых станций 5G:* системы 5G смогут повторно использовать часть унаследованной инфраструктуры в существующей базовой сети. Однако спецификации радиointерфейса 5G будут включать ряд новых функций и концепций. Эти функции могут включать Massive-MIMO, процедуры HARQ с малой задержкой, схемы модуляции высокого порядка (например, 256 квадратурную амплитудную модуляцию [QAM]), широкий набор комбинаций или конфигураций радиочастотных диапазонов и ширины полосы каналов для обеспечения гибкости спектра, а также тестирование возможности сбора энергии. В отличие от традиционных систем, будущие БС, включая БС малых сот и ретрансляторы, также должны будут обрабатывать управление радиоресурсами, включая управление доступом, балансировку нагрузки и решения по радиомобильности. Кроме того, необходимо провести стресс-тестирование базовых станций, облаков и базовых сетей, чтобы проверить производительность на большом количестве сетевых узлов.

- *Проблемы тестирования пользовательского оборудования 5G:* проблемы тестирования пользовательского оборудования 5G аналогичны проблемам традиционных систем, использующих матрицы измерений, такие как максимальная выходная мощность, управление мощностью и чувствительность приемника. Однако необходимость использования схемы передачи OFDMA в нисходящем канале и SCFDMA в восходящем канале в системах 5G на основе LTE-A / LTE-B, а также поддержка одновременных соединений с обеспечением возможности сбора энергии требуют новых концепций измерения. Для правильных измерений радиочастот измерительный прибор должен включать протокол сигнализации, который работает автоматически с параметрами, определяемыми пользователем. Функциональное тестирование пользовательского оборудования должно включать тестирование протокола сигнализации, сквозной пропускной способности и передачи обслуживания. Одной из основных задач при тестировании пользовательского оборудования 5G является обеспечение соответствия требованиям реакции на изменение состояния. Например, в режиме ожидания устройство будет находиться в состоянии низкого энергопотребления, чтобы обеспечить хорошее время автономной работы, и только периодически проверять наличие сообщений. Когда устройство находится в подключенном режиме, например, должна быть запланирована передача данных, устройство должно выйти из спящего режима и быстро синхронизировать свой восходящий или нисходящий канал. Для обеспечения энергоэффективности тестирование разряда батареи следует проводить на всех этапах (например, разработка продукта, проверка конструкции и разработка приложения) разработки системы.

Проблемы измерений и тестирования систем 5G

Проблемы	Подробности
Измерение и моделирование каналов	Большое количество устройств, неоднородная структура трафика и плотность узлов, поддержка пространственного разнесения (например, Massive-MIMO), работоспособность в более высоких диапазонах, новые варианты использования (например, связь D2D / M2M)
Тестирование радиомодулей, передатчиков и приемников	Поддержка тестирования MIMO и возможности формирования диаграммы направленности, тестирование в разных диапазонах распространения и при искажениях, тестирование радиостанций с одновременной передачей или приемом, тестирование большого количества устройств с низкой стоимостью
Тестирование базовых станций и пользовательского оборудования	Стресс-тестирование с большим количеством узлов и разным трафиком, тестирование производительности со стандартными (например, LTE-A) спецификациями, тестирование гибкости работы с несколькими стандартами, тестирование энергоэффективности пользовательского оборудования и узлов с низким энергопотреблением (например, базовых станций малых сот, реле, RRH)

Проблемы управления ресурсами систем 5G

В следующем разделе кратко излагаются некоторые фундаментальные проблемы исследования в контексте управления радиоресурсами (RRM) в будущих сетях 5G. В табл. 3 показаны исследовательские вопросы, которые следует изучить.

Управление помехами в гетерогенных сетях: из-за плотного развертывания разнородных узлов в сетях 5G один из подходов к улучшению использования ресурсов заключается в использовании доступных ресурсов в качестве основы

спектра [8]. Однако для базовых сетей связи 5G управление помехами является одной из ключевых задач. Одной из самых больших проблем для многоуровневых гетерогенных сетей является уменьшение межсотовых и внутриуровневых помех. Помимо неоднородности и плотного развертывания беспроводных устройств, неустойчивость покрытия и нагрузки трафика из-за различной мощности передачи различных базовых станций делает проблемы управления помехами и распределения ресурсов более сложными, чем в обычных одноуровневых системах. Кроме того, разные ограничения доступа (общедоступные, частные, гибридные) на разных уровнях приводят к различным уровням помех. Приоритеты в доступе к каналам требуют адаптации различных стратегий динамического распределения ресурсов. Введение агрегации несущих, взаимодействие между BS (например, CoMP) и предоставление P2P-связи также усложняют динамику помех. Кроме того, чтобы повысить общую эффективность использования спектра, сетевым узлам необходимо выбрать решение о разгрузке (например, UE на макроуровне может выгружать SCN) и типе режима (например, прямой, D2D, D2D с ретрансляцией). Поскольку большое количество устройств в системах 5G будет повторно использовать одну и ту же частоту, настройка и поддержание каналов для связи P2P могут быть затруднительными. Из-за огромного количества устройств и их массового доступа существующие механизмы управления доступом к среде (MAC) необходимо будет переработать.

Полнодуплексная связь: в контексте связи FD, самоинтерференция (SI) ограничивает теоретическое усиление передачи FD. Даже при наличии нескольких механизмов отмены SI в системе остается их определенное количество. Для достижения предела производительности передачи FD требуются эффективные методы отмены SI, которые могут устранить остаточную SI. Как было упомянуто ранее, существуют новые источники межсотовых и внутрисотовых помех в связи FD из-за одновременной передачи или приема. Кроме того, из-за высокой мощности передачи BS, помехи от нисходящего канала к восходящей линии связи становятся более серьезными по сравнению с помехами от восходящего канала к нисходящему каналу. Следовательно, для достижения максимальной спектральной эффективности потребуются механизмы расширенной оценки канала, управления помехами и распределения мощности (с использованием передовых методов, таких как формирование луча приемопередатчика, распределенное пространственно-временное кодирование) с учетом новых источников помех. Кроме того, приемопередатчики FD должны иметь возможность гибко выбирать режимы передачи (например, HD / FD) в зависимости от динамики сети.

Связь с накоплением энергии: для RF-EHN необходимо будет изучить эффективную беспроводную зарядку, а также политику адаптации каналов, мощности и времени. Обычные схемы многопользовательского планирования не учитывают количество собранной энергии и потребности в энергии, поэтому могут привести к отключениям энергии или переполнению энергии в RF-EHN. Следовательно, для RF-EHN потребуются эффективные схемы многопользовательского планирования. Кроме того, в HAR требуются эффективные методы

обнаружения CSI для оптимизации мощности передачи или продолжительности сбора энергии для выполнения направленной передачи энергии в зависимости от состояния канала. Кроме того, необходимо изучить такие вопросы, как формирование диаграммы направленности с распределенной энергией, управление помехами и влияние мобильности устройств или источников энергии.

Cloud-RAN: существуют различные проблемы для развертывания C-RAN, такие как оптимальное использование ресурсов обработки, эффективное использование промежуточных каналов, соединяющих BBU с RRH, и централизованное управление сигналом распространения. Производительность C-RAN ограничена из-за ограниченной пропускной способности. Следовательно, для максимального увеличения пропускной способности сети требуются схемы распределения ресурсов с учетом предварительной информации, включая эффективные методы квантования или сжатия сигналов и формирования диаграммы направленности. Для достижения оптимального энергосбережения в C-RAN, RRH должны обслуживаться оптимально, учитывая количество активных BBU в объединении BBU и нагрузку на сеть (например, потребность в трафике от UE или RRH). Существующие алгоритмы совместного использования ресурсов необходимо усовершенствовать с учетом кластеризации ячеек (например, RRH) и BBU (в облаке), чтобы снизить сложность планирования.

Виртуализация беспроводной сети: полнофункциональная структура WNV требует эффективного использования ресурсов, изоляции и настраиваемого распределения ресурсов. Алгоритмы распределения ресурсов должны разрабатываться с учетом конечных и разнородных (например, спектр, инфраструктура, вычислительные ресурсы) ресурсов, требований к ресурсам MVNO, критериев справедливости. Кроме того, для виртуализации спектра необходимо решить проблемы управляющей сигнализации и начальной загрузки. Проблемы, связанные с обнаружением ресурсов, изоляцией, распределением на основе ценообразования и управлением мобильностью (например, бесшовная передача обслуживания различным MVNO или InP), открывают новые возможности для исследований.

Таблица 3

Обобщение новых технологий для сотовых сетей 5G

Технологии и тенденции	Преимущества и особенности	Применение	Проблемы фундаментального исследования
Гетерогенные многоуровневые сети	Повышенная пропускная способность, использование спектра	Малые сотовые сети, связь D2D / M2M, Интернет вещей	Управление помехами, адаптивное управление мощностью, выбор динамического режима и разгрузка для базовой сети

Полнодуплексная связь	Эффективность использования спектра, уменьшение задержки, энергоэффективность	Малые сотовые сети, связь D2D, когнитивные радиосети, многозвенная ретрансляция	Сокращение SI, межуровневое управление ресурсами, распределение мощности, управление помехами, синхронизация и регулировка времени для установления FD, передача, выбор динамического режима, разработка разработ-ка MAC-протокола
Сети сбора энергии	Энергоэффективность, беспроводная и энергосберегающая связь	Малые сотовые сети, связь D2D / M2M	Многопользовательское планирование, расширенное обнаружение канала, формирование энергетического луча, адаптация времени сбора / передачи, управление помехами, выделение ресурсов с помощью SWIPT
Cloud-RAN	Масштабируемость, энергосбережение, повышенная пропускная способность, уменьшение задержки	Сервисно-ориентированная связь, гетерогенные сети	Управление BBU, планирование с учетом энергии, распределение ресурсов с учетом предварительной информации
Виртуализация беспроводной сети	Использование ресурсов, повышенная пропускная способность, экономия энергии, снижение капитальных и эксплуатационных расходов	Сервисно-ориентированная связь	Изоляция, распределение ресурсов, оптимизация доходов и цен, управление мобильностью

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ССПО И СПОСОБОВ ИХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Цель работы:

1. Ознакомление с общими техническими характеристиками систем связи с подвижными объектами (ССПО) и способами их обеспечения.
2. Расчет основных технических характеристик ССПО.
3. Формирование навыков оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) аппаратуры ССПО.

1.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Главные элементы системы связи с подвижными объектами (ССПО) [10, 11]:

- центр коммутации подвижной службы (ЦКПС);
- базовые и абонентские станции (БС и АС);
- стационарные линии связи (кабельные, радиорелейные и др.) БС со своим ЦКПС;
- стационарные линии связи ЦКПС сети с транзитными коммутаторами ТФОП и обмена информацией по общему каналу сигнализации ОКС 7.

Сота – это территория, обслуживаемая одной БС при всенаправленных антеннах. В зависимости от радиуса r_0 соты подразделяют на макросоты с $r_0 \geq 0.5$ км, микросоты с $r_0 \leq 0.5$ км и пикосоты радиусом несколько десятков метров.

Каждая БС поддерживает радиосвязь с АС, находящимися в своей соте. Во избежание взаимных помех соседние БС работают на разных частотах. Каждой соте присваивается частотная группа и для всей ССПО составляется частотно-территориальный план (ЧТП).

Частотно-территориальное планирование сетей ССПО предусматривает выбор структуры (конфигурации) сети, места установки БС, выбор типа, высоты и ориентации антенн, распределение частот между БС. Для уменьшения капитальных затрат должна осуществляться оптимизация частотно-территориального плана, т. е. необходимо разрабатывать план, обеспечивающий заданную зону обслуживания, емкость сети, требуемое качество обслуживания при минимальном числе базовых станций и используемых частот. Планирование должно обеспечивать внутрисистемную и межсистемную электромагнитную совместимость (ЭМС) радиосредств. В первом случае обеспечивается ЭМС между радиостанциями проектируемой сети, во втором – между радиосредствами проектируемой сети и радиосредствами других систем, работающими в общих и смежных полосах частот и являющимися потенциальными

источниками помех.

ЧТП ССПО условно можно разделить на две части (рис. 4):

1. Частотный план – распределение частот приема и передачи между каналами, присвоенное стандарту;
2. Территориальный план – привязка частотного плана к конкретной территории, в котором указывается:
 - размерность кластера – ;
 - распределение частотных групп между сотами;
 - число каналов в каждой частотной группе, присвоенной соте, – ;
 - номинальные значения частот каналов в такой группе – ;
 - расположение сот на территории и размер (радиус) соты.

В ССПО используется принцип многократного повторного использования частот связи: одни и те же частоты предоставляются различным пользователям на всей территории, обслуживаемой системой. Принцип построения предполагает работу многих БС на совпадающих частотах (рис. 5 – БС центральной соты и БС М1-М6). В результате этого БС М1-М6 создают на входе АС центральной соты интерференционные или соканальные помехи, ухудшающие внутрисистемную ЭМС ССПО.

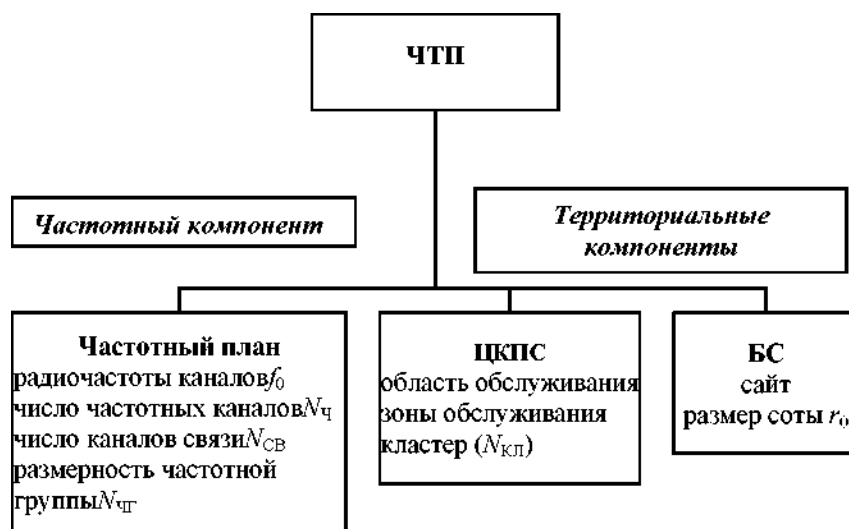


Рис. 4. Основные параметры ЧТП

Интерференционная помеха от таких БС рассматривается как внутрисистемная помеха, определяющая их электромагнитную совместимость (ЭМС), и именно эта помеха определяет такой параметр структуры, как размерность кластера . На основе геометрии однородной модели ССПО, размеры сот в которой постоянны, расстояние между БС, работающими на совпадающих частотах, определяется соотношением [10, 11]

$$(1.1)$$

где $q = \frac{E_c(r_0)}{E_i(d_{кл})} \approx \sqrt{3 \cdot N_{кл}}$ – коэффициент ослабления интерференционной помехи (коэффициент ЭМС сети); $E_c(r_0), E_i(d_{кл})$ – напряженности поля сигнала от АС и интерференционной помехи в точке расположения БС центральной соты.

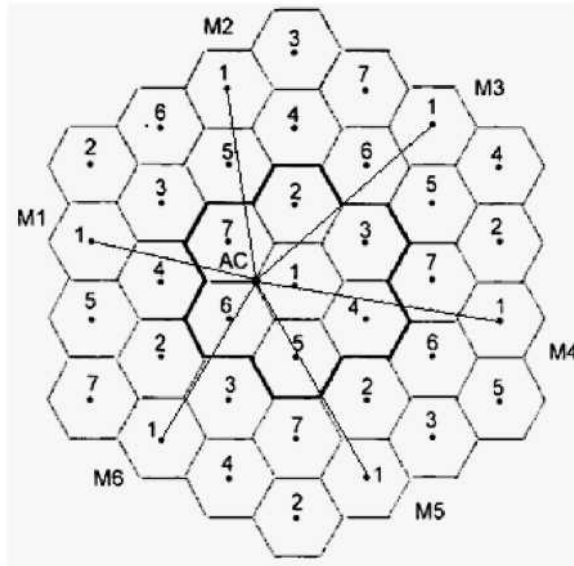


Рис. 5. Фрагмент ЧТП при $N_{кл} = 7$

M1-M6 – БС, работающие на совпадающих частотах и создающие интерференционную помеху

Для одного мешающего сигнала отношение мощностей сигнал-интерференционная помеха на границе соты равно

$$Q_{1с-и} = (r_0/d_{кл})^{-n}, \quad (1.2)$$

где n – показатель затухания при распространении сигналов: в зависимости от условий распространения сигнала принимает значения $n = 2 \dots 4$.

Подставив (1.1) в (1.2) и учитывая, что в однородной модели на одной частоте наблюдаются примерно одинаковые мешающие сигналы от шести БС, для допустимого отношения сигнал-интерференция на входе приемника при $n = 4$ запишем

$$Q_{с-и}^* = \left(\frac{1}{6}\right) (d_{кл}/r_0)^4 = (1.6)(3N_{кл})^2 = (3/2)N_{кл}^2. \quad (1.3)$$

Соотношение (1.3) позволяет определить размерность кластера

$$N_{кл} = \sqrt{(2/3)Q_{с-и}^*}; \quad (1.4)$$

$$Q_{с-и}^* = 10^{0,1q_{с-и}^*}, \quad (1.5)$$

где $q_{с-и}^*$ – допустимое отношение сигнал-интерференция (в дБ) в однородной модели, которое определяется стандартом ССПО.

Допустимое отношение сигнал-интерференция на входе приемника для ССПО различных стандартов составляет

$$q_{с-и}^* = \begin{cases} 9 \text{ дБ} — \text{ для системы GSM;} \\ 15 \text{ дБ} — \text{ для системы NMT — 450;} \\ 16 \text{ дБ} — \text{ в стандарте D — AMPS.} \end{cases}$$

Поэтому в цифровых системах можно использовать кластеры с меньшей размерностью, что, в свою очередь, повышает частотную эффективность цифровых систем.

Следовательно, в цифровой системе GSM допустимая мощность интерференционной помехи на входе приемника больше, чем в аналоговой системе NMT-450.

Число каналов в соте (канальная эффективность, радиоемкость соты)

$$N_{чг} = N_{чг}/N_{кл}, \quad (1.6)$$

ССПО обычно работают в диапазоне ультравысоких частот (УВЧ) (дециметровых волн). Максимальный радиус соты имеет место при отсутствии неровностей рельефа и ограничивается кривизной земной поверхности. Такая линия радиосвязи называется открытой. Ее протяженность определяется расстоянием прямой видимости

$$d_{пв} = 3.57\sqrt{h_1 + h_2}. \quad (1.7)$$

(здесь $d_{пв}$ выражено в километрах, h_1, h_2 – высоты расположения (подвеса) антенн БС и АС – в метрах).

Распространение волн в свободном пространстве (открытых трассах)

Модель распространения волн в свободном пространстве используется для расчета принятого сигнала в условиях, когда передающая и приемная антенны находятся на открытой незатененной препятствиями радиолинии. Эта модель применяется для анализа радиоканалов связи через спутники и для наземных радиолиний, работающих в диапазоне сверхвысоких частот.

При распространении радиосигнала на открытых трассах могут быть использованы следующие параметры радиоволн:

Действующее значение напряженности электрического поля в свободном пространстве для направленной передающей антенны с коэффициентом усиления G_1 , к которому подведена мощность P_1 :

$$E_0 = \frac{\sqrt{30P_1G_1}}{d} \text{ [В/м]}, \quad (1.8)$$

Плотность потока мощности (мощность, приходящаяся на единицу поверхности)

$$W = P_1/4\pi d^2 \text{ [Вт/м}^2\text{]}, \quad (1.9)$$

Мощность сигнала от БС на входе приемника АС зависит от протяженности d трассы и частоты (длины волны)

$$P_{C \text{ ВХ}}(f, d) = P_1 G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 10^{-(a_1+a_2)}, \quad (1.10)$$

или уровень мощности (в дБ) сигнала от БС на входе приемника АС

$$p_{C \text{ ВХ}} = 10 \lg P_{C \text{ ВХ}} = p_0(f, d), \quad (1.11)$$

где $p_0(f, d)$ – уровень мощности сигнала в точке приема при распространении в свободном пространстве

$$p_0(f, d) = p_{\Pi} + g_1 + g_2 - (a_{CB} + a_1 + a_2). \quad (1.12)$$

где p_{Π} – уровень мощности передатчика; g_1, g_2 – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн соответственно, выраженные в децибелах; a_1 и a_2 – потери в фидере передающей и приемной антенн соответственно; $a_{CB} = 20 \lg(4\pi d/\lambda)$ – ослабление свободного пространства; d – протяженность трассы; λ – рабочая длина волны.

Для более простого расчета, где мощность, принятая приемной антенной с усилением G_2 , которая излучается антенной передатчика мощностью P_1 с коэффициентом усиления G_1 на длине волны λ на расстоянии d на открытом неограниченном пространстве, применяют формулу

$$P_{C \text{ ВХ}}(f, d) = P_1 G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (1.13)$$

Коэффициент усиления антенны определяется следующим образом

$$G = \frac{4\pi \cdot A_{\text{Э}}}{\lambda^2}, \quad (1.14)$$

где $A_{\text{Э}}$ – эффективная площадь поверхности антенны, м².

Длина волны связана с несущей частотой соотношением

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1.15)$$

где c – скорость света.

Принимаемая антенной мощность в соответствии с (1.13) убывает с ростом расстояния d со скоростью 20 дБ в декаду, т.е. пропорционально множителю $\frac{1}{d^2}$.

Потери передачи в радиоканале (отношение принятой P_2 и излученной мощностей P_1)

$$PL = 10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_2} = -10 \cdot \lg \left[G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \right], \quad (1.16)$$

Для изотропных антенн (коэффициент усиления каждой из них $G = 1$)

$$PL = 10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_2} = -10 \cdot \lg \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \right]. \quad (1.17)$$

Предыдущие выражения верны только для дальней зоны (или зоны Фраунгофера). Граница дальней зоны определяется условием

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (1.18)$$

где D – наибольший размер антенны.

Дополнительным условием дальней зоны должно быть выполнение соотношений

$$\begin{aligned} d_f &\gg D; \\ d_f &\gg \lambda. \end{aligned}$$

На больших расстояниях при расчете напряженности поля в точке приема иногда используют значение принимаемой мощности на некотором фиксированном расстоянии d_0 – $P_2(d_0)$. Тогда на ином расстоянии d

$$P_2(d) = P_2(d_0) \cdot \left(\frac{d_0}{d} \right)^2, \quad d \geq d_0 \geq d_f, \quad (1.19)$$

Так как изменение уровня принимаемой мощности от расстояния очень велико, используют отсчет мощности в дБмВт (дБ по отношению к 1 милли-

ватту) и дБВт (дБ по отношению к 1 ватту)

$$P_2(d)[\text{дБмВт}] = 10 \cdot \lg \left[\frac{P_2(d_0)}{1 \text{ мВт}} \right] + 20 \cdot \lg \left(\frac{d_0}{d} \right), \quad d \geq d_0 \geq d_f, \quad (1.20)$$

где $P_2(d_0)$ подставляется в Вт.

$$P_2(d)[\text{дБВт}] = 10 \cdot \lg \left[\frac{P_2(d_0)}{1 \text{ Вт}} \right] + 20 \cdot \lg \left(\frac{d_0}{d} \right). \quad (1.21)$$

Опорное расстояние d_0 обычно выбирается равным 100 м или 1 км для связи вне зданий. Для радиоканалов внутри зданий типичное значение опорного расстояния $d_0 = 1 \text{ м}$.

Иногда в расчетах используется параметр – эффективная излучаемая мощность (эквивалентная изотропная излучаемая мощность) $P_{\text{эф}}$, которая показывает, во сколько раз плотность потока мощности в точке расположения приемной антенны при излучении мощности P_1 будет больше при использовании антенны с коэффициентом усиления G_1 по сравнению с изотропной антенной.

Выражение

$$P_{\text{эф}} = P_1 G_1, \quad (1.22)$$

показывает максимальную излучаемую мощность в направлении максимального излучения.

Плотность потока мощности на расстоянии d от передающей антенны

$$P_d = \frac{P_{\text{эф}}}{4\pi \cdot d^2} = \frac{P_1 G_1}{4\pi \cdot d^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{|E|^2}{120\pi}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (1.23)$$

где $120\pi \text{ Ом}$ – характеристическое сопротивление свободного пространства.

E – амплитуда электрического поля на расстоянии d , В/м.

Принимаемая мощность (мощность, перехватываемая приемной антенной из падающей плоской волны)

$$P_2(d) = P_d \cdot A_{\text{э}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{|E|^2}{120\pi} \cdot A_{\text{э}} = P_1 G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \text{ Вт}, \quad (1.24)$$

где $A_{\text{э}}$ – эффективная площадь поверхности антенны, м^2 .

Эквивалентная схема приемной антенны, включенной на вход приемника, показана на рис. 6. При условии согласования входного сопротивления антенны

и приемника ($R_a = R_{пр}$) напряжение на входе последнего будет равно половине ЭДС антенны. Действующее напряжение U с принятой мощностью описывается выражением

$$P_2(d) = \left(\frac{U}{2 \cdot R_a} \right)^2 = \frac{U^2}{4 \cdot R_a}, \quad (1.25)$$

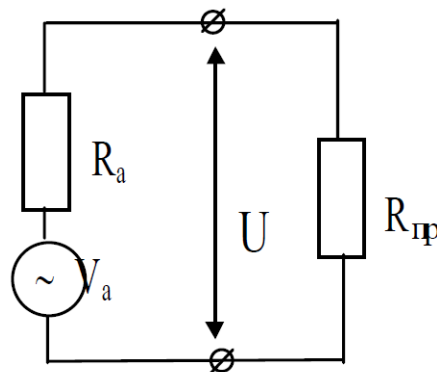


Рис. 6. Эквивалентная схема приемной антенны, включенной на вход приемника

Напряжение на входе приемника определяется по формуле

$$U = 2\sqrt{P_2(d) \cdot R_a}, \text{ В.} \quad (1.26)$$

1.2. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

Таблица 4

Исходные данные для выполнения лабораторной работы

Параметры	1	2	3	4
Излученная мощность P_1 , Вт	20	19	15	22
Частота f , МГц	1880	5600	2460	930
Коэффициент усиления антенны G_1 , дБ	15	17	20	19
Коэффициент усиления антенны G_2 , дБ	2	1,8	1,5	3
Размерность кластера $N_{кл}$	9	6	7	5
Показатель затухания n	2	3	4	3
Радиус соты r_0 , км	1,5	0,8	2	3,5
Протяженность трассы d	r_0	r_0	r_0	r_0

Окончание табл. 4

Потери в фидере передающей и приемной антенн $a_1 = a_2$, дБ	0,5	0,3	0,6	0,7
Высота расположения антенны БС h_1 , м	5	11	8	7
Высота расположения антенны АС h_2 , м	30	25	33	40

1. Рассчитать длину волны λ по варианту из табл. 4, заданному преподавателем. Для нахождения длины волны нужно воспользоваться соотношением (1.15).

Найти границу дальней зоны антенны с максимальным размером $D = 1$ м. Для этого необходимо воспользоваться формулой (1.18).

Выбрать приемлемое значение опорного расстояния d_0 .

2. Передатчик излучает мощность P_1 , заданную в табл. 4.

- выразить излучаемую мощность в дБВт, воспользовавшись выражением (1.21);

- выразить излучаемую мощность в дБмВт, воспользовавшись выражением (1.20);

- рассчитать принятую мощность P_2 по формуле (1.13);

- при условии, что излучается мощность P_1 , вычислить принимаемую мощность P_2 в дБмВт (1.20) в свободном пространстве на расстоянии d_0 ;

- применяя формулу (1.19), рассчитать мощность на выходе приемной антенны при использовании данных предыдущего пункта на расстоянии 10 км от передающей антенны.

3. Излученная мощность P_1 задана в табл. 4. Приемник расположен на расстоянии d от передатчика, несущая частота равна f . Считать, что обе антенны имеют коэффициенты усиления G_1, G_2 . Данные для вычисления находятся в табл. 4.

- найти мощность на выходе приемной антенны P_2 по формуле (1.16);

- выразить амплитуду электрического поля $|E|$ вблизи приемной антенны из выражения (1.24) и вычислить ее;

- по формуле (1.26) найти напряжение сигнала U , приложенное ко входу приемника, если выходное сопротивление антенны 50 Ом и она согласована с приемником.

4. Моделирование мощности на входе АС ($P_{\text{вх}}$).

4.1. Запустить программу Maket.exe.

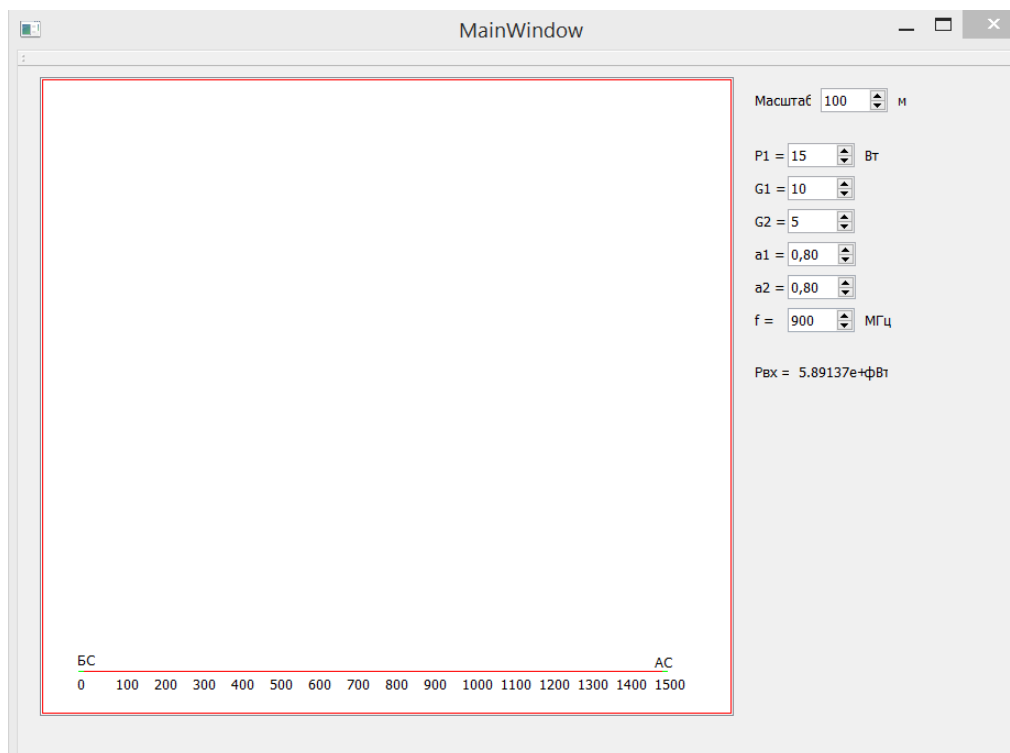


Рис. 7. Интерфейс программы Maket.exe

4.2. Внести необходимые данные для расчета (для каждой группы студентов параметры расчета уточнять у преподавателя), где:

- P_1 – мощность передающей антенны (Вт);
- G_1 – коэффициент усиления передающей антенны;
- G_2 – коэффициент усиления приемной антенны;
- a_1 – потери в фидере передающей антенны;
- a_2 – потери в фидере приемной антенны;
- f – частота работы системы.

После введения всех значений будет рассчитана мощность на входе АС – $P_{вх}$.

4.3. Зафиксировать скриншоты интерфейса программы при различных параметрах препятствия (не перекрывает линию прямой видимости, находится на высоте линии прямой видимости или полностью перекрывает), используя исходные данные, принятые при предварительных расчетах, и сделать выводы (проанализировать):

- параметры, которые наибольшим образом влияют на $P_{вх}$;
- назначение параметров a_1 и a_2 .

4.4. Определить относительную погрешность системы, применяя обычную P_1 (1.10) и упрощенную P_1 (1.13) формулу (для упрощенной формулы a_1 и a_2 равны 0)

$$\text{Погрешность} = \frac{|\text{обычная} - \text{упрощенная}|}{\text{обычная}} \cdot 100\%.$$

1.3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- кратко описанное теоретическое содержание изучаемого явления;
- результаты выполнения экспериментальных исследований;
- выводы и необходимые пояснения по предыдущим пунктам, а также объяснение расхождения результатов расчета и эксперимента.

1.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение понятию «интерференционная помеха».
2. Что такое зона освещенности?
3. На какие элементы можно разделить системы связи с подвижными объектами?
4. Что такое сота?
5. Проиллюстрируйте прохождение лучей от передающей до приемной антенны в области освещенности.
6. От чего зависит ослабление свободного пространства?
7. Каким образом напряжение на входе приемника зависит от принятой мощности?
8. По какой формуле рассчитывается мощность сигнала от БС на входе приемника АС?
9. Назовите основные параметры частотно-территориального планирования.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ССПО ПРИ ВЫСОКОПОДНЯТЫХ АНТЕННАХ

Цель работы:

1. Ознакомление с методами исследования энергетических показателей ССПО при высокоподнятых антеннах.
2. Расчет энергетических показателей ССПО при высокоподнятых антеннах.
3. Формирование умения пользования автоматизированным калькулятором СПР.

2.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

ССПО обычно работают в диапазоне ультравысоких частот (УВЧ).

Оценка энергетических показателей ССПО заключается в расчете уровня мощности сигнала на входе приемника при различных условиях распространения радиоволн при высокоподнятых антеннах:

- для открытой линии радиосвязи в пределах зоны освещенности (прямой видимости);
- с учетом кривизны земной поверхности, ограничивающей радиовидимость, без отражения радиоволн от земной поверхности и для двухлучевой трассы с интерференции лучей.

Высокоподнятыми считаются передающая и приемная антенны при выполнении условия

$$\begin{aligned} h_1 &\gg \lambda; \\ h_2 &\gg \lambda, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где h_1, h_2 – высоты антенн; λ – рабочая длина волны.

На открытых трассах в зоне освещенности уровень мощности $p_{с\text{ вх}} = p_0(f, d)$ (в дБ) сигнала от БС на входе приемника АС, определяемый формулой (1.12) (см. лабораторное занятие №1), зависит от протяженности d трассы и частоты.

На трассах с ограничением радиовидимости уровень мощности сигнала на входе приемника (в дБ) равен

$$p_{с\text{ вх}} = p_0(f, R) + v(d, t), \quad (2.2)$$

где $v(d, t)$ – множитель ослабления поля, позволяющий учесть влияние земной поверхности и тропосферы на поле в точке приема.

Влияние земной поверхности может проявляться следующим образом:

- может появляться отраженная волна;
- неровности рельефа могут экранировать поле прямой волны;
- кривизна земной поверхности и неровности рельефа ограничивают расстояние прямой видимости (границы зоны освещенности, дальность радиогоризонта), которое определяется выражением (1.7) (см. лабораторное занятие № 1).

Для расчета множителя ослабления поля $v(d, t)$ строят профиль пролета (рис. 8) в следующей последовательности:

- наносят линию прямой видимости AB ;
- определяют самую высокую точку профиля C и ее координату d_c ;

- находят просвет H_c – расстояние от самой высокой точки профиля до линии прямой видимости. Пунктиром на рисунке 8 нанесена линия земной поверхности. Величина просвета H_c зависит как от рельефа местности, так и от состояния тропосферы. Влияние тропосферы проявляется по следующим причинам:

- слоистые неоднородности тропосферы могут создавать отраженную волну;
- изменение диэлектрической проницаемости тропосферы по высоте может вызывать искривление (рефракцию) траектории прямой волны;
- на частотах выше 10 ГГц энергия сигнала поглощается и рассеивается гидрометеорами (частицами воды, каплями дождя в воздухе).

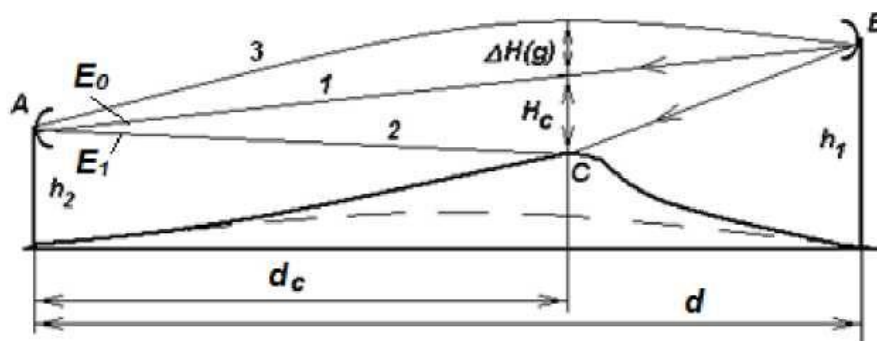


Рис. 8. Профиль пролета

Изменение просвета на трассе под воздействием атмосферной рефракции связано с прохождением радиоволны по траектории 3 и оценивается величиной приращения просвета

$$\Delta H(q) = -0.25d^2 q k (1 - k), \quad (2.3)$$

где $k = d_c/d$ – относительная координата точки C ; $q = d\varepsilon/dh$ – градиент диэлектрической проницаемости ε воздуха ($q \approx -10 \times 10^{-8} \text{ м}^{-1}$).

Градиент диэлектрической проницаемости q – величина случайная и имеет гауссовское распределение. Численные значения величин среднего значения q и стандартного отклонения σ_a для различных климатических районов мира приведены в справочной литературе.

С учетом атмосферной рефракции просвет равен

$$H(q) = H_c + \Delta H(q). \quad (2.4)$$

Для классификации видов трасс используют относительный просвет

$$p(q) = H(q)/H_0, \quad (2.5)$$

где H_0 – радиус первой полузоны Френеля.

$$H_0 = [d\lambda k(1 - k)/3]^{0.5}. \quad (2.6)$$

По величине относительного просвета $p(q)$ различают следующие виды трасс:

- закрытые при $p(q) < 0$;
- полуоткрытые при $0 < p(q) < 1$;
- открытые при $p(q) > 1$.

На открытых трассах для расчета радиоканала, как правило, применяют двухлучевую модель. В таком случае поле в точке приема определяется интерференцией двух лучей (рис. 8): прямого 1 и отраженного 2 от точки С. Множитель ослабления при $p(q) \geq 1$ (открытые трассы) определяется интерференционной формулой

$$V(d, t) = \{1 + \Phi^2 - 2\Phi \cos[p^2(q)\pi/3]\}^{0.5} = 10^{0.05 v(d, t)}, \quad (2.7)$$

где Φ – модуль коэффициента отражения радиоволн от земной поверхности.

Величина множителя ослабления изменяется случайным образом при изменении диэлектрической проницаемости земной поверхности от максимального значения $V_{max} = (1 + \Phi)$, когда прямая и отраженная волны складываются по фазе, до минимального значения $V_{min} = (1 - \Phi)$ при $p(q) = (6n)^{0.5}$, $n = 1, 2, 3, \dots$, когда эти волны противофазны. При этом возникают быстрые замирания (фединг) сигнала, которые называются интерференционными.

При отражении от гладкой плоской поверхности модуль коэффициента отражения $\Phi \rightarrow 1$. Неровная поверхность в зоне формирования отраженного луча (например, лес) определяет диффузный характер отражения, т.е. $\Phi \approx 0$, и отраженный от земной поверхности луч практически отсутствует.

При увеличении градиента диэлектрической проницаемости просвет на трассе уменьшается, и трасса может стать полуоткрытой и даже закрытой ($q < 0$). Препятствие экранирует поле основной волны. Множитель ослабления уменьшается. Возникают рефракционные замирания из-за экранирующего действия препятствия. Это медленные замирания (фединг).

В беспроводной связи замирание (фединг) – это изменение замирания сигнала в соответствии с различными параметрами (время, географическое положение, радиочастота и др.). Замирание может быть вызвано многолучевым распространением, погодой (особенно дождем) или затенением от препятствий, влияющих на распространение волны.

Существует довольно сильная зависимость замирания от высоты пути над уровнем моря:

- на больших высотах меньше атмосферы, и поэтому эффект атмосферного замирания меньше;

- при постепенном увеличении высоты на 1 километр необходимый запас замирания уменьшается на 10 дБ.

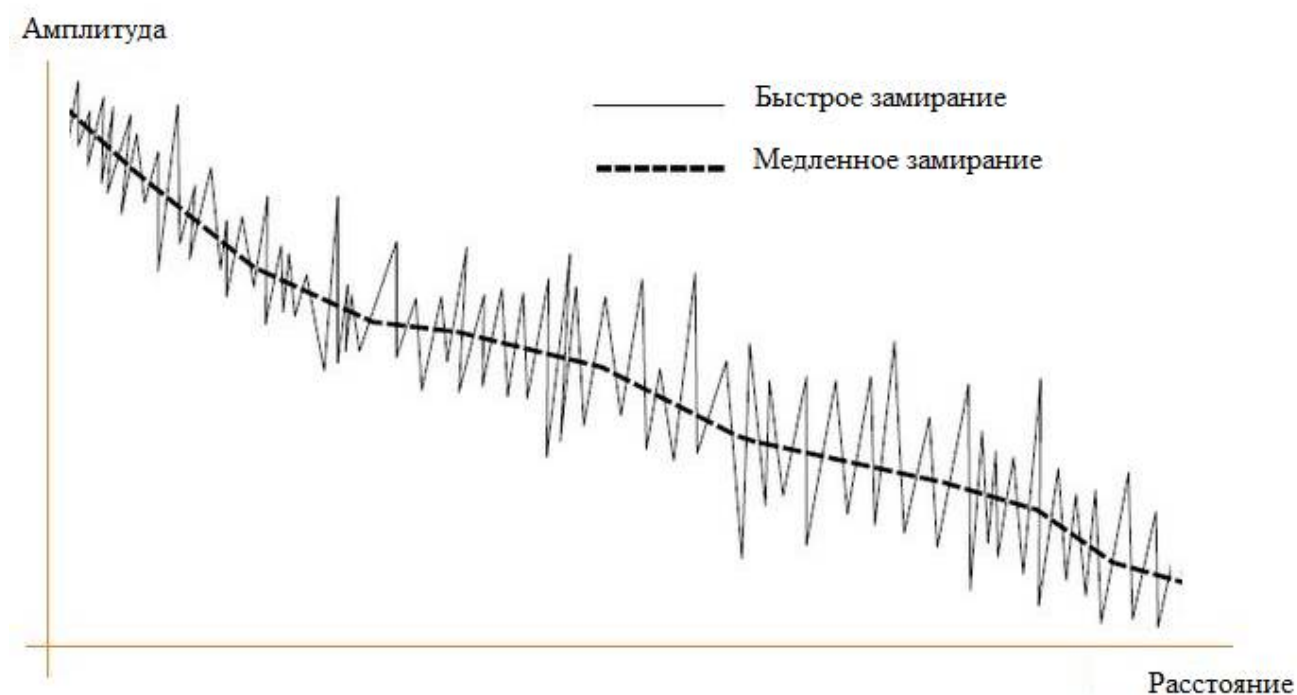


Рис. 9. Диаграмма зависимости амплитуды от расстояния для медленного и быстрого замирания

Рассмотрим различные виды замирания:

- Быстрое замирание – замирание, происходящее в тот момент, когда время когерентности канала мало по сравнению с ограничением задержки канала. Быстрое замирание вызывает быстрые колебания амплитуды и фазы сигнала, если присутствуют изменения в радиосвязи (например, проезжающий мимо автомобиль). Если передатчик или приемник движутся, то колебания происхо-

дят в пределах нескольких длин волн. Из-за его короткого расстояния быстрое замирание считается мелкомасштабным замиранием.

- Медленное замирание – замирание, происходящее в тот момент, когда время когерентности канала велико относительно ограничения задержки канала. Медленное затухание происходит из-за геометрии профиля пути. Это приводит к ситуации, в которой сигнал постепенно становится слабее или сильнее.

- Плоское замирание – происходит, когда рабочая полоса когерентности канала больше, чем рабочая полоса сигнала.

- Селективное замирание – происходит, когда рабочая полоса когерентности канала меньше рабочей полосы сигнала.

- Замирание Рэлея – замирание, при котором величина сигнала, прошедшего через канал связи, будет изменяться случайным образом.

- Замирание Накагами – происходит при многолучевом рассеянии с относительно большими временными задержками и с различными группами отраженных волн.

- Замирание Вейбулла – рассматривает сигнал, состоящий из групп одной многолучевой волны, каждая из которых распространяется в неоднородной среде.

2.2. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

Таблица 5

Исходные данные для выполнения лабораторной работы

Параметры	1	2	3	4
Просвет H_c , м	3	0,5	7	5
Частота f , МГц	1880	5600	2460	930
Координата самой высокой точки профиля d_c	$0,7d$	$0,6d$	$0,8d$	$0,75d$
Модуль коэффициента отражения радиоволн от земной поверхности Φ	0,2	0,8	0,5	0,7
Высота расположения антенны БС h_1 , м	5	11	8	7
Высота расположения антенны АС h_2 , м	30	25	33	40
Излученная мощность P_1 , Вт	20	19	15	22
Коэффициент усиления антенны G_1 , дБ	15	17	20	19

Окончание табл. 5

Коэффициент усиления антенны G_2 , дБ	2	1,8	1,5	3
Радиус соты r_0 , км	1,5	0,8	2	3,5
Протяженность трассы d	r_0	r_0	r_0	r_0
Потери в фидере передающей и приемной антенн $a_1 = a_2$, дБ	0,5	0,3	0,6	0,7

1. Выполнить предварительные расчеты:

- зависимости расстояния прямой видимости $d_{ПВ}$ в соответствии с формулой (1.7) (см. лабораторное занятие № 1) от высот антенн h_1, h_2 . Параметры для расчета заданы в табл. 5;

- зависимость мощности $P_{C\text{ ВХ}}$ и уровня мощности $p_{C\text{ ВХ}} = p_0(f, d)$ (в дБ) сигнала от БС на входе приемника АС для открытой трассы от протяженности $0 < d < d_{ПВ}$ трассы и частоты, определяемую формулами (1.10), (1.11) (см. лабораторное занятие № 1). Для этого необходимо взять значения параметров из табл. 5;

- определить значения относительного просвета $p(g)$ (2.5).

Для вычисления $p(g)$ необходимо изначально рассчитать радиус первой полузоны Френеля H_0 (2.6) и просвет с учетом атмосферной рефракции $H(q)$ (2.4), где $k = d_c/d$ – относительная координата точки С; $q = d\varepsilon/dh$ – градиент диэлектрической проницаемости ε воздуха ($q \approx -10 \times 10^{-8} \text{ м}^{-1}$). Протяженность трассы d и координату самой высокой точки профиля d_c взять из табл. 5. Для вычисления формулы (2.4) нужно найти приращение просвета $\Delta H(q)$ (2.3);

- определить экстремумы интерференционного множителя (2.7), зная значения относительного просвета $p(g)$. Модуль коэффициента отражения радиоволн от земной поверхности Φ взять из табл. 5.

2. Исследовать зависимости энергетических характеристик системы передачи для открытой трассы (однолучевая модель).

2.1. Запустить программу MRCS.exe (Калькулятор СПР)

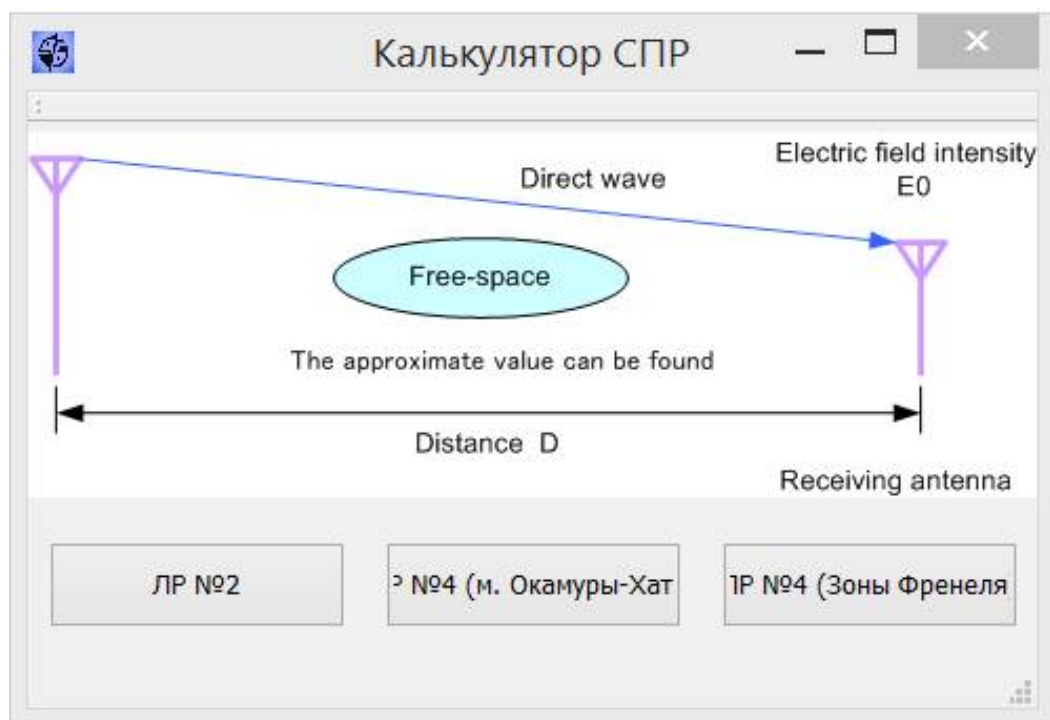


Рис. 10. Интерфейс программы MRCS.exe

2.2. Нажать на кнопку «ЛР №2»

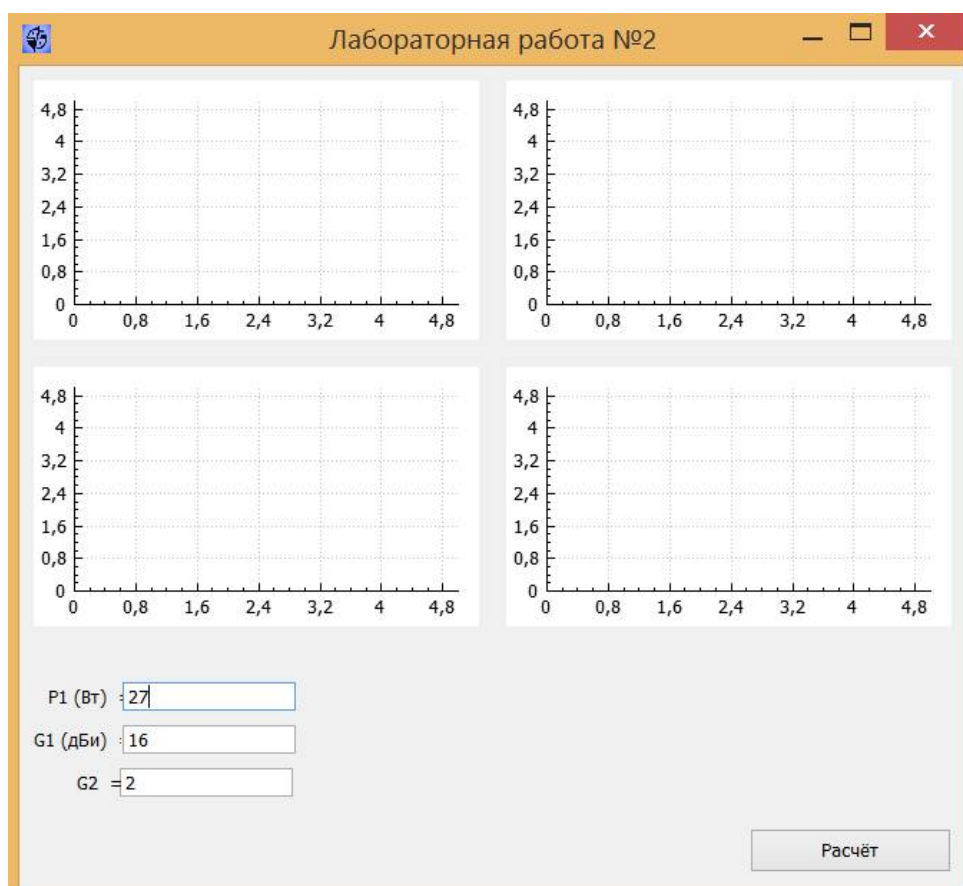


Рис. 11. Окно для расчета зависимостей энергетических показателей

2.3. Внести необходимые данные для расчета (для каждой группы студентов параметры расчета уточнять у преподавателя), где:

- P_1 – мощность излучающей антенны;
- G_1 – коэффициент усиления передающей антенны;
- G_2 – коэффициент усиления приемной антенны;

2.4. Нажать кнопку «Расчет» для построения графиков зависимостей энергетических показателей

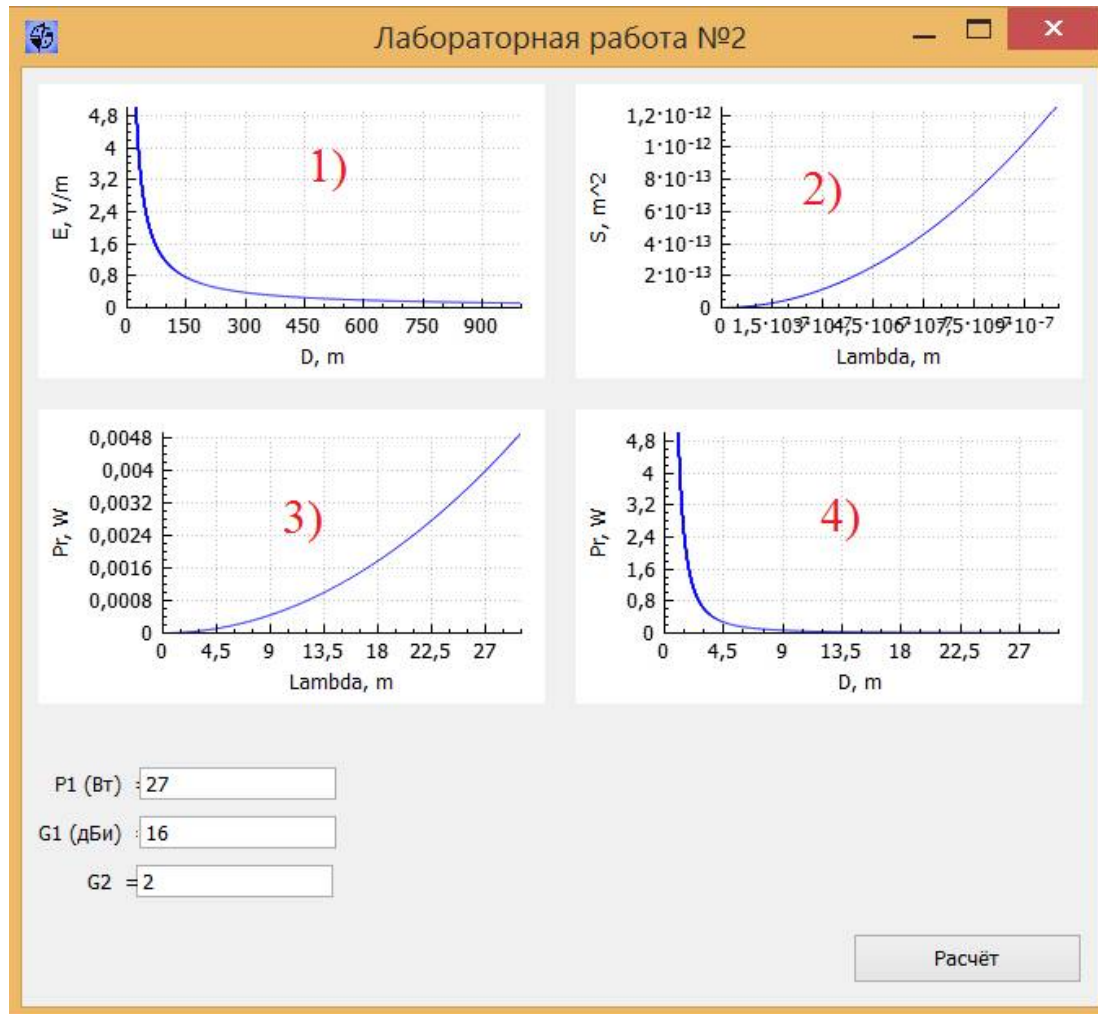


Рис. 12. Графики зависимостей энергетических показателей

Данные графики показывают:

- 1) напряженность электрического поля $E, \text{V/m}$ от протяженности открытой трассы D, m ;
- 2) эффективной (эквивалентной) площади антенн передатчика и приемника S, m^2 от длины волны, на которой передается сигнал Lambda, m ;
- 3) мощности принимаемого сигнала P_r, W от длины волны, на которой передается сигнал Lambda, m ;
- 4) мощности принимаемого сигнала P_r, W от дальности радиолинии D, m .

2.5. Зафиксировать скриншоты интерфейса калькулятора СПР при использовании исходных данных, принятых при предварительных расчетах, и сделать выводы:

- о соответствии полученных результатов и результатов предварительных расчетов (формулы (1.8)-(1.12) лабораторное занятие № 1);

- о влиянии параметров цифрового стандарта ССПО и технических характеристик ССПО на параметры сигнала в точке приема.

2.3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- кратко описанное теоретическое содержание изучаемого явления;
- результаты выполнения лабораторных исследований;
- выводы и необходимые пояснения по предыдущим пунктам.

2.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение понятию «интерференция».
2. Что такое зона освещенности?
3. Проиллюстрируйте прохождение лучей от передающей до приемной антенны в области освещенности.
4. Какие виды трасс различают по величине относительного просвета $p(q)$?
5. Как проявляется влияние земной поверхности?
6. Каким образом строится профиль пролета?
7. От чего зависит радиус первой полузоны Френеля?
8. Поясните понятие: замирание (фединг).
9. Какие существуют виды замираний?

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СПОСОБОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Цель работы:

1. Изучение основных способов распространения радиоволн.
2. Ознакомление с методикой расчета дифракции на клиновидном препятствии.

3.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1. Отражение – имеет место при падении волны на объекты с размерами много больше длины волны. Наблюдаются, например, отражения от земли, стен зданий и т.п.

2. Дифракция – явление возникновения вторичных волн при падении радиоволны на препятствие с острыми кромками. Дифракцией обусловлено наличие поля за препятствиями в зоне геометрической тени. На высоких частотах дифракция, как и отражение, существенно зависит от геометрии объекта, а также амплитуды, фазы и поляризации поля.

3. Рассеяние – имеет место при распространении волны в среде с мелкими объектами (меньше длины волны).

Дифракция радиоволн

Явление дифракции позволяет радиоволнам распространяться вокруг сферической земной поверхности за горизонт и за различные препятствия. Несмотря на перекрытие прямой видимости и существенное уменьшение уровня сигнала, он все-таки остается достаточным для приема.

Феномен дифракции объясняется принципом Гюйгенса. Это означает, что каждая точка на сферическом волновом фронте может рассматриваться как источник вторичного фронта волны с различной фазой (зон Френеля). Даже если сразу за препятствием будет находиться зона геометрической тени, волна будет рассеиваться вокруг препятствия и начнет заполнять пустоту.

Дифракция более выражена, когда препятствие становится острее и больше похоже на «лезвие ножа». Для радиоволны дифракция зависит от частоты и, следовательно, длины волны сигнала.

Для низкочастотных сигналов достаточно острым может служить горный хребет. Более округлый холм не произведет такого заметного эффекта. Стоит отметить, что низкочастотные сигналы более подвержены дифракции, чем высокочастотные. Именно по этой причине сигналы в длинноволновой полосе способны обеспечить покрытие даже в холмистой или гористой местности, где сигналы на УКВ и выше этого не сделали бы.



Рис. 13. Дифракция радиоволн

Геометрия зон Френеля

Пусть между излучателем и приемником расположено препятствие – экран высотой h бесконечных размеров в поперечном сечении. Расстояние от экрана до излучателя – d_1 , до приемника – d_2 .

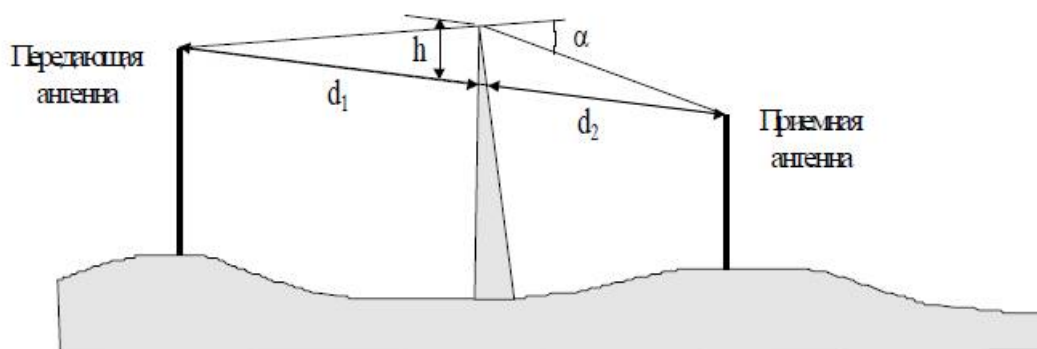


Рис. 14. Дифракция радиоволн на клиновидном препятствии

Ясно, что путь через кромку препятствия больше прямого. Полагая, что $h \ll d_1, d_2$ и $h \gg \lambda$, разность хода прямого и через кромку лучей будет

$$\Delta \approx \frac{h^2}{2} \cdot \frac{d_1 + d_2}{d_1 \cdot d_2}. \quad (3.1)$$

Соответствующая ему разность фаз

$$\Phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta}{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \frac{h^2}{2} \cdot \frac{d_1 + d_2}{d_1 \cdot d_2}, \quad (3.2)$$

где используется приближение для малого аргумента $tg(x) \approx x$, а угол α аппроксимирован выражением

$$\alpha = h \cdot \frac{d_1 + d_2}{d_1 \cdot d_2}. \quad (3.3)$$

Выражение (3.3) может быть аппроксимировано с использованием безразмерного дифракционного параметра Френеля - Кирхгофа

$$v = h \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (d_1 + d_2)}{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot d_1 \cdot d_2}{\lambda \cdot (d_1 + d_2)}}, \quad (3.4)$$

где α подставляется в радианах, все остальные параметры в метрах. Таким образом, разность фаз Φ может быть вычислена из выражения

$$\Phi = \frac{\pi}{2} \cdot v^2. \quad (3.5)$$

Из выражения (3.5) следует, что сдвиг фазы между прямым и дифракционным лучами является функцией высоты h и взаимного расположения препятствия, излучателя и приемника.

Дифракционные потери мощности в радиоканале могут быть объяснены с помощью зон Френеля. Зоны Френеля представляют собой области, разность хода через которые от излучателя до приемника составляет $n \cdot \lambda/2$ по сравнению с прямым лучом (λ – длина волны, n – целое число).

В мобильной связи обычно наблюдается затенение части зон (источников вторичных волн) и, следовательно, уменьшение доли принятой мощности. В зависимости от геометрии препятствия принятая энергия определяется через векторное суммирование вторичных волн.

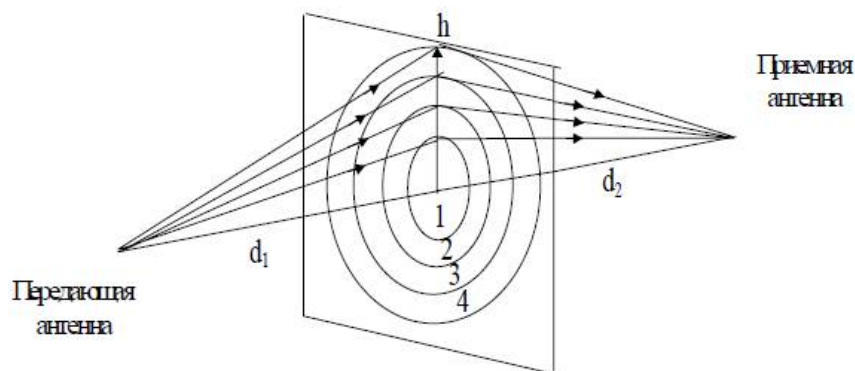


Рис. 15. Формирование зон Френеля

Если препятствие не затеняет первую зону Френеля, то дифракционные потери минимальны и ими пренебрегают. Используют следующее свойство: если открыто не менее 55% первой зоны Френеля, то дальнейшее открытие первой зоны Френеля не уменьшает дифракционные потери.

Модель дифракции радиоволн на одиночном клине

Определение степени ослабления поля холмами и зданиями является достаточно сложной задачей при расчете зон обслуживания. Обычно точный расчет ослабления невозможен, поэтому используют методы расчета поля с необходимыми экспериментальными поправками.

Препятствие в виде одиночного холма или горы может быть обчислено с использованием модели клина. Это простейшая модель препятствия, и быстрый расчет ослабления возможен с использованием классического решения Френеля для дифракции поля на полуплоскости.

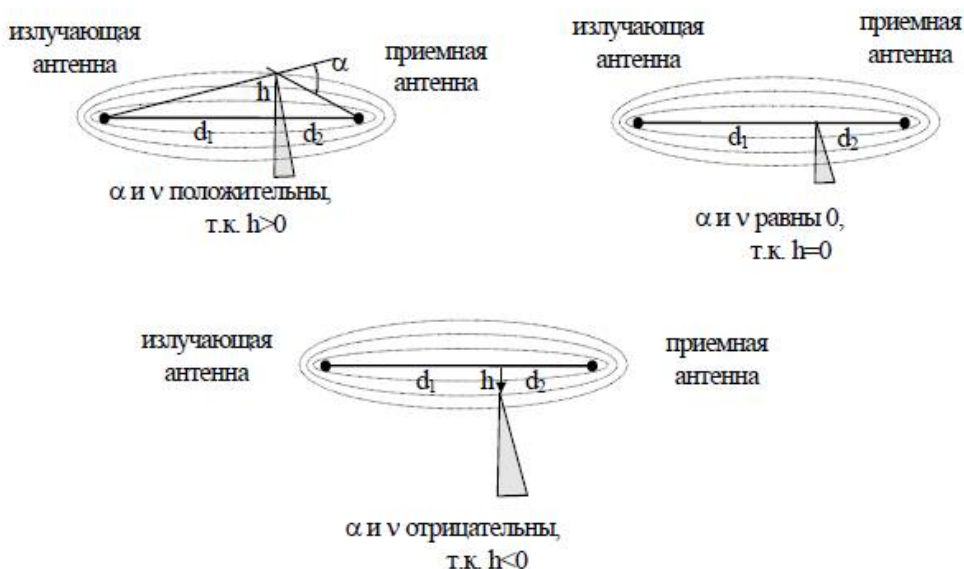


Рис. 16. Варианты перекрытия видимости антенн препятствием

Напряженность поля в точке расположения приемной антенны определяется векторной суммой вторичных источников, лежащих в плоскости, расположенной над препятствием. Напряженность поля при дифракции на клине определяется выражением

$$\frac{E_d}{E_0} = F(v) = \frac{1+j}{2} \int_v^{\infty} e^{-\frac{j\pi t^2}{2}} dt, \quad (3.6)$$

где E_0 – напряженность поля в точке расположения приемной антенны при отсутствии препятствия и земли, а $F(v)$ – комплексный интеграл Френеля. Значе-

ние интеграла $F(v)$ определяется из графиков и таблиц.

Коэффициент дифракционного усиления с препятствием (обычно он меньше 1) по сравнению со свободным пространством

$$G_d = 20\lg|F(v)|. \quad (3.7)$$

График этой функции показан на рис. 17.

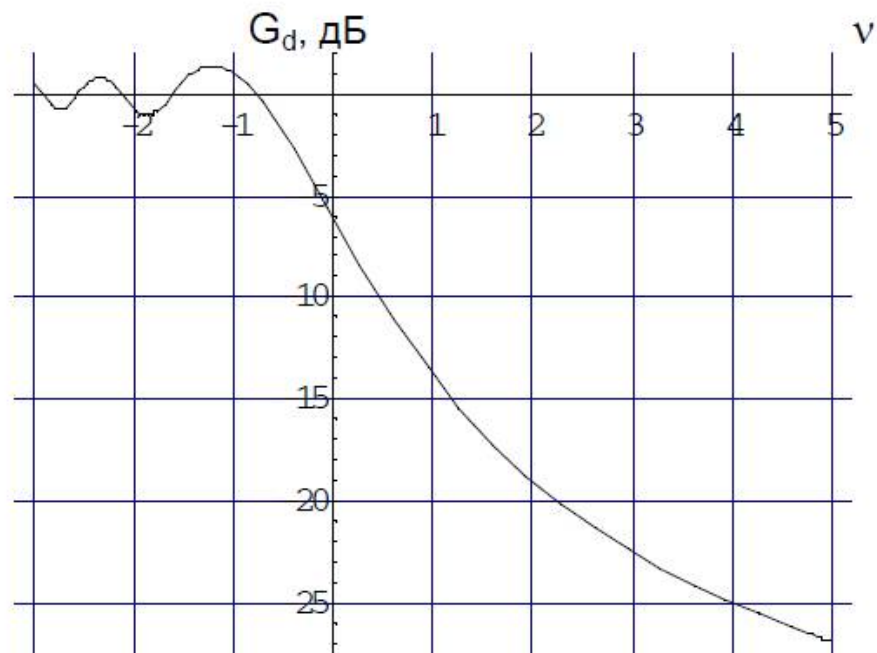


Рис. 17. Зависимость коэффициента дифракционного усиления от значения параметра дифракции v

Пример расчета дифракции системы на клиновидном препятствии

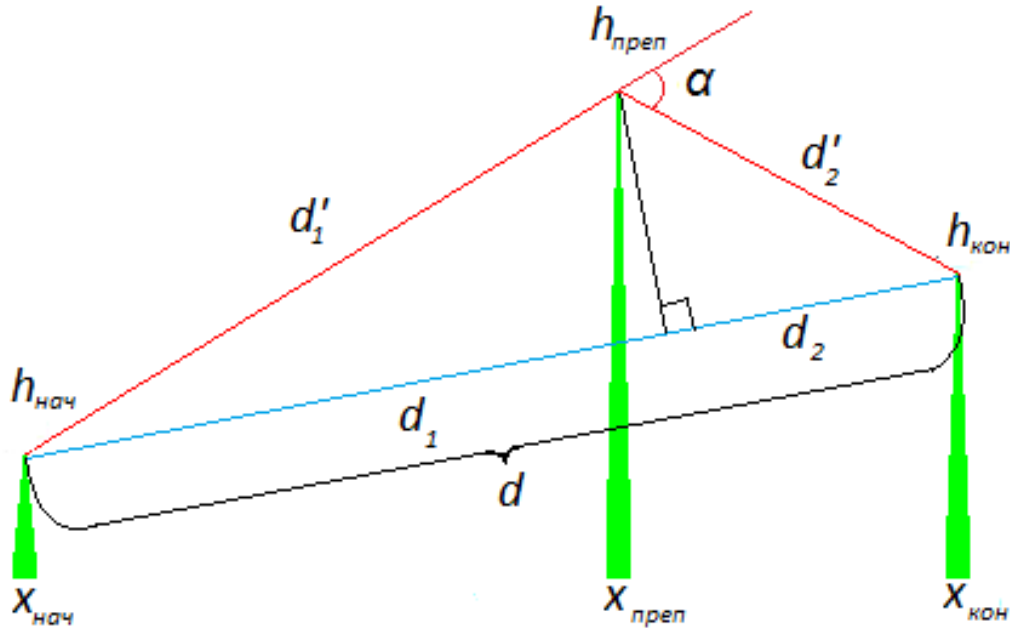


Рис. 18. Дифракция радиоволн на клиновидном препятствии

Вычислим расстояния между координатами точек расположения: излучателя и вершины препятствия – d'_1 (3.8), приемника и вершины препятствия – d'_2 (3.9), излучателя и приемника – d (3.10), где $x_{нач}$, $x_{преп}$, $x_{кон}$, $h_{нач}$, $h_{преп}$, $h_{кон}$ – координаты и высоты излучателя, препятствия и приемника соответственно.

$$d'_1 = \sqrt{(x_{нач} - x_{преп})^2 + (h_{нач} - h_{преп})^2}; \quad (3.8)$$

$$d'_2 = \sqrt{(x_{кон} - x_{преп})^2 + (h_{кон} - h_{преп})^2}; \quad (3.9)$$

$$d = \sqrt{(x_{нач} - x_{кон})^2 + (h_{нач} - h_{кон})^2}. \quad (3.10)$$

Вычислим угол между лучом, проходящим через кромку препятствия и переизлученным лучом – α (3.11), расстояние от излучателя до экрана – d_1 (3.12), расстояние от экрана до приемника – d_2 (3.13).

$$\alpha = \pi - \arccos\left(\frac{d_1'^2 + d_2'^2 - d^2}{2d_1'd_2'}\right); \quad (3.11)$$

$$d_1 = \frac{d_1'^2 + d^2 - d_2'^2}{2d}; \quad (3.12)$$

$$d_2 = \frac{d_2'^2 + d^2 - d_1'^2}{2d}. \quad (3.13)$$

Значение параметра дифракции определяется по формуле (3.14).

$$\nu = h \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (d_1 + d_2)}{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot d_1 \cdot d_2}{\lambda \cdot (d_1 + d_2)}}, \quad (3.14)$$

где h – высота экрана, λ – длина волны.

Коэффициент дифракционного усиления приближенно можно считать

$$G_d = 0, \text{ дБ } \nu \leq -1; \quad (3.15a)$$

$$G_d = 20 \lg(0.5 - 0.62\nu), \text{ дБ } -1 \leq \nu \leq 0; \quad (3.15б)$$

$$G_d = 20 \lg(0.5 \cdot e^{-0.95 \cdot \nu}), \text{ дБ } 0 \leq \nu \leq 1; \quad (3.15в)$$

$$G_d = 20 \lg \left(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 - 0.1 \cdot \nu)^2} \right), \text{ дБ } 1 \leq \nu \leq 2.4; \quad (3.15г)$$

$$G_d = 20 \lg \left(\frac{0.225}{\nu} \right), \text{ дБ } 2.4 \leq \nu. \quad (3.15д)$$

Мощность сигнала определяется по формуле (3.16).

$$P_{\text{с вх}} = P_1 G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot 10^{-(a_1 + a_2)} \cdot G_d^2_{\text{общ}}, \quad (3.16)$$

где P_1 – мощность передатчика, G_1, G_2 – коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника, a_1, a_2 – потери в фидере передающей и приемной антенн.

3.2. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

Таблица 6

Исходные данные для выполнения лабораторной работы

Параметры	1	2	3	4
Частота f , МГц	900	1200	1000	800
Расстояние от излучателя до экрана d_1 , км	1	1,2	0,9	1
Расстояние от экрана до приемника d_2 , км	1	0,8	1	1,1

1. Вычислить дифракционные потери для 3 случаев перекрытия препятствием видимости передающей и приемной антенн (рис. 16):

- а) $h = 25$ м;
- б) $h = 0$ м;
- в) $h = -25$ м.

- по формуле (3.14) вычислить дифракционный параметр v ;
- по рис. 17 и выражениям аппроксимации (3.15а – 3.15д) определить дифракционные потери;
- рассчитать разность хода прямого и отраженного луча Δ по формуле (3.1);
- для определения, в какой зоне Френеля будет верх препятствия, необходимо вычислить параметр n , который удовлетворяет выражению $\Delta = \frac{n \cdot \lambda}{2}$.

2. Изучить интерференционный принцип формирования общей диаграммы направленности совокупности индивидуальных излучателей электромагнитных волн, объединённых в антенную решётку.

3. Познакомиться со способами активного управления формой общей диаграммы направленности антенной решетки.

4. Выяснить возможность использования интерференционного эффекта формирования общего поля системы излучателей для её адаптации к помехам, сосредоточенным по направлениям прихода излучения.

3.3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- кратко описанное теоретическое содержание изучаемого явления;
- исходные данные для расчёта;
- выводы по результатам исследований.

3.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные способы распространения радиоволн.
2. Что такое зоны Френеля?
3. Каким образом возможно объяснить дифракционные потери мощности в радиоканале?
4. Какие возможны варианты перекрытия видимости антенн препятствием?
5. Как определяется напряженность поля в точке расположения приемной антенны?
6. Назовите формулу для расчета мощности сигнала. Дайте характеристику каждого параметра.
7. Проиллюстрируйте зависимость коэффициента дифракционного усиления от значения параметра дифракции v .

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СОТОВОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА GSM-900

Цель работы:

1. Изучение основных технических характеристик, принятых в цифровой сотовой системе подвижной радиосвязи стандарта GSM.
2. Ознакомление с функциональным построением и интерфейсом системы GSM.

4.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

GSM (Global System for Mobile communications) – это открытая цифровая сотовая технология, используемая для передачи мобильной голосовой связи и передачи данных [12, 13]. GSM отличается от беспроводных систем первого поколения тем, что использует цифровые технологии и методы передачи данных множественного доступа с временным разделением (TDMA). GSM – это система с коммутацией каналов, которая делит каждый канал 200 кГц на восемь временных интервалов по 25 кГц.

GSM поддерживает скорость передачи данных до 9,6 Кбит/с, что позволяет передавать базовые услуги передачи данных, такие как SMS (Short Message Service). Еще одним важным преимуществом является возможность международного роуминга, позволяющая пользователям получать доступ к тем же услугам во время поездок за границу, что и дома. Это дает потребителям одинаковое количество подключений в более чем 210 странах. Спутниковый роуминг GSM также расширил доступ к услугам в районах, где наземное покрытие недоступно.

GSM-900 использует 890-915 МГц для передачи информации от мобильной станции к базовой приемопередающей станции (восходящая линия связи) и 935-960 МГц для другого направления (нисходящая линия связи), обеспечивая 124 радиочастотных канала (номера каналов от 1 до 124), расположенных на расстоянии 200 кГц. Используется дуплексный интервал 45 МГц. В некоторых странах диапазон GSM-900 был расширен, чтобы охватить более широкий частотный диапазон. Этот "расширенный GSM", E-GSM, использует частотный диапазон 880-915 МГц (восходящая линия связи) и 925-960 МГц (нисходящая линия связи), добавляя 50 каналов (номера каналов от 975 до 1023 и 0) к исходному диапазону GSM-900. Также используется спецификация GSM для железных дорог, GSM-R, которая использует частотный диапазон 876-915 МГц (восходящая линия связи) и 921-960 МГц (нисходящая линия связи). GSM-R предоставляет дополнительные каналы и специализированные услуги для использования железнодорожным персоналом. Все эти варианты включены в спецификацию GSM-900.

Сотовая связь – это термин, используемый для описания полосы 850 МГц, так как оригинальная аналоговая сотовая система мобильной связи была выделена в этом спектре. Провайдеры обычно работают в одном или двух частотных диапазонах.

Метод, выбранный GSM, представляет собой комбинацию множественного доступа с временным и частотным разделением (TDMA/FDMA). Часть FDMA включает в себя деление по частоте (максимальной) полосы пропускания 25 МГц на 124 несущие частоты, расположенные на расстоянии 200 кГц друг от друга. Каждой базовой станции назначается одна или несколько несущих частот. Каждая из этих несущих частот затем делится во времени, используя схему TDMA. Фундаментальная единица времени в этой схеме TDMA называется периодом всплеска и длится 15/26 мс (или приблизительно 0,577 мс). Восемь периодов всплеска сгруппированы в кадр TDMA (120/26 мс, или приблизительно 4,615 мс), который образует базовую единицу для определения логических каналов. Один физический канал – это один период пакета на кадр TDMA.

Множественный доступ с временным разделением (TDMA) – это метод доступа к каналу для сетей с общей средой (обычно радио). Он позволяет нескольким пользователям совместно использовать один и тот же частотный канал, разделяя сигнал на разные временные интервалы. Пользователи передают данные в быстрой последовательности, один за другим, каждый использует свой собственный временной интервал. Это позволяет нескольким станциям совместно использовать одну и ту же среду передачи (например, радиочастотный канал), используя при этом только ту часть ее полосы пропускания, которая им требуется. TDMA используется в цифровых сотовых системах 2G, таких как Global System for Mobile Communications (GSM), IS-136, Personal Digital Cellular (PDC) и iDEN. Он также широко используется спутниковых системах и системах боевой радиосвязи.

TDMA – это тип мультиплексирования с временным разделением каналов, с тем особым моментом, что вместо одного передатчика, подключенного к одному приемнику, есть несколько передатчиков. В случае восходящей линии связи от мобильного телефона к базовой станции это становится особенно сложным, потому что мобильный телефон может перемещаться и варьировать время, необходимое для того, чтобы его передача соответствовала разрыву в передаче от своих знакомых.

В начале 1980-х годов многие страны внедрились сотовые системы первого поколения, основанные на технологии множественного доступа с частотным разделением (FDMA) и аналоговой FM-технологии. В FDMA существует один канал на несущую. Когда мобильная станция обращается к системе, фактически назначаются две несущие (каналы): одна для прямой (с базовой на мобильную) и одна для обратной (с мобильной на базовую) связи. Разделение прямой и обратной несущих частот необходимо для реализации дуплексера – сложного устройства фильтров, которое изолирует прямой и обратный каналы, тем самым предотвращая помехи самому радиопередатчику.

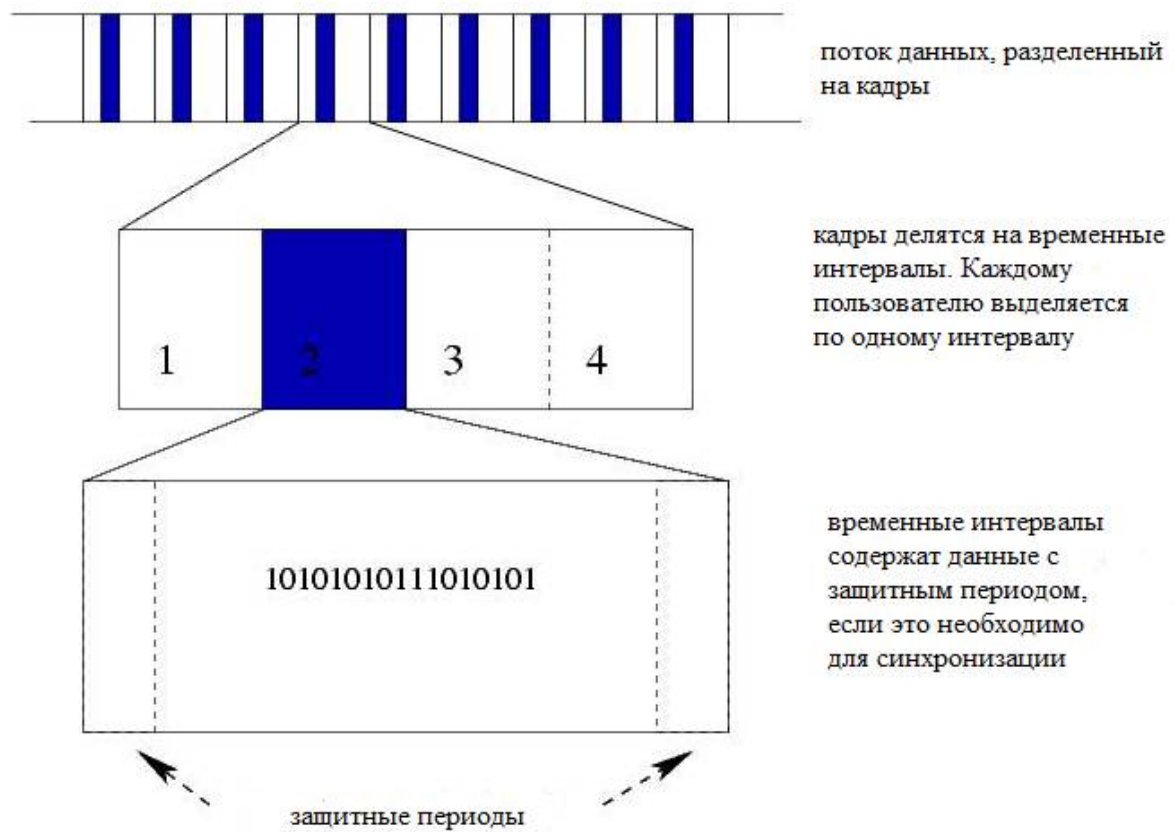


Рис. 19. Множественный доступ с временным разделением

Архитектура GSM-протокола показана на рис. 20.

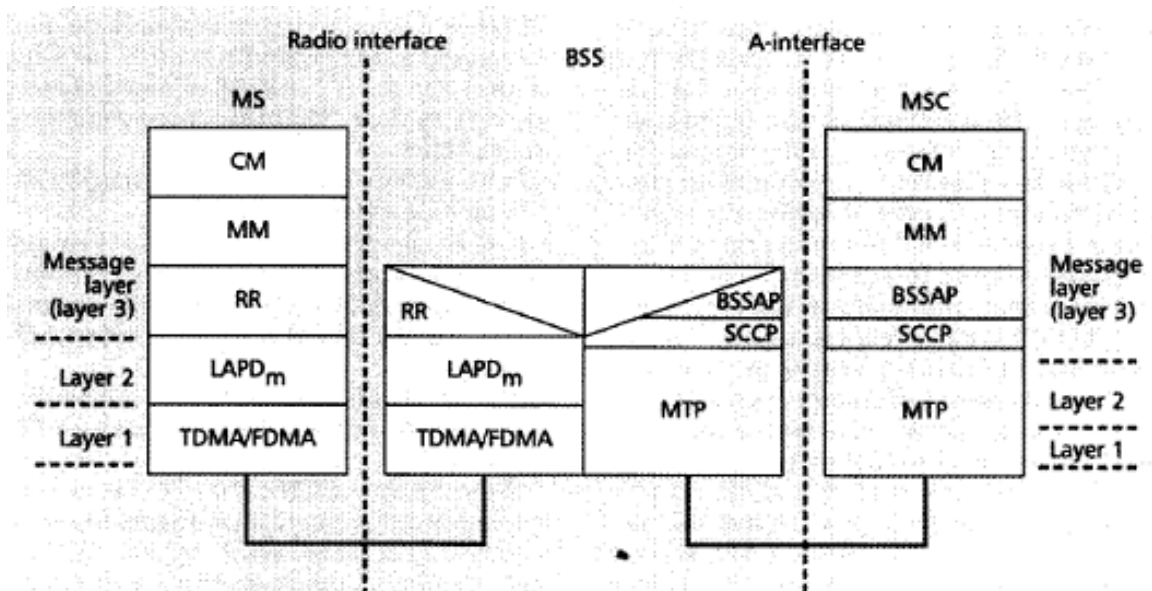


Рис. 20. Архитектура GSM-протокола

1. Мобильная станция

Мобильная станция (MS) состоит из мобильного оборудования (терминала) и смарт-карты, называемой модулем идентификации абонента

(SIM). SIM-карта обеспечивает личную мобильность, так что пользователь может иметь доступ к подписанным услугам независимо от конкретного терминала. Вставив SIM-карту в другой GSM-терминал, пользователь может принимать звонки на этом терминале, совершать звонки с этого терминала и получать другие услуги.

Мобильное оборудование однозначно идентифицируется международным идентификатором мобильного оборудования (IMEI). SIM-карта содержит международный идентификатор мобильного абонента (IMSI), используемый для идентификации абонента системы, секретный ключ для аутентификации и другую информацию. IMEI и IMSI независимы, тем самым организуют личную мобильность. SIM-карта может быть защищена от несанкционированного использования паролем или личным идентификационным номером.

2. Мобильный коммутационный центр

Центральным компонентом сетевой подсистемы является мобильный коммутационный центр (MSC). Он действует как обычный узел коммутации PSTN или ISDN и дополнительно предоставляет все функции, необходимые для обработки мобильного абонента, такие как регистрация, аутентификация, обновление местоположения, передача обслуживания и маршрутизация вызовов абоненту, который находится в роуминге. Эти услуги предоставляются совместно с несколькими функциональными объектами, которые вместе образуют сетевую подсистему. MSC обеспечивает подключение к фиксированным сетям (таким как PSTN или ISDN). Сигнализация между функциональными объектами в сетевой подсистеме использует сигнальную систему № 7 (SS7), которая используется для магистральной сигнализации в ISDN и широко применяется в современных сетях общего пользования.

Регистр домашнего местоположения (HLR) и регистр местоположения посетителя (VLR) вместе с MSC обеспечивают маршрутизацию вызовов и возможности роуминга GSM. HLR содержит всю административную информацию о каждом абоненте, зарегистрированном в соответствующей сети GSM, а также текущее местоположение мобильного телефона. Местоположение мобильного устройства обычно представляется в виде сигнального адреса VLR, связанного с мобильной станцией.

Регистр местоположения посетителя (VLR) содержит выбранную административную информацию из HLR, необходимую для управления вызовами и предоставления услуг, для каждого мобильного телефона, находящегося в настоящее время в географической зоне, контролируемой VLR. Хотя каждый функциональный объект может быть реализован как самостоятельный блок, все производители коммутационного оборудования на сегодняшний день реализуют VLR вместе с MSC, так что географический район, контролируемый MSC, соответствует тому, что контролируется VLR, что упрощает требуемую сигнализацию. MSC не содержит информации о конкретных мобильных станциях – эта информация хранится в регистрах местоположения.

Два других регистра используются в целях аутентификации и безопасности. Регистр идентификации оборудования (EIR) – это база данных, содержащая список всех допустимых мобильных устройств в сети, где каждая мобильная станция идентифицируется по ее международному идентификатору мобильного оборудования (IMEI). IMEI помечается как недопустимый, если он был объявлен украденным или не утвержден по типу. Идентификационный центр (AuC) – защищенная база данных, в которой хранится копия секретного ключа, которая используется для аутентификации и шифрования по радиоканалу.

3. Подсистема базовой станции (BSS)

Подсистема базовой станции состоит из двух частей: базовой приемопередающей станции (BTS) и контроллера базовой станции (BSC). Они взаимодействуют через стандартизированный интерфейс Abis, позволяя (как и в остальной части системы) работать между компонентами, изготовленными различными поставщиками.

Базовая приемопередающая станция содержит радиопередатчики, которые определяют ячейку и обрабатывают протоколы радиосвязи с мобильной станцией. В большом городском районе потенциально будет развернуто большое количество BSC, поэтому требования к ней: прочность, надежность, мобильность и минимальная стоимость.

Контроллер базовой станции управляет ресурсами радио для одного или нескольких BTS. Он обрабатывает настройку радиоканала, скачкообразную перестройку частоты и передачу обслуживания. BSC – это соединение между мобильной станцией и мобильным сервисным коммутационным центром (MSC).

Структура GSM-сети показана на рис. 21.

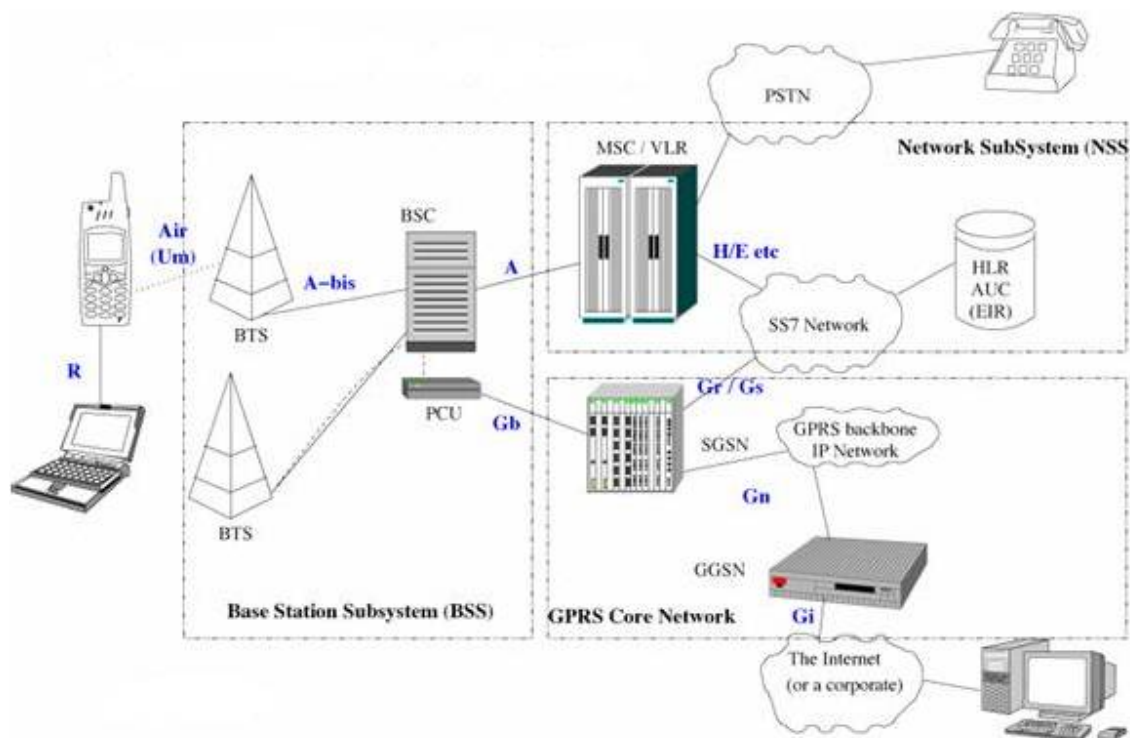


Рис. 21. Структура GSM-сети

4.2. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

1. Изучить основные характеристики стандарта GSM.
2. Ознакомиться с функциональной схемой и составом оборудования.
3. Изучить состав мобильной станции, мобильного коммутационного центра и подсистемы базовой станции.
4. Ознакомиться с процедурой проверки сетью подлинности (аутентификации) абонента.

4.3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- кратко описанное теоретическое содержание изучаемого явления;
- выполнение всех пунктов лабораторного задания;
- выводы.

4.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные технические характеристики стандарта GSM.
2. Какая архитектура GSM-протокола?
3. Назначение и функции, выполняемые MSC.
4. Перечислите состав долговременных данных, хранящихся в регистрах HLR и VLR.
5. Каким образом реализуется процедура проверки сетью подлинности абонента?
6. Какой состав оборудования базовой станции BSS?
7. Расскажите о назначении мобильной станции.

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ССПО

Цель работы:

1. Ознакомление с методами исследования влияния параметров земной поверхности и городской инфраструктуры на энергетические показатели ССПО с использованием моделей предсказания уровня сигнала.
2. Расчет геометрических параметров зоны Френеля для трасс радиосигнала в ССПО с помощью калькулятора СПР.
3. Формирование умения пользования автоматизированным калькулятором СПР.

5.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

ССПО обычно работают в диапазоне ультравысоких частот (УВЧ). Параметры радиоканала, определенные при распространении радиоволн в свободном пространстве не могут быть полностью использованы для расчета радиолиний, поскольку не учитывают особенности рельефа местности и городской застройки в зоне действия ССПО. Таким образом, расчет производится с использованием моделей прогнозирования уровня принимаемого радиосигнала, которые учитывают параметры рельефа [14].

Основные характеристики рельефа:

- высота препятствий;
- форма и взаимное расположение препятствий;
- наклон местности;
- характер застройки;
- физические особенности поверхности.

Учет влияния рельефа местности на трассе распространения сигнала между БС и АС на уровень сигнала в точке приема осуществляется с помощью детерминированного и статистического методов (рис. 22).



Рис. 22. Классификация моделей описания трассы

Первый метод позволяет рассчитать ослабление сигнала на открытых трассах в зоне освещенности с конкретным профилем местности и применяется для линии связи по схеме «от точки к точке» (например, между БС и АС).

Второй метод часто применяют для ССПО, где БС должна обеспечить связь на территории соты по схеме «от точки к зоне» или «от зоны к зоне», при этом параметры рельефа считаются случайными величинами. Рельеф местности в соте оценивают параметрами, усредненными на участках трассы протяженностью 5...10 км. Выбор энергетических параметров радиоинтерфейса должен обеспечить уверенный прием сигнала в зоне обслуживания БС. В точках, которые расположены на границах соты, уровень принимаемого сигнала будет различаться из-за различного влияния застройки и рельефа местности. Таким образом, в ССПО определяют усредненную медианную мощность сигнала (УММС) путем усреднения по двум параметрам: по времени и по местоположению (по числу точек приема). УММС – значение, которое превышает в течение 50% времени месяца и в 50% точек приема, находящихся на данном расстоянии от передающей станции.

Существует ряд моделей для прогнозирования уровня радиосигнала в ССПО.

Метод Okumura

Этот метод является одним из широко используемых методов для расчета радиолиний в условиях города. Он пригоден для диапазона частот 150-2000 МГц и расстояний от 1 до 100 км. Данный метод может быть использован, если эффективная высота подвеса базовой антенны составляет от 30 до 1000 м.

Окумуга предложил сетку кривых для расчета среднего ослабления относительно ослабления в свободном пространстве $A(f, d)$ в условиях города с квазигладким профилем с изотропной передающей антенной, поднятой на эффективную высоту $h_{1E} = 200$ м и мобильной антенной высотой $h_{2E} = 3$ м. Графики получены в результате многих измерений с ненаправленными антеннами базовой станции и мобильного приемника и представлены в виде графика для диапазона частот 100-1920 МГц как функция дальности от 1 до 100 км.

Для определения потерь на радиолинии рассчитывается ослабление поля в свободном пространстве, затем по кривым графика (рис. 23) определяется величина $A(f, d)$ и добавляется к ослаблению в свободном пространстве с корректирующей поправкой, которая зависит от степени неровности профиля трассы:

Для такой модели уровень УММС определяется соотношением

$$p_M(d) = p_{с\text{ вх}}(d) = p_0(f, d) - A(f, d) + H_1(h_1) + H_2(h_2) - G_{AREA}, \quad (5.1)$$

где $p_0(f, d)$ – уровень мощности сигнала в точке приема при распространении в свободном пространстве – рассчитывается в соответствии с формулой (1.9);

$A(f, d)$ – дополнительное ослабление сигнала в городе, определенное для квазигладкого городского района при базовых высотах антенн БС и АС;

$H_1(h_1)$ – коэффициент «высота-усиление антенны БС», учитывающий, что высота антенны БС может отличаться от значения 200м (эффективное усиление передающей антенны);

$H_2(h_2)$ – коэффициент «высота-усиление антенны АС», учитывающий влияние реальной высоты антенны АС 200м (эффективное усиление приемной антенны).

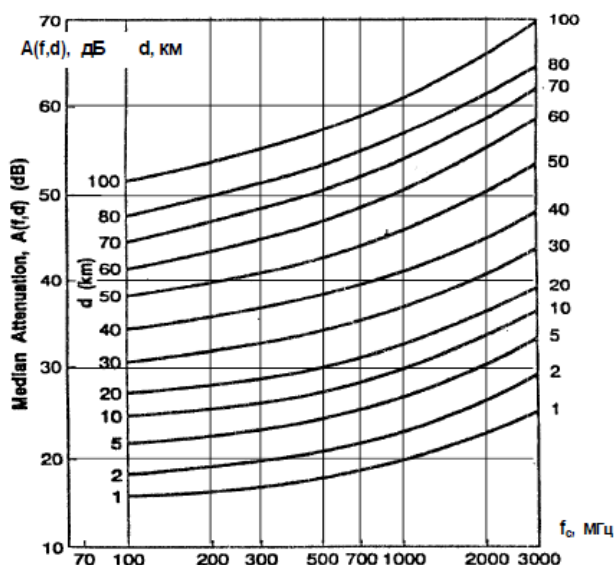


Рис. 23. Частотная зависимость усредненного ослабления сигнала по отношению к свободному пространству для квазигладкого профиля трассы

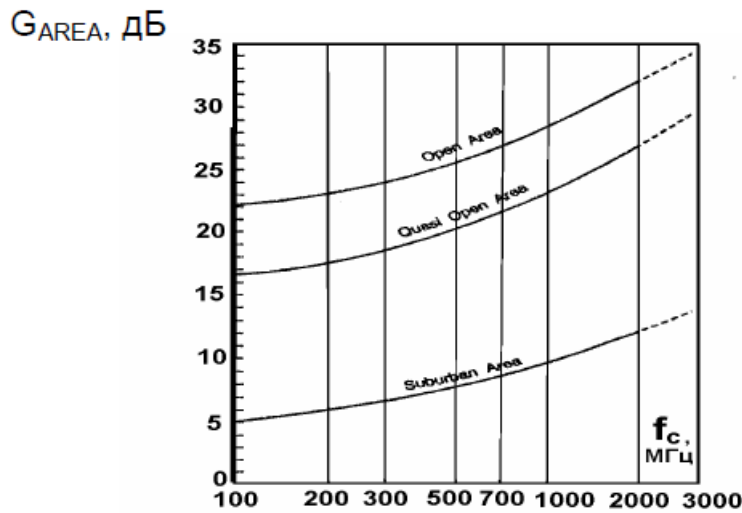


Рис. 24. Поправочный коэффициент, обусловленный профилем радиотрассы

Кроме того, Okumura нашел, что величина $H_1(h_1, d)$ изменяется по закону 20 дБ/декада, а $H_2(h_2, d)$ для высот менее 3 м – 10 дБ/декада

$$H_1(h_1) = 20 \lg \left(\frac{h_1}{200} \right), 1000 \text{ м} > h_1 > 10 \text{ м}; \quad (5.2a)$$

$$H_2(h_2) = 10 \lg \left(\frac{h_2}{3} \right), h_2 < 3 \text{ м}; \quad (5.2б)$$

$$H_2(h_2) = 20 \lg \left(\frac{h_2}{3} \right), 10 \text{ м} > h_2 > 3 \text{ м}. \quad (5.2в)$$

Модель Окумура полностью построена на экспериментальных данных. Модель Окумура наиболее простая и достаточно точная для расчета потерь в сотовых системах связи и мобильной связи.

Главный недостаток модели – работа с графиками и невозможность полноценно учесть быстроизменяющиеся условия в профиле трассы.

В основном рассмотренный метод применяется для расчета радиолиний в урбанизированных и сверхурбанизированных районах. Разница расчетных и экспериментально измеренных напряженностей поля обычно не превышает 10-13 дБ.

В модели Окамуры-Хата результаты экспериментальных измерений, представленные в модели Окамуры графиками, аппроксимированы аналитическими формулами [10], которые положены в основу функционирования калькулятора СПР.

Метод Xia-Bertoni

Модель Xia-Bertoni – физико-статистическая модель распространения, которая описывает распространение сигнала в диапазоне УВЧ (от 300 МГц до 3 ГГц) в городах, где высота передатчиков находится на средней высоте крыши. Модель учитывает профили местности и зданий для оценки потерь распространения. С помощью модели Xia-Bertoni возможно рассчитать дифракционные потери для каждой точки расчета, которые зависят от средней высоты зданий, расположенных между передатчиком и приемником.

Математические формулы, которые используются для модели Xia-Bertoni

$$L(dB) = A + B \cdot \log(d) + C \cdot \log(f) + D \cdot \log(a) + E \cdot \log(b) + F \cdot \log(r) + G \cdot \log(\beta); \quad (5.3)$$

$$r = \sqrt{h_m^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2}, \quad (5.4)$$

где d – расстояние между передатчиком и приемником в км, f – рабочая частота в МГц, b – среднее расстояние между зданиями, h_m – высота приемника и w – средняя ширина улиц.

Метод Walfisch-Ikegami

Модель Walfisch-Ikegami возникает в результате комбинации модели Walfisch-Bertoni и модели Ikegami. Эта модель предназначена для систем, работающих в диапазоне УВЧ от 800 МГц до 2000 МГц в условиях плотной городской застройки. Модель учитывает высоту зданий, ширину улиц, расстояние между зданиями и направление улиц по отношению к распространению сигнала. Модель различает два различных сценария, к которым она применяет следующие формулы (5.5-5.7):

Потери распространения при наличии прямой видимости вычисляются с помощью

$$L_d(dB) = 42,6 + 26 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(f), \quad (5.5)$$

где d – горизонтальное расстояние между передатчиком и приемником в км, а f – несущая частота, выраженная в МГц.

В случае отсутствия линии прямой видимости по направлению к передатчику потери рассчитываются как:

$$L_d = L_o + \begin{cases} L_{rts} + L_{msd} & \text{при } L_{rts} + L_{msd} > 0; \\ 0 & \text{при } L_{rts} + L_{msd} \leq 0; \end{cases} \quad (5.6)$$

$$L_o(dB) = 32,4 + 20 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(f), \quad (5.7)$$

где L_o – это потери в свободном пространстве, d – горизонтальное расстояние между передатчиком и приемником в км, f – несущая частота, выраженная в МГц, L_{rts} – дифракционные потери, возникающие на крыше последнего здания, по которому распространяется сигнал, а L_{msd} – дифракционные потери на нескольких углах крыш зданий.

Понятие зоны Френеля позволяет следующим образом оценить размер преграды в окрестности трассы, которая может повлиять на распространение волны: если внутри окружности, проведенной вокруг точки между ПРМ и ПРД и радиус которой составляет приблизительно $0,6H_0$, нет никаких преград, то все другие преграды не будут создавать переотраженной волны и ослаблять сигналы на трассе. Первая зона Френеля представляет собой сфероид (рис. 25), охватывающий передающую (TX) и приемную (RX) антенны, все точки которого соответствуют разности хода прямого 1 и переотраженного 2 лучей, равной $\lambda/2$.

H_0 – радиус первой зоны Френеля (см. лабораторное занятие № 2):

$$H_0 = [d\lambda k(1 - k)/3]^{0.5}. \quad (5.8)$$

Принцип расчета ССПО в целом на основе двухлучевой модели трассы и используемые при этом параметры иллюстрируются на рис. 25.

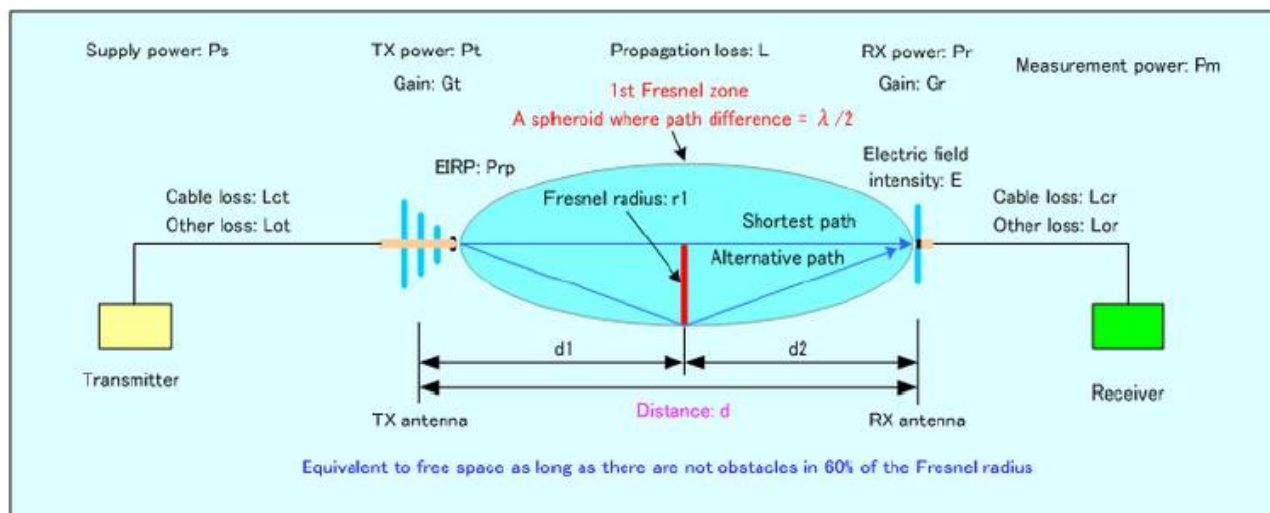


Рис. 25. Модель ССПО с использованием двухлучевой модели трассы

5.2. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

Таблица 7

Исходные данные для выполнения лабораторной работы

Параметры	1	2	3	4
Частота f , МГц	1000	3000	2000	700
Координата самой высокой точки профиля d_c	$0,7d$	$0,6d$	$0,8d$	$0,75d$
Высота расположения антенны БС h_1 , м	35	30	40	50
Высота расположения антенны АС h_2 , м	5	9	8	7
Излученная мощность P_1 , Вт	20	19	15	22
Коэффициент усиления антенны G_1 , дБ	15	17	20	19
Коэффициент усиления антенны G_2 , дБ	2	1,8	1,5	3
Радиус соты r_0 , км	10	5	20	50
Протяженность трассы d	r_0	r_0	r_0	r_0
Потери в фидере передающей и приемной антенн $a_1 = a_2$, дБ	0.5	0,3	0,6	0,7

1. Выполнить предварительные расчеты:

- зависимости размеров зоны Френеля от расстояния между БС и АС в пределах прямой видимости $d_{ПВ}$ в соответствии с формулой (5.8) для различных вариантов расположения неровности на трассе;

- зависимости усредненной медианной мощности сигнала (УММС) $P_M = P_{C\text{ ВХ}}$ (5.1) и уровня мощности p_m (в дБ) сигнала от БС на входе приемника АС от протяженности трассы $0 < d < d_{ПВ}$, высот передающей h_1 и приемной антенн h_2 и частоты для ССПО цифрового стандарта.

2. Найти средние потери с использованием метода Okumura для разнеса передающей и приемной антенн d , если высота подвеса передающей антенны h_1 , приемной – h_2 , а связь ведется в условиях города. Для этого необходимо:

- вычислить потери в свободном пространстве по формуле из первой лабораторной работы (1.17);
- определить по графикам Okumura (рис. 23, 24) дополнительное ослабление сигнала в городе $A(f, d)$ и поправочный коэффициент G_{AREA} ;
- с помощью выражений (5.2а-5.2в) вычислить коэффициент «высо-

та-усиление антенны БС» $H_1(h_1)$ и коэффициент «высота-усиление антенны АС» $H_2(h_2)$;

- по формуле (5.1) вычислить средние потери.

3. Расчет параметров первой зоны Френеля

3.1. Запустить программу MRCS.exe (Калькулятор СПР)

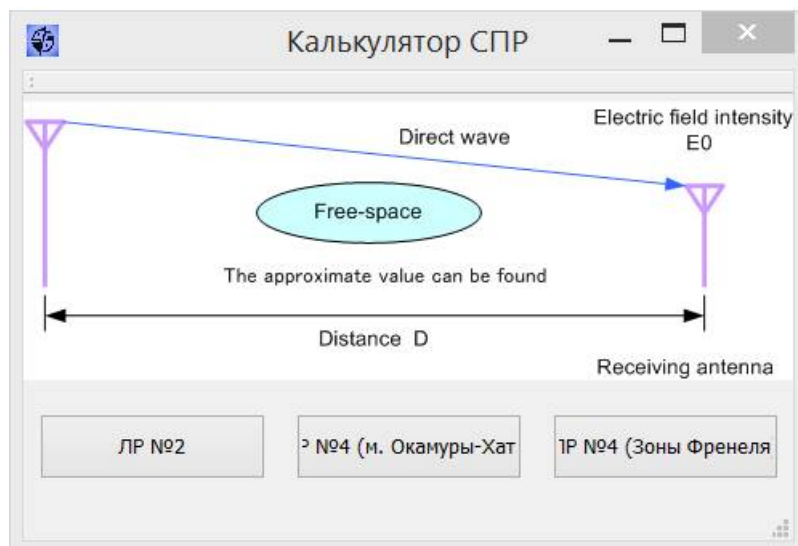


Рис. 26. Интерфейс программы MRCS.exe

3.2. Нажать на кнопку «ЛР №4 (Зоны Френеля)»

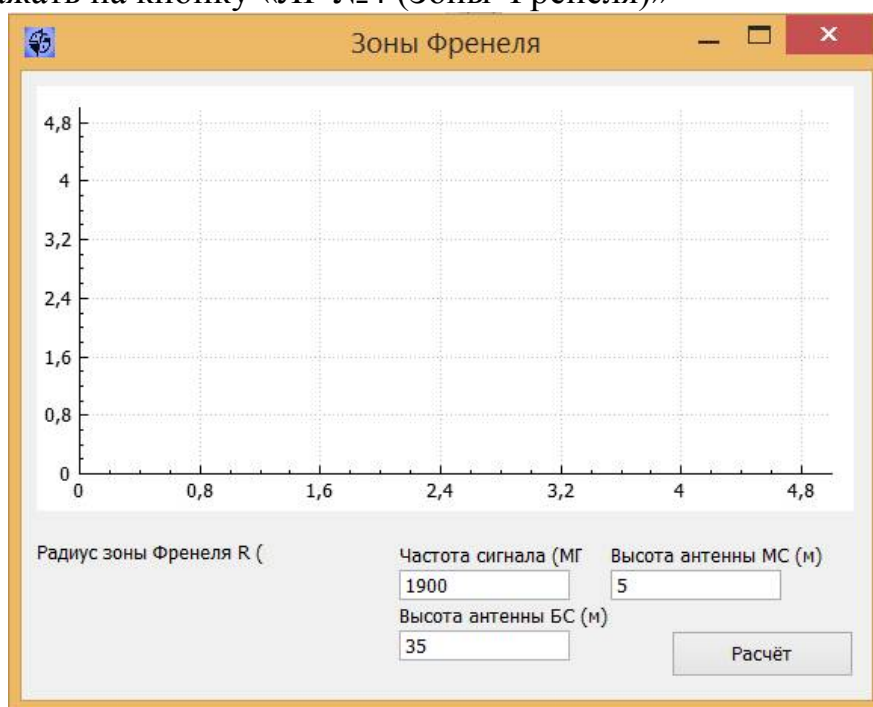


Рис. 27. Окно для построения зоны Френеля

3.3. Внести необходимые данные для расчета (для каждой группы студентов параметры расчета уточнять у преподавателя), где:

- f – частота сигнала (МГц);

- h_1 – высота БС (м);

- h_2 – высота АС (м).

3.4. Нажать кнопку «Расчет» для построения зоны Френеля

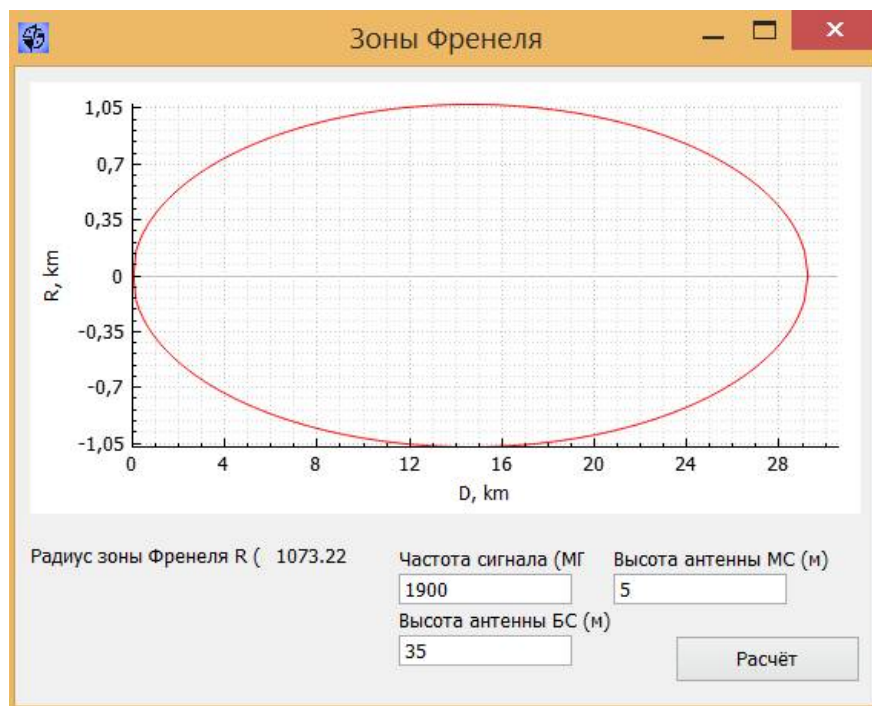


Рис. 28. График зоны Френеля

Данные графики показывают радиус зоны Френеля R, km от дальности радиолинии D, m .

3.5. Зафиксировать скриншоты интерфейса калькулятора СПР при использовании исходных данных, принятых при предварительных расчетах, и сделать выводы:

- о соответствии полученных результатов и результатов предварительных расчетов;

- о применении понятия зоны Френеля в ССПО и использовании полученных результатов для оценки параметров сигнала в точке приема.

4. Расчет уровня сигнала на входе приемника с учетом влияния препятствий в соответствии с моделью Окамуры-Хата

4.1. Запустить программу MRCS.exe (Калькулятор СПР)

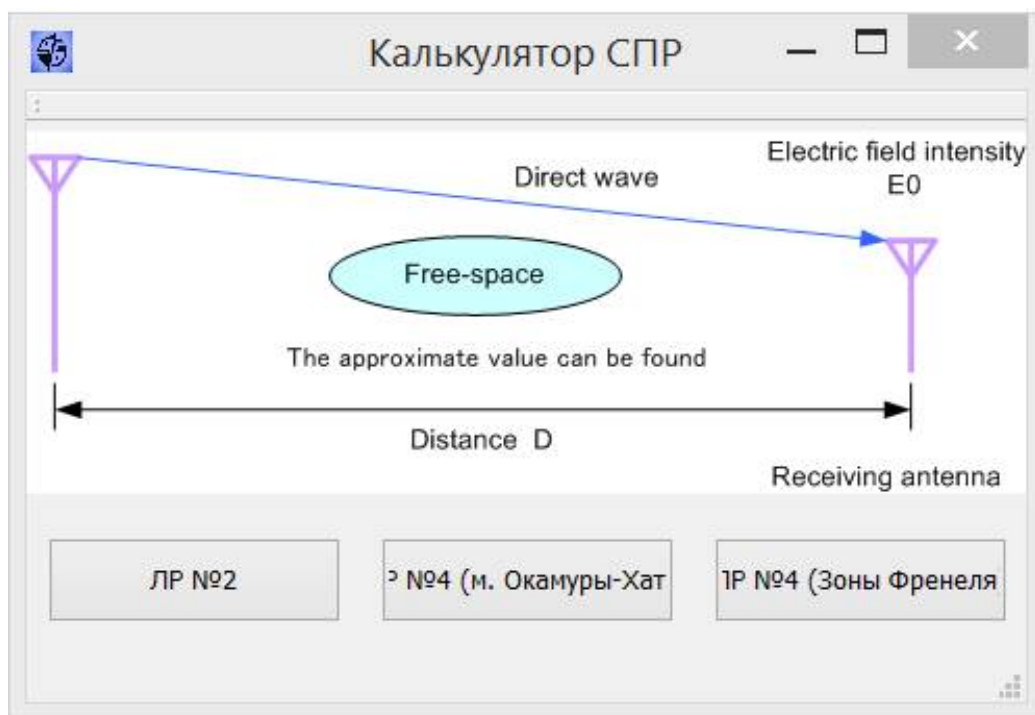


Рис. 29. Интерфейс программы MRCS.exe

4.2. Нажать на кнопку «ЛР №4 (м. Окамуры-Хата)»

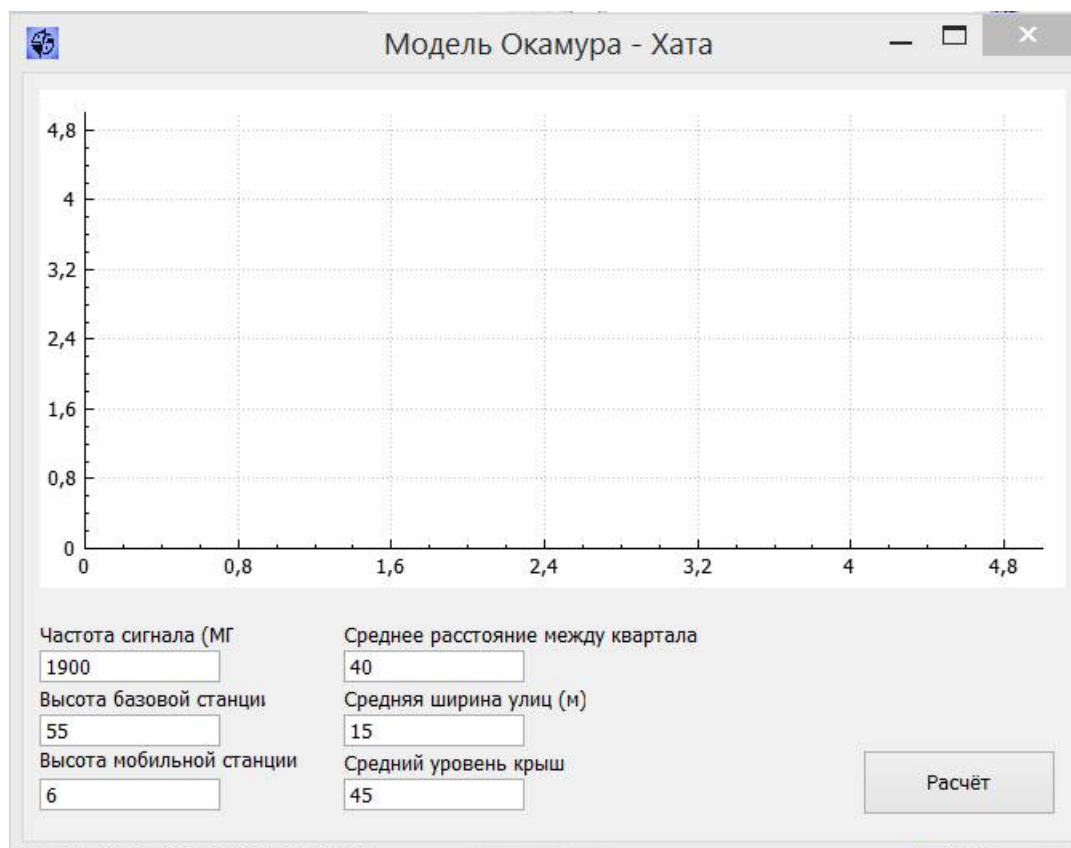


Рис. 30. Окно для расчета уровня сигнала на входе приемника с учетом влияния препятствий в соответствии с моделью Окамуры-Хата

4.3. Внести необходимые данные для расчета (для каждой группы студентов параметры расчета уточнять у преподавателя), где:

- f – частота сигнала (МГц);
- h_1 – высота БС (м);
- h_2 – высота АС (м);
- Средний уровень крыш (м);
- Средняя ширина улиц (м);
- Среднее расстояние между кварталами.

4.4. Нажать кнопку «Расчет» для определения энергетических параметров радиоволн при их распространении между БС и АС в различных географических условиях для модели Окамуры-Хата (рис. 31):

- свободное пространство (Freespace);
- открытая местность (Open land);
- пригород (Suburbia);
- средний город (Medium city);
- большой город (Large city).

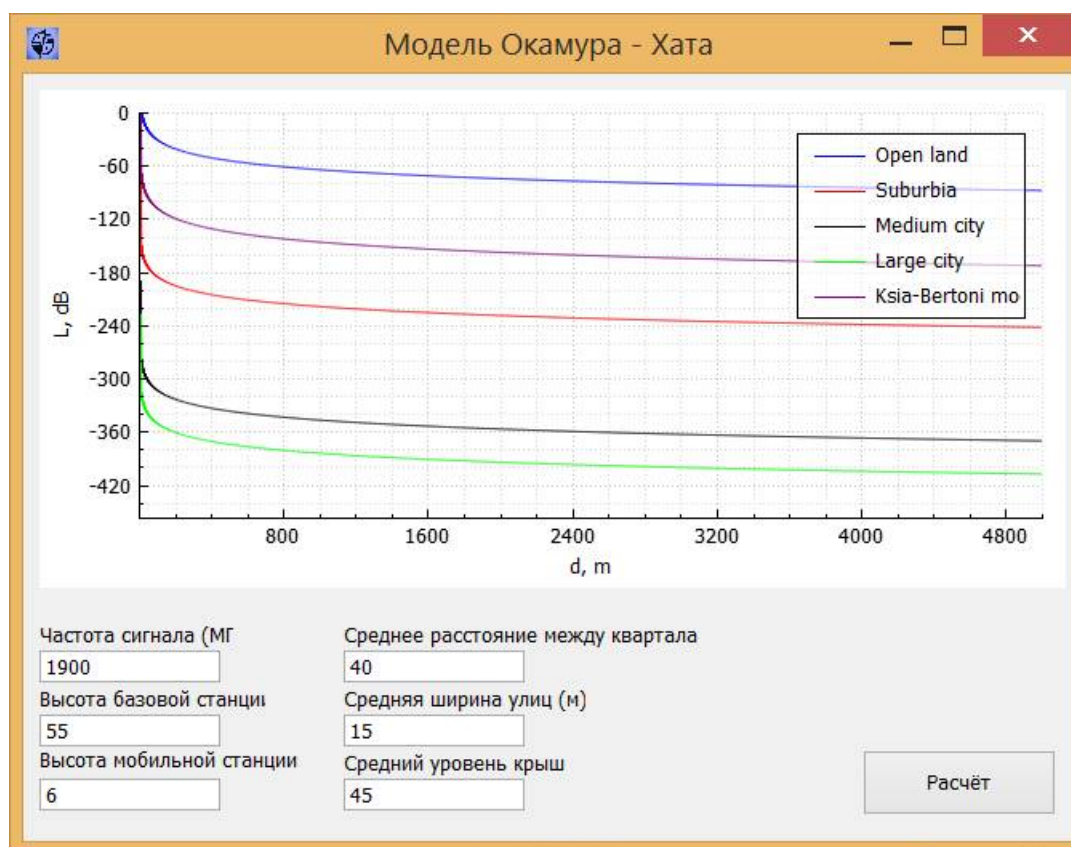


Рис. 31. Графики для определения энергетических параметров радиоволн при их распространении между БС и АС в различных географических условиях для модели Окамуры-Хата

Данные графики показывают мощность сигнала L, dB на максимальной дистанции d, m .

4.5. Зафиксировать скриншоты интерфейса калькулятора СПР при использовании исходных данных, принятых при предварительных расчетах, и сделать выводы:

- о соответствии полученных результатов и результатов предварительных расчетов;

- о применении модели Окамуры-Хата в ССПО и использовании полученных результатов для оценки параметров сигнала в точке приема.

5.3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- кратко описанное теоретическое содержание изучаемого явления;
- исходные данные для расчёта;
- результаты по всем пунктам лабораторного задания;
- графические материалы;
- выводы по результатам исследований.

5.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое зона Френеля?
2. По каким параметрам определяют усредненную медианную мощность сигнала?
3. Какими способами возможно произвести расчет уровня сигнала на входе приемника?
4. Поясните понятие: «квазигладкий» профиль трассы.
5. Для чего предназначена модель Окамуры?
6. Для чего предназначена модель Окамуры-Хата?
7. Какие параметры можно рассчитывать с помощью калькулятора СПР?

6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ И СПОСОБОВ ИХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Цель работы:

1. Ознакомление с методами исследования и расчета основных технических характеристик спутниковых систем связи (ССС).
2. Расчет энергетических показателей СССР.
3. Формирование навыков применения прикладных программ для расчета параметров передатчика и приемника СССР.

6.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Спутник связи – это станция микроволнового ретранслятора, которая позволяет двум или более пользователям с соответствующими земными станциями передавать или обмениваться информацией в различных формах. Спутник на геостационарной орбите Земли (ГСО) вращается вокруг Земли в плоскости экватора один раз в 24 часа, поддерживая точную синхронизацию с вращением Земли.

Существуют два других класса 24-часовых орбит: геосинхронная орбита и высокоэллиптическая синхронная орбита. Хорошо известно, что система из трех спутников в ГСО отделена друг от друга 120 градусами долготы, как показано на рисунке 32, может принимать и посылать радиосигналы практически по всем населенным частям земного шара. Данный ГСО спутник имеет область покрытия, проиллюстрированную заштрихованным овалом, в пределах которого земные станции могут общаться со спутником и быть связаны между собой. Дальность от пользователя до спутника составляет минимум 36 000 км, что делает конструкцию СВЧ-линии довольно жесткой с точки зрения обеспечения мощности принимаемого сигнала. Кроме того, это расстояние создает задержку распространения примерно в четверть секунды для одного перехода между парой пользователей.

ГСО является идеальным случаем всего класса геосинхронных (или синхронных) орбит, которые имеют 24-часовой период обращения, но обычно наклонены по отношению к экватору и/или эллиптической форме. Если смотреть с земли, синхронный спутник на наклонной орбите, по-видимому, смещается в течение дня выше и ниже своего нормального положения в небе. Наклонение контролируется с помощью бортовой двигательной установки с достаточным количеством топлива для коррекции в течение всего срока службы спутника. Синхронный спутник, не предназначенный для геооперации, может быть запущен со значительно меньшими затратами. Наклон орбиты более 0,1 градуса обычно неприемлем для коммерческого обслуживания, если только антенны

земной станции не могут автоматически переориентироваться в сторону спутника по мере его движения. Механическое слежение является наиболее практичным подходом, но электрические системы управления лучом доступны для специализированных применений, таких как аэронавигационная мобильная связь.

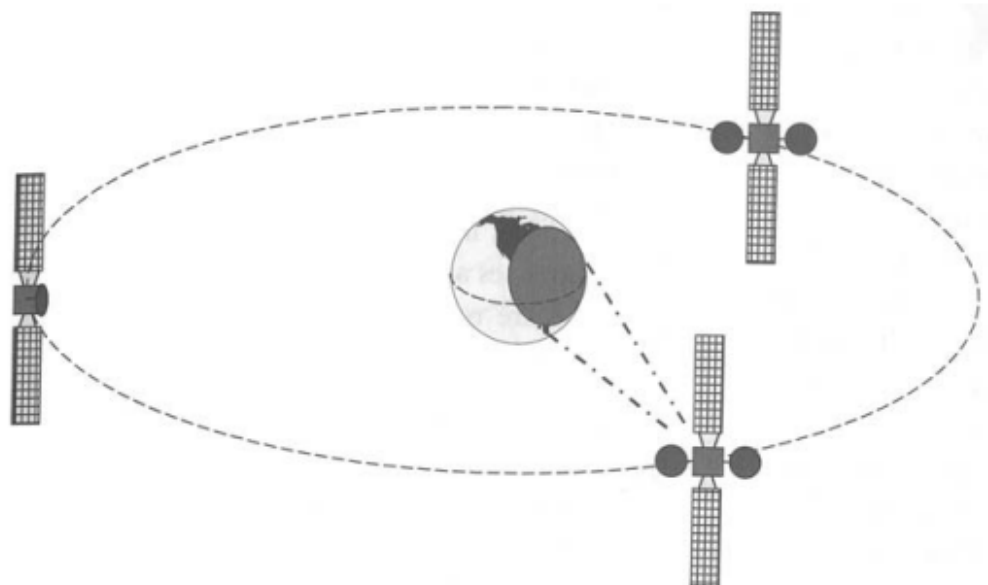


Рис. 32. Система, состоящая из геостационарных спутников связи

Орбиты, которые находятся ниже средней высоты около 36 000 км, имеют периоды обращения короче 24 часов и поэтому называются негеостационарными (НГСО).

На рис. 33 система Iridium использует несколько спутников для обеспечения непрерывного покрытия данного региона Земли. Мобильная спутниковая система Iridium использует низкую околоземную орбиту (НОО), на которой спутники находятся на высоте примерно 780 км. При предоставлении телефонных услуг пользователи относительно неподвижны по сравнению со спутником, которым они пользуются.

Преимущество использования НГСО спутниковой сети заключается в том, что дальность действия для пользователя короче; следовательно, требуется меньше излучаемой мощности, а также уменьшается задержка распространения.

Существует значительная сложность и задержка в обработке телефонных звонков и передачи данных из-за движения спутников. Ключевым аспектом ГСО-спутника является его способность обеспечивать охват всего полушария одновременно. Как показано на рис. 34, большая прилегающая территория суши может одновременно получить доступ к одному спутнику. Если спутник имеет специально разработанный луч связи, то любые приемные антенны в пределах следа луча (зоны покрытия) получают точно такую же передачу. Места, расположенные далеко за пределами следа, как правило, не могут эффективно использовать спутник.

Многие спутниковые сети обеспечивают двустороннюю (полнодуплексную) связь через один и тот же участок покрытия. Наземные системы связи, включая медный и волоконно-оптический кабель и двухточечное микроволновое радио, обеспечивают такую возможность между фиксированными точками на Земле.

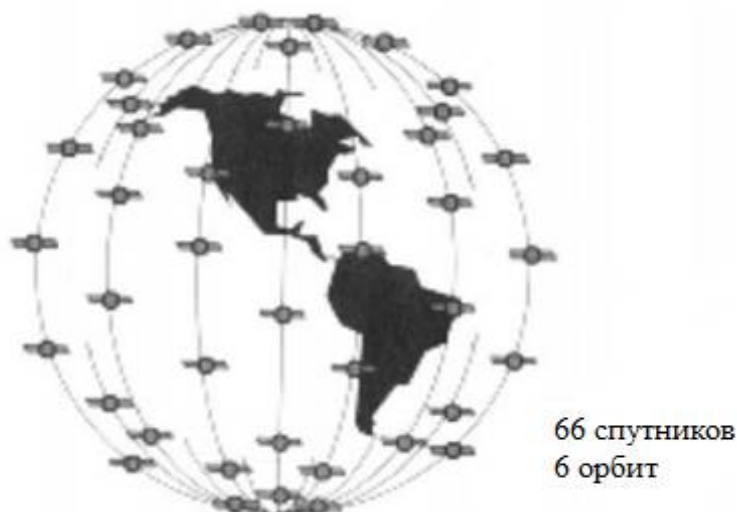


Рис. 33. Негеостационарная спутниковая сеть, используемая системой Iridium

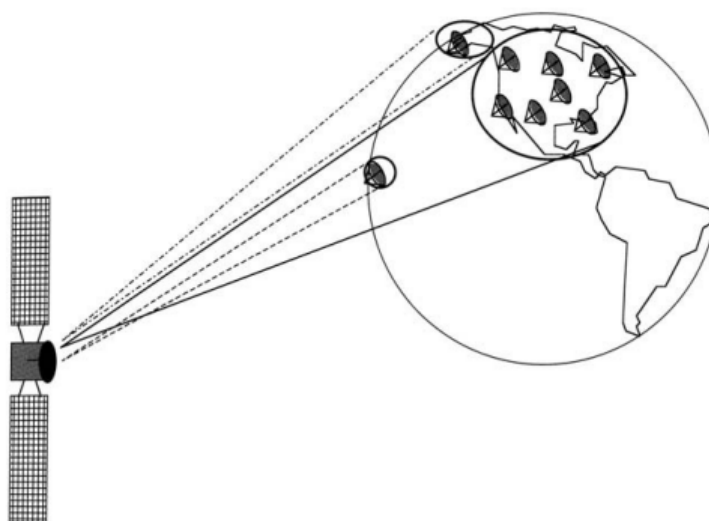


Рис. 34. Типичный след внутреннего спутника связи, показывающий покрытие континентальных и морских точек

Спутники рассчитаны на то, чтобы прослужить на орбите около 15 лет из-за практической невозможности обслуживания спутника на ГСО и пополнения расходными материалами (топливо, батарейные элементы и деградировавшие или вышедшие из строя компоненты). Спутники без ГСО на высотах менее 1500 км подвержены атмосферному сопротивлению и суровой радиационной среде и, вероятно, потребуют замены после 10 лет эксплуатации.



Рис. 35. Обширная сеть кабельных и микроволновых линий связи

На рис. 36 показаны три средства дальней связи, используемые для соединения двух пользователей, находящихся в разных местах. Используя спутник в дуплексном режиме (т. е. обеспечивая одновременную двустороннюю интерактивную связь), пользователь может использовать земные станции на каждом конце, устраняя любую связь с наземной сетью. В наземной микроволновой системе радиоретрансляторы должны располагаться в промежуточных точках маршрута для поддержания прямой видимости. Для завершения СВЧ-линии протяженностью 1000 км требуется около 20 ретрансляторов. Это связано с тем, что СВЧ-энергия, в том числе по наземной и спутниковой радиосвязи, распространяется по прямой линии с минимальным изгибом препятствий.

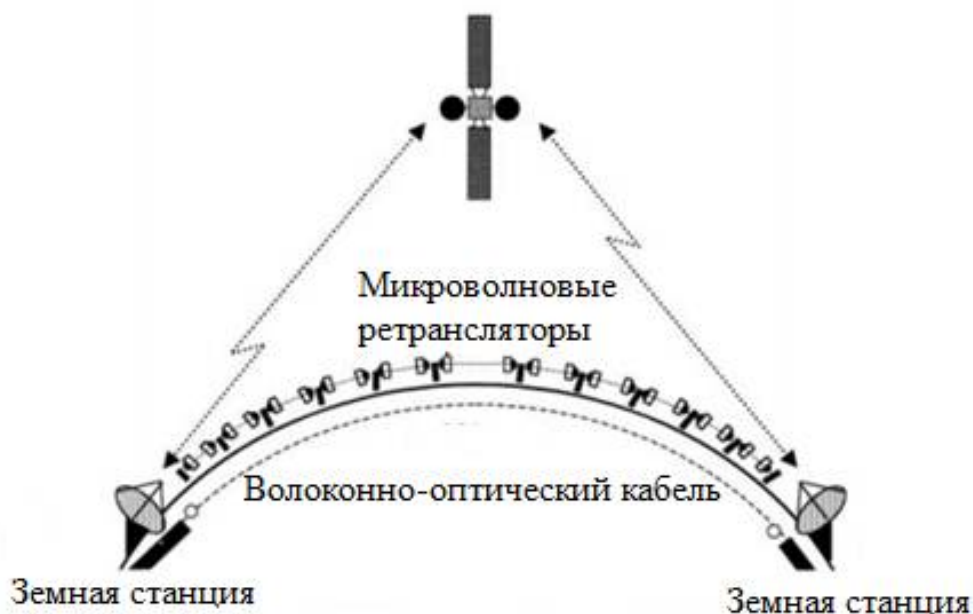


Рис. 36. Средства дальней связи, используемые для соединения двух пользователей, находящихся в разных местах

Существуют и другие беспроводные широкополосные системы связи. Принцип действия заключается в том, что антенна базовой станции, расположенная на вершине здания, башни или горы, может «видеть» город, улицы и здания. На самом деле, эти системы ограничены локальным охватом и не подходят для дальней передачи. С другой стороны, беспроводная широкополосная связь может быть объединена с дальнемагистральной спутниковой линией связи для удовлетворения потребности в широкополосных услугах в отдаленных районах, которые не могут оправдать инвестиции в оптоволоконный кабель или микроволновое радио.

В случае дальней волоконно-оптической кабельной системы для восстановления цифровых битов, передающих информацию, требуется другая форма ретранслятора. По этой причине кабельные системы, вероятно, являются самыми дорогостоящими в установке и обслуживании.

Подводя итог вышесказанному, необходимо отметить основные преимущества спутниковых систем связи.

Спутники широко используются в различных коммуникационных приложениях благодаря некоторым общепризнанным преимуществам. Они основаны на основных физических принципах системы, наиболее важным из которых является то, что спутник может «видеть» значительное количество регионов одновременно. При правильном проектировании спутник может обслуживать регион любого размера, который может его «видеть». Как упоминалось ранее, ГСО-спутник может видеть около трети поверхности Земли. Спутники могут быть размещены на одной орбите для обеспечения большего количества каналов связи. В свою очередь, НГСО-система расширяет зону покрытия за пределы того, что «видит» один спутник через сеть межспутниковых соединений.

Любые пользователи с подходящей земной станцией могут использовать спутник, пока они находятся в пределах его зоны действия. Правильно спроектированная услуга устанавливает эффективную радиосвязь между спутником и пользователем. Если это возможно, радиолинию называют «закрытой». Пользователь может быть неподвижным (фиксированным) или находящимся в движении (мобильным). Кроме того, спутники используют микроволновые радиосигналы и, таким образом, извлекают выгоду из свободы и мобильности беспроводных соединений. Некоторые преимущества взаимосвязаны, а другие станут более важными по мере развития технологий и приложений.

Суть этих преимуществ заключается в том, что спутниковая связь может представлять собой мощную среду, когда разработчик системы или услуги использует ее сильные стороны. Сети спутникового телевидения (которые доставляют программы напрямую абонентам через спутник), национальные сети универмагов (которые используют сети VSAT для преодоления ограничений, связанных с плохими или фрагментированными наземными сетями передачи данных), а также морские судоходные линии (которые требуют надежного судно-берегового соединения) очень сильно зависят от спутников. С помощью спутниковых технологий возможно обеспечить прочную связь, на которой

можно построить и расширить бизнес или стратегические возможности.

Исследование радиолиний, входящих в сеть ССС, заключается в энергетическом расчете и обоснованном выборе энергетических параметров аппаратуры: мощности передатчика, коэффициента шума приемника, коэффициента усиления антенн и потерь в антенно-фидерном устройстве (АФУ), обеспечивающих заданные достоверность и надежность работы сети. В связи с этим возникает вопрос об определении взаимосвязи параметров антенн и ретранслятора с основными параметрами ССС.

6.2. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

1. Выполнение исследования энергетических параметров радиолинии, технические параметры которой указаны в табл. 8 – 10:

- определить параметры передатчика и приемника, при которых спутниковый канал надежно работает в условиях помех и не содержит излишних энергетических запасов;
- построить диаграмму уровней сигнала.

Таблица 8

Параметры передающей земной станции

Параметры	1	2	3
Координаты	51° в.д.; 45° с.ш.	50° в.д.; 46° с.ш.	53° в.д.; 48° с.ш.
Диапазон f , ГГц	13↑/12↓	14↑/11↓	15↑/13↓
Диаметр антенны DA , м	12	9	11
Эффективная полоса частот $f_{ш}$, МГц	34	32	35
Спектральная плотность мощности S , дБВт/Гц	-31	-34	-30
Отношение сигнал/шум $P_c/P_{ш}$, дБ	15,5	17,1	15
КПД АФ тракта	0,92	0,91	0,94

Таблица 9

Параметры бортового ретранслятора КС

Параметры	1	2	3
Координаты	79° в.д.; 45° с.ш.	75° в.д.; 46° с.ш.	77° в.д.; 48° с.ш.
Диапазон f , ГГц	13↑/12↓	14↑/11↓	15↑/13↓
Коэффициент усиления антенны G , дБ:			
прием	36	34	32
передача	31	32	35
Спектральная плотность мощности S , дБВт/Гц	-50	-54	-51
Коэффициент шума приемника КШ	7	6	8,2
Шумовая температура антенны T_A , К	47	53	49
КПД АФ тракта	0,89	0,91	0,87
Шумовая температура СЛ $T_{\Sigma Л}$, К	92	96	95

Таблица 10

Параметры приемной земной станции

Параметры	1	2	3
Координаты	79° в.д.; 43° с.ш.	75° в.д.; 44° с.ш.	77° в.д.; 41° с.ш.
Диапазон f , ГГц	13↑/12↓	14↑/11↓	15↑/13↓
Диаметр антенны DA , м	5	7	6,5
Эффективная полоса частот $f_{ш}$, МГц	38	35	37
Коэффициент шума приемника КШ	7	6	8,2
Шумовая температура антенны T_A , К	93	88	91
КПД АФ тракта	0,83	0,87	0,84

В расчетах необходимо учесть дополнительное ослабление энергии радиоволн на участках: поглощение в атмосфере (осадках) $L_{A,д} = 0.8$ дБ, поляризационные потери (из-за несогласованности поляризации антенн) $L_{П,д} = 0.9$ дБ, потери за счет рефракции $L_{Р,д} = 0.2$ дБ.

Коэффициент запаса для линии $\alpha = 6$ дБ.

2. Последовательность энергетического расчета

2.1. Расстояние между антеннами передающей ЗС и приемной КС

$$d_{\downarrow} = 42644 \cdot \sqrt{1 - 0.2954 \cdot \cos(\psi)}; \quad (6.1)$$

$$\cos(\psi) = \cos(\xi_{ЗС}) \cdot \cos(\beta), \quad (6.2)$$

где $\xi_{ЗС}$ – широта ЗС; $\beta = \beta_{КС} - \beta_{ЗС}$ – разность долгот ЗС и КС.

2.2. Ослабление сигнала при распространении

$$L_{0p} = 16 \cdot \pi^2 \cdot \frac{d_{\uparrow}^2}{\lambda^2}, \quad (6.3)$$

где λ – длина волны.

2.3. Дополнительное ослабление на трассе

В дополнительных потерях сигнала учитываются поглощение в атмосфере (осадки), потери из-за несогласованности поляризации антенн и потери из-за рефракции

$$L_{\text{доп,д}} = L_{A,д} + L_{П,д} + L_{P,д}. \quad (6.4)$$

2.4. Суммарная шумовая температура приемного тракта КС

$$T_{\Sigma} = T_A + T_0 \cdot \frac{1 - \eta}{\eta} + \frac{T_{\text{ш}}}{\eta}, \quad (6.5)$$

где T_A – шумовая температура приемной антенны КС; $T_0 \approx 290 \text{ K}$ – стандартная температура;

$T_{\text{ш}}$ – собственная шумовая температура приемника:

$$T_{\text{ш}} = (K_{\text{ш}} - 1) \cdot T_0. \quad (6.6)$$

2.5. Коэффициент усиления антенны передатчика ЗС

$$G_{\text{ПРД}} = 10 \cdot g \cdot D_A^2 / \lambda, \quad (6.7)$$

где $g = 0.6 \dots 0.8$ – коэффициент использования поверхности антенны ЗС.

2.6. Требуемая мощность передатчика ЗС

$$P_{\text{ПРД(ЗС)}} = \frac{L_{0\uparrow} \cdot L_{\text{доп,р}} \cdot k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f_{\text{ш}} \cdot \alpha \cdot \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}\right)_{\Sigma}}{G_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРМ}} \cdot \eta_{\text{ПРД}} \cdot \eta_{\text{ПРД}}}, \quad (6.8)$$

где $\Delta f_{\text{ш}}$ – шумовая полоса приемника КС; $\alpha = 6$ дБ (4) – коэффициент запаса.
Коэффициент усиления антенны приемника КС равен $10^{3,5} = 3162$.

2.7. Суммарная мощность шумов на входе приемника

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f_{\text{ш}}. \quad (6.9)$$

2.8. Диаграмма уровней мощности сигнала

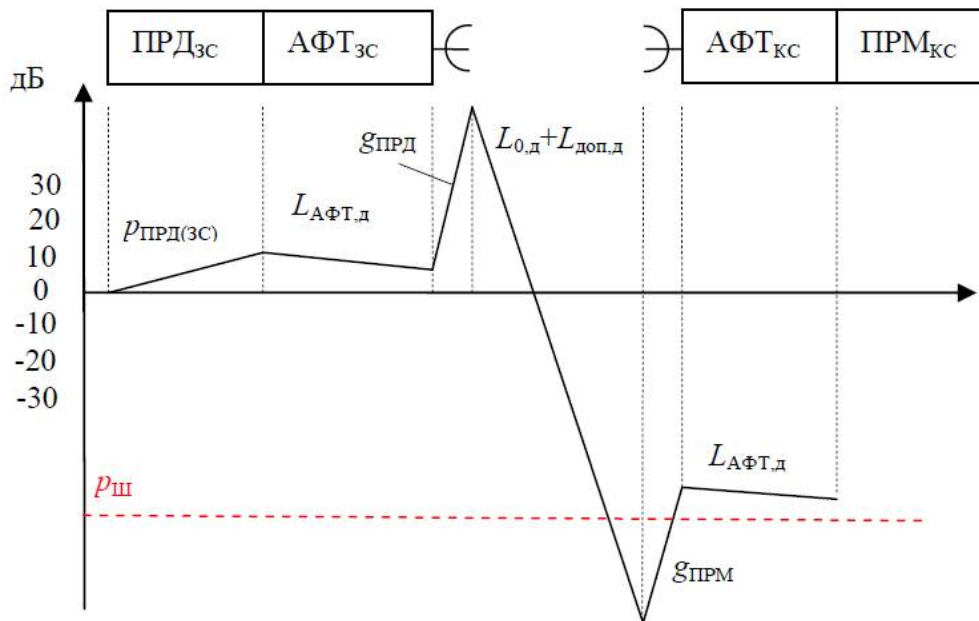


Рис. 37. Распределение мощностей и потерь сигнала на трассе

6.3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- кратко описанное теоретическое содержание изучаемого явления;
- исходные данные для расчёта;
- результаты выполнения лабораторного задания;
- выводы по результатам исследований.

6.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Классификация ССС и характеристики орбит.
2. Перечислить основные параметры ССС.
3. Каким образом возможно повысить энергетические показатели ССС.
4. Какая минимальная дальности от спутника до пользователя?
5. Что такое геостационарная орбита Земли?
6. Что из себя представляет негеостационарная орбита Земли?
7. Какие достоинства и недостатки ССС?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сети мобильной связи нашли широкое применение во многих сферах, такие как здоровье, медицина, развлечения, социальная сфера, образование, производство, бизнес, финансы и образ жизни. В настоящее время они являются наиболее распространенным способом общения для людей, так как эти мобильные приложения можно легко использовать в любое время и в любом месте.

В данном учебном пособии рассматриваются сети мобильной связи нового поколения 5G, внедрение в них новейших технологий, дается краткое описание различных схем модуляции. Помимо этого, в качестве лабораторных исследований предлагается изучить основные технические особенности систем и сетей связи с подвижными объектами, энергетические показатели и влияния на них параметров земной поверхности, различные способы распространения радиоволн, система сотовой связи стандарта GSM-900, а также дается описание технических характеристик спутниковых систем связи.

Учебное издание будет полезно студентам для выполнения лабораторных, курсовых и выпускных квалификационных работ, а также расширения знаний в области систем и сетей связи с подвижными объектами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. A. Zakrzewska, S. Ruepp, and M. Berger, "Towards converged 5G mobile networks - Challenges and current trends," in *Proc. ITU Kaleidoscope Academic Conference*, pp. 39-45, Jun. 2014.
2. S. Talwar, D. Choudhury, K. Dimou, E. Aryafar, B. Bangerter, and K. Stewart, "Enabling technologies and architectures for 5G wireless," in *Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, pp. 1-4, Jun. 2014.
3. N. Bhushan, J. Li, D. Malladi, R. Gilmore, D. Brenner, A. Damnjanovic, R. Sukhavasi, C. Patel, and S. Geirhofer, "Network densification: The dominant theme for wireless evolution into 5G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 82-89, Feb. 2014.
4. E. Hossain, M. Rasti, H. Tabassum, and A. Abdelnasser, "Evolution towards 5G multi-tier cellular wireless networks: An interference management perspective," *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 3, pp. 118-127, Jun. 2014.
5. L. Xiao, P. Wang, D. Niyato, D. Kim, and Z. Han, "Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014.
6. X. Kang, C. K. Ho, and S. Sun, "Full-duplex wireless-powered communication network with energy causality," *arXiv preprint arXiv:1404.0471*, 2014.
7. A. Checko, H.-L. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M.-S. Berger, and L. Dittmann, "Cloud RAN for mobile networks - A technology overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014.
8. C. Liang and F.-R. Yu, "Wireless network virtualization: A survey, some research issues and challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014.
9. Y. (G.) Li and G. Stuber, *OFDM for Wireless Communications* (edited), Springer, Inc., Boston, MA, Jan. 2006.
10. Маковеева М. М. Системы связи с подвижными объектами: учебное пособие для вузов / М. М. Маковеева, Ю. С. Шинаков. - М.: Радио и связь, 2002. - 440 с.
11. Карташевский В. Г. Сети подвижной связи / В. Г. Карташевский. - М.: Эко-Трендс, 2001. - 299 с.
12. Галкин В. А. Цифровая мобильная радиосвязь: учебное пособие для вузов / В. А. Галкин. - М.: Горячая линия - Телеком, 2011. - 592 с.
13. Бабков В. Ю. Системы мобильной связи / В. Ю. Бабков, М. А. Вознюк, В. И. Дмитриев. - СПб.: СПб ГУТ, 1999. - 289 с.
14. Удовикин В. Л. Системы и сети связи с подвижными объектами: руководство к лабораторным работам / В. Л. Удовикин. - Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. - 49 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Общие сведения о сети мобильной связи 5G	4
Внедрение технологий для сотовых сетей 5G	6
Виды модуляций для сетей 5G	14
Проблемы исследования сетей 5G	19
1. Лабораторная работа № 1. Исследование и расчет основных технических характеристик ССПО и способов их обеспечения	26
1.1. Краткие теоретические сведения.....	26
1.2. Лабораторное задание и методические указания по его выполнению.....	33
1.3. Содержание отчета.....	36
1.4. Контрольные вопросы.....	36
2. Лабораторная работа № 2. Исследование энергетических показателей ССПО при высокоподнятых антеннах	37
2.1. Краткие теоретические сведения.....	37
2.2. Лабораторное задание и методические указания по его выполнению.....	41
2.3. Содержание отчета.....	45
2.4. Контрольные вопросы.....	45
3. Лабораторная работа № 3. Исследование основных способов распространения радиоволн	46
3.1. Краткие теоретические сведения.....	46
3.2. Лабораторное задание и методические указания по его выполнению.....	53
3.3. Содержание отчета.....	53
3.4. Контрольные вопросы.....	54
4. Лабораторная работа № 4. Исследование системы сотовой связи стандарта GSM-900	55
4.1. Краткие теоретические сведения.....	55
4.2. Лабораторное задание и методические указания по его выполнению.....	60
4.3. Содержание отчета.....	60
4.4. Контрольные вопросы.....	60
5. Лабораторная работа № 5. Исследование влияния параметров земной поверхности на энергетические показатели ССПО	61
5.1. Краткие теоретические сведения.....	61
5.2. Лабораторное задание и методические указания по его выполнению.....	67
5.3. Содержание отчета.....	72
5.4. Контрольные вопросы.....	72
6. Лабораторная работа № 6. Исследование и расчет основных технических характеристик спутниковых систем связи и способов их обеспечения	73
6.1. Краткие теоретические сведения.....	73
6.2. Лабораторное задание и методические указания по его выполнению.....	78
6.3. Содержание отчета.....	81
6.4. Контрольные вопросы.....	81
Заключение	82
Библиографический список	83

Учебное издание

**Федоров Сергей Михайлович
Черноиваненко Игорь Александрович**

**СИСТЕМЫ И СЕТИ СВЯЗИ С ПОДВИЖНЫМИ
ОБЪЕКТАМИ**

Лабораторный практикум

В авторской редакции

Компьютерный набор И. А. Черноиваненко

**Подписано к изданию 02.07.2021.
Объем данных 1,7 Мб.**

**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14**