

**Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет)**

На правах рукописи

Тряпицын Алексей Васильевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ
ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ ЭМС**

05.12.13 — Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
д.т.н., проф. Л.Н. Кечиев**

Москва – 2006

Оглавление

Список обозначений.....	3
Введение.....	4
Глава 1: Анализ особенностей работы беспроводных локальных сетей стандарта 802.11	11
1.1. Анализ беспроводных локальных сетей стандарта 802.11	11
1.2. Проблемы ЭМС и методы их решения в WLAN.....	18
1.3. Постановка задач	38
Выводы по первой главе	40
Глава 2: ЭМС в беспроводных локальных сетях стандарта 802.11	41
2.1. Анализ задач по оценке ЭМС при проектировании беспроводных локальных сетей стандарта 802.11	42
2.2. Анализ технических требований к оборудованию WLAN.....	50
2.3. Разработка алгоритмов работы для механизма резервирования среды передачи	62
Выводы по второй главе	70
Глава 3: Разработка методики проектирования беспроводных локальных сетей, учитывающей ЭМС	71
3.1. Определение базовых характеристик.....	71
3.2. Анализ внутрисистемных помех	85
3.3. Анализ взаимного влияния параметров и выбор режимов работы беспроводной сети.....	97
3.4. Анализ межсистемной ЭМС	103
3.5. Реализация беспроводной сети	106
Выводы по третьей главе	109
Глава 4: Разработка и экспериментальная проверка алгоритмов расчетов параметров WLAN, результаты внедрения	110
4.1. Разработка алгоритмов расчетов параметров WLAN.....	111
4.2. Экспериментальная проверка алгоритмов расчетов	116
Выводы по четвертой главе	124
Заключение.....	125
Библиографический список.....	127
Приложения	131

Список обозначений

- WLAN (Wireless LAN) - беспроводная локальная сеть
- Hot-spot - беспроводная локальная сеть публичного доступа
- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) - технологии расширения спектра методом прямой последовательности
- FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) - технологии расширения спектра путем скачкообразной перестройки частоты
- ССК (Complementary Code Keying) - кодирование с использованием комплементарных кодов
- PBCC (Packet Binary Convolutional Coding) - технология двоичного пакетного сверточного кодирования
- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) - ортогональное частотное мультиплексирование
- QoS (Quality of Service) - качество обслуживания
- CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) - множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий
- PCF (Point Coordination Function) - точечная функция координации
- DCF (Distributed Coordination Function) - распределенная функция координации
- AP (Access Point) - точка доступа
- МС - мобильная станция
- IBSS (independent basic service sets, IBSS) - независимые базовые зоны обслуживания
- BSS (basic service sets, BSS) - базовые зоны обслуживания
- ESS (extended service sets, ESS) - расширенные зоны обслуживания
- SSID (service set identifier) - идентификатор зоны обслуживания
- RTS/CTS (Request-to-Send/Clear-to-Send) - резервирование среды передачи с помощью механизма "готовность к передаче/готовность к приему"
- EIRP, ЭИИМ - эффективная изотропноизлучаемая мощность
- ДН - диаграмма направленности антенны
- ЭМС - электромагнитная совместимость
- ЭМО - электромагнитная обстановка
- ЭМП - электромагнитная помеха
- РЭС - радиоэлектронное средство
- дБм - мощность передатчика относительно 1 мВт
- дБи - коэффициент усиления антенны относительно изотропного излучателя

Введение

В России для построения беспроводных локальных сетей наибольшую популярность нашло оборудование стандартов 802.11 b и g. Эти технологии появились недавно: окончательная спецификация 802.11b вышла в 2001 году, а стандарт 802.11g был опубликован только в 2003 году. Частотный диапазон, используемый для таких сетей 2400...2483 МГц. Для внутриофисных сетей, работающих на этих частотах, не требуется получение лицензии. Преимуществами беспроводных локальных сетей стандартов 802.11 b и g являются высокая скорость передачи данных (до 54 Мбит/с), простота и малое время развертывания сети, возможность мобильного доступа пользователей к сети, доступность и большой выбор оборудования. Благодаря своим преимуществам, беспроводные сети находят применение для организации локальных сетей в помещениях, построения сетей публичного доступа (Hot-Spot), организации беспроводного канала связи между зданиями, для построения корпоративных сетей.

Рост популярности беспроводных сетей приводит к увеличению числа источников помех в диапазоне 2,4 ГГц. Дополнительное мешающее излучение в этом диапазоне создает различное оборудование: беспроводные телефоны, Bluetooth-устройства, микроволновые печи. Сложная электромагнитная обстановка заставляет учитывать требования межсистемной ЭМС при проектировании беспроводных сетей.

Другая серьезная проблема беспроводных локальных сетей – это внутрисистемная ЭМС. При наличии в беспроводной сети хотя бы двух сот, начинают действовать внутрисистемные помехи. Их уровень значительно возрастает при числе сот более трех. Это связано с тем, что в нелицензируемом диапазоне частот, используемом оборудованием стандартов 802.11 b и g, можно разместить только три неперекрывающихся частотных канала. Поэтому приходится использовать один частотный канал сразу в нескольких сотах.

Для решения проблем ЭМС используются организационные и технические меры. Технические меры обеспечения ЭМС обусловлены изменением технических параметров РЭС (например, снижение уровней внеполосных и побочных излучений передатчиков, повышение избирательных свойств приемников, снижение уровней боковых лепестков диаграмм направленности антенн и др.). Они достаточно эффективны, но могут использоваться в основном при разработке новых типов оборудования. Для РЭС, находящихся в эксплуатации, наиболее приемлемыми и действенными мерами обеспечения ЭМС являются организационные меры. Они включают рациональное

назначение рабочих частот, сочетаемое с введением частотных, территориальных, временных и пространственных ограничений, накладываемых на РЭС.

Существующие системы проектирования беспроводных локальных сетей используют алгоритмы расчетов зоны покрытия, позволяющие оценить влияние особенностей местности, в которой разворачивается беспроводная сеть, но не учитывают воздействие межсистемных помех и помех от соседних сот. Существующий механизм доступа к среде передачи предназначен для организации безконфликтной работы приемопередающих устройств внутри одной соты и уязвим для помех, создаваемых передающими станциями соседних сот.

Механизмы, заложенные в WLAN, ориентированы на организацию работы беспроводной сети внутри одной соты, а дополнительные меры (IEEE 802.11 h и k) эффективны в небольших сетях и лишь расширяют возможности проектировщика. Для защиты беспроводных локальных сетей WLAN от воздействия радиопомех необходимо создание методики проектирования беспроводных локальных сетей, учитывающей внутрисистемную и межсистемную ЭМС. Для оценки и уменьшения влияния радиопомех необходима разработка алгоритмов расчетов, позволяющие моделировать различные зависимости, существующие между параметрами WLAN и значениями уровней сигналов и помех в рецепторах WLAN. Для обеспечения внутрисистемной ЭМС между соседними сотами, работающими на одной территории на одинаковых (или перекрывающихся) частотных каналах, необходима разработка алгоритмов доступа к среде передачи, обеспечивающих безконфликтную работу приемопередатчиков соседних сот.

На основании проведенного анализа сформулирована цель диссертационной работы: повышение эффективности проектирования беспроводных локальных сетей. Повышение эффективности проектирования WLAN заключается в снижении уровней внутрисистемных помех между приемопередатчиками соседних сот, в повышении помехоустойчивости проектируемых беспроводных локальных сетей к внешним по отношению к WLAN помехам, в сокращении материальных и временных затрат на проектирование беспроводных локальных сетей.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие задачи.

1. Проведение анализа характеристик и принципов работы беспроводных локальных сетей, проблем ЭМС и методов их решения, существующих в таких сетях.
2. Разработка алгоритмов работы механизмов доступа к среде передачи.
3. Разработка методики проектирования беспроводных локальных сетей, учитывающей проблемы ЭМС.

4. Разработка алгоритмов расчетов, позволяющих моделировать различные зависимости, существующие между параметрами WLAN.
5. Реализация разработанных методов и алгоритмов расчетов в программе расчета и их экспериментальная проверка.

В процессе решения поставленных задач использовались принципы системного подхода, математического моделирования, теория вероятности, теория электромагнитной совместимости, а также экспериментальные исследования.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 64 наименования и приложений. Объем работы без приложений 130 страниц.

В первой главе проанализированы области применения, технологии и принципы работы беспроводных локальных сетей, что позволило обозначить “узкие” места этих технологий, на которые необходимо обращать особое внимание при проектировании: проблема скрытого узла; взаимные помехи между соседними сотами (внутрисистемная ЭМС); межсистемные помехи; обеспечение QoS для критичных приложений; расширение беспроводной сети; влияние особенностей местности. Показаны методы, используемые для решения проблем ЭМС в беспроводных локальных сетях и проанализирована их эффективность: механизм доступа к среде передачи; стандарт IEEE 802.11e (QoS); дополнительные стандарты, предназначенные для уменьшения влияния помех (IEEE 802.11 h и k); кодирование и модуляция; системы планирования и управления WLAN (на примере Cisco WCS). Показано, что учет внутрисистемных и межсистемных помех необходимо проводить на ранних стадиях проектирования беспроводных локальных сетей. Сформулирована цель и поставлены задачи диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрены основные принципы оценки ЭМС радиосистем и сформулированы задачи по оценке ЭМС, которые необходимо решать при проектировании беспроводных локальных сетей. Разработаны методы для вычисления суммарного уровня помех: метод, позволяющий рассчитать худший случай, в котором мешающие сигналы складываются друг с другом (упрощенный метод); метод, позволяющий учесть разницу фаз мешающих сигналов, пришедших в рецептор. Проанализированы требования стандартов к характеристикам оборудования, которые необходимо учитывать при обеспечении ЭМС. Рассмотрено соответствие параметров реального оборудования требованиям стандартов. Разработаны алгоритмы усовершенствованного механизма резервирования среды передачи, позволяющие организовать одновременную работу на одной территории нескольких сот, принадлежащих одной WLAN и использующих один частотный канал. Для его внедрения

необходимо обновление программного обеспечения точек доступа и клиентских адаптеров. Обновление аппаратной части не требуется.

В третьей главе выполнен анализ показывающий, что предоставляемые производителями оборудования данные, недостаточны для эффективного проектирования. Это заставляет пользоваться экспериментальными и рассчитанными значениями параметров. Разработана методика проектирования WLAN, учитывающая влияние межсистемных и внутрисистемных помех. Предложенные методы и алгоритмы расчетов позволяют моделировать зависимости, существующие между параметрами WLAN и значениями уровней сигналов и помех в рецепторах WLAN. В рамках разработанной методики получены следующие результаты: для схем с использованием направленных антенн в точках доступа сформулированы требования к ДН; рассмотрены возможные комбинации частотных каналов и предложены варианты с минимальным уровнем внутрисистемных помех; получены формулы для расчета уровней сигналов и помех в рецепторах WLAN; с помощью предложенного метода проведена оценка суммарного уровня внутрисистемных помех от соседних сот в рецепторах WLAN; рассмотрены различные организационные меры и способы их применения, позволяющие регулировать отношение сигнал/помеха в рецепторах WLAN; предложен метод расчета допустимых уровней межсистемных помех в рецепторах WLAN, учитывающий уровень сигнала, уровень собственных шумов приемника и уровень внутрисистемных помех; с помощью предложенного метода проведена оценка допустимого уровня межсистемных помех в рецепторах WLAN. Проведена оценка максимального уровня внутрисистемных помех в точке доступа и в граничной МС для конфигурации сот, в которой используются всенаправленные антенны AP, размещенные в центрах сот.

В четвертой главе представлены алгоритмы расчетов, разработанные на основе предлагаемой методики проектирования WLAN и позволяющие моделировать различные зависимости, необходимые для проектирования беспроводной локальной сети с учетом ЭМС. Разработанные алгоритмы расчетов внедрены в программу «Расчет беспроводных локальных сетей Wi-Fi (W-plane)». Ее использование позволит упростить расчет и сократить время проектирования WLAN. Выполнены экспериментальные исследования по проверке разработанных методов и алгоритмов расчетов, подтверждена правомерность их применения в практике проектирования беспроводных локальных сетей.

В приложениях представлены дополнительная информация и документация, использованные в диссертационной работе: описание интерфейса разработанной программы «Расчет беспроводных локальных сетей Wi-Fi (W-plane)»; фрагменты исходного текста разработанной программы «Расчет беспроводных локальных сетей Wi-Fi

(W-plane)» на языке программирования C++; расчет WLAN из трех сот с помощью разработанной программы, показывающий влияние и взаимосвязь различных параметров WLAN; данные для расчета дополнительных потерь на трассе распространения; метод оценки стандартного среднеквадратического отклонения медленных замираний; характеристики антенных фидеров; протокол проведения эксперимента; акты о внедрении результатов диссертационной работы, копия свидетельства об официальной регистрации разработанной программы в Реестре программ для ЭВМ.

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Выполнен анализ характеристик и принципов работы беспроводных локальных сетей, проблем ЭМС и методов их решения, существующих в беспроводных локальных сетях, проанализирована эффективность их применения. Показано, что учет внутрисистемных и межсистемных помех необходимо проводить на ранних стадиях проектирования беспроводных локальных сетей. Рассмотрены основные принципы оценки ЭМС радиосистем и сформулированы задачи по оценке ЭМС, которые необходимо решать при проектировании беспроводных локальных сетей.
2. Разработаны алгоритмы работы механизма резервирования среды передачи, позволяющие обеспечить бесконфликтную работу на одной территории нескольких сот, использующих один частотный канал.
3. Разработана методика проектирования беспроводных локальных сетей, позволяющая оценить уровни внутрисистемных и межсистемных помех, а также снизить их влияние.
4. На основе предлагаемой методики проектирования WLAN были разработаны алгоритмы расчетов, позволяющие моделировать различные зависимости, существующие между параметрами WLAN и значениями уровней сигналов и помех в рецепторах WLAN.
5. Разработанные алгоритмы расчетов реализованы в программе «Расчет беспроводных локальных сетей Wi-Fi (W-plane)». Выполнены экспериментальные исследования по проверке разработанных методов и алгоритмов расчетов, подтверждена правомерность их применения в практике проектирования беспроводных локальных сетей. Результаты диссертационной работы были использованы при проектировании беспроводных локальных сетей различных компаний, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Практическая полезность работы состоит в том, что использование разработанной методики проектирования беспроводных локальных сетей с учетом ЭМС позволит снизить уровень внутрисистемных помех между приемопередатчиками соседних сот за счет рационального выбора параметров беспроводной локальной сети; повысить

помехоустойчивость проектируемых беспроводных локальных сетей за счет учета межсистемных помех на ранних стадиях проектирования; снизить материальные и временные затраты на повторное проектирование за счет учета влияния радиопомех на ранних стадиях проектирования. Реализация разработанных алгоритмов расчетов в программе позволит сократить время и материальные затраты на проектирование WLAN за счет автоматизации вычислений, проводимых при проектировании. Использование в WLAN разработанных алгоритмов работы *механизма резервирования среды передачи* позволит организовать безконфликтную работу на одной территории нескольких сот, использующих один частотный канал за счет разделения пропускной способности между взаимодействующими приемопередающими устройствами этих сот.

В разработанной программе «Расчет беспроводных локальных сетей Wi-Fi (W-plane)» реализован расчет различных конфигураций WLAN, отличающихся используемым оборудованием, типом и расположением антенн точек доступа. Интерфейс программы позволяет задавать значения различных параметров WLAN: скорость работы, радиус сот, характеристики приемников и передатчиков WLAN, КУ и ДН антенн, и т.д. По результатам расчетов строятся графики, демонстрирующие различные зависимости между параметрами беспроводной локальной сети и позволяющие рационально выбрать режимы работы WLAN.

Результаты диссертационной работы были использованы при проектировании беспроводных локальных сетей компаний ЗАО «Компания СФТ» и ОАО «РосДорБанк». Акты внедрения представлены в приложениях.

Отдельные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс МИЭМ. Так, на основе предложенной методики оценки межсистемной ЭМС, разработано учебное пособие. Методические материалы используются в лекционных курсах и практических занятиях по дисциплине "ЭМС и защита информации" для студентов 9 - 10 семестров групп Р и РС, а также при выполнении курсовых и дипломных проектов по специальностям 200800 и 220500. Всего по дисциплине "ЭМС и защита информации" на тему «Межсистемная ЭМС» выполнено более 60 курсовых проектов.

На защиту выносятся:

1. Методика проектирования беспроводных локальных сетей, позволяющая оценить уровни внутрисистемных и межсистемных помех, а также снизить их влияние.
2. Алгоритмы расчетов и их программная реализация, позволяющие моделировать различные зависимости, существующие между параметрами WLAN и значениями уровней сигналов и помех в рецепторах WLAN.

3. Алгоритмы работы *механизма резервирования среды передачи*, позволяющие организовать одновременную работу на одной территории нескольких сот, принадлежащих одной беспроводной локальной сети и использующих один частотный канал.

Работа в целом и отдельные ее результаты докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ в 2002-2005 гг., а также на научно-технических семинарах кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы» с 2002 г. по 2005 г.

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ. На разработанную программу получено свидетельство о защите авторских прав под номером 200610206.

Диссертационная работа выполнена на кафедре "Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы" Московского государственного института электроники и математики.

Консультировал д.т.н., профессор Кечиев Л.Н.

Глава 1: Анализ особенностей работы беспроводных локальных сетей стандарта 802.11

Беспроводные локальные сети стандарта 802.11 получают все большее распространение. Это происходит в первую очередь из-за того, что они просты в развертывании, относительно дешевы и удобны в использовании. Благодаря этим качествам, количество WLAN постоянно увеличивается. При постоянно растущей плотности радиосетей все более актуальными становятся проблемы, связанные с ЭМС.

В этой главе проанализированы области применения, технологии и принципы работы беспроводных локальных сетей. Показаны проблемы, которые приходится решать при проектировании WLAN. Проанализированы методы, используемые для решения проблем ЭМС в беспроводных локальных сетях.

1.1. Анализ беспроводных локальных сетей стандарта 802.11

Существует три основных органа стандартизации, оказывающих влияние на развитие WLAN, - это Wi-Fi Alliance, IEEE и ETSI.

Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) - это некоммерческое профессиональное объединение, которое, помимо прочего, формирует международные стандарты, такие как стандарт 802.11 на беспроводные LAN.

Объединение Wi-Fi Alliance сертифицирует устройства WLAN, произведенные согласно разработанным IEEE спецификациям, на предмет совместимости. Аналогично IEEE, Wi-Fi Alliance - некоммерческая международная торговая организация, созданная поставщиками и производителями.

Европейский институт стандартов по телекоммуникациям (ETSI) - еще одна некоммерческая организация, созданная в 1988 году для разработки стандартов по телекоммуникациям для Европы. Что касается WLAN стандарта 802.11, то ETSI помог объединить европейские страны вокруг общего набора документов, регулирующих передачу.

Механизмы работы и требования к устройствам для беспроводной передачи данных описываются стандартом IEEE 802.11, а также его более поздними расширениями - IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g. Стандарт регламентирует диапазоны частот, скорости передачи, методы кодирования информации и прочие технологические характеристики работы сети. Главным отличительным признаком расширений стандартов a, b и g является физический уровень. Основное назначение физических уровней стандарта

802.11 - обеспечить механизмы беспроводной передачи для подуровня MAC, а также поддерживать выполнение вторичных функций, таких как оценка состояния беспроводной среды передачи и сообщение о нем подуровню MAC. Набор стандартов 802.11 определяет целый ряд технологий реализации физического уровня, которые могут быть использованы подуровнем 802.11 MAC.

Также институт IEEE ведет работу над созданием новой спецификации протокола связи в беспроводных локальных сетях (WLAN). За счет использования одновременно нескольких частотных каналов устройства стандарта 802.11n работают в несколько раз быстрее (от 100 Мбит/с), чем оборудование стандартов "g" и "a". В работе этот стандарт не рассматривается.

Базовый стандарт IEEE 802.11

Базовый стандарт [1], разработанный в 1997 году, определяет протоколы, необходимые для организации беспроводных локальных сетей (WLAN). Он определяет протокол управления доступом к среде передачи MAC (Medium Access Control) и три протокола физического уровня для передачи сигналов в физической среде, соответствующих различным технологиям передачи сигналов:

- По радиоканалам в диапазоне 2,4 ГГц с помощью технологии расширения спектра методом прямой последовательности (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS, [1]).
- По радиоканалам в диапазоне 2,4 ГГц с помощью технологии расширения спектра путем скачкообразной перестройки частоты (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS, [1]).
- С помощью инфракрасного излучения.

Из перечисленных технологий в настоящее время для построения беспроводных локальных сетей используется только технология DSSS¹, которая и будет рассмотрена в работе.

В зависимости от используемого метода модуляции скорость передачи составляет 1 Мбит/с (двоичная относительная фазовая манипуляция - differential binary phase shift keying, DBPSK²) и 2 Мбит/с (квадратурная фазовая манипуляция - quadrature phase shift key, QPSK³). Стандарт определяет 14 (в России 13) частотных каналов, из которых 3 - неперекрывающиеся, ширина каждого канала - 22 МГц [1].

¹ Подробнее в стандартах и литературе [1-3, 9, 13, 14, 17-21]

² Подробнее в стандартах и литературе [1-3, 9, 13, 14, 17-21]

³ Подробнее в стандартах и литературе [1-3, 9, 13, 14, 17-21]

Технологии стандарта IEEE 802.11b

Стандарт IEEE 802.11b [2], появившийся в 1999 году, регламентировал правила использования высокоскоростной технологии DSSS (high-rate direct sequence spread spectrum, HR-DSSS). Он использует ISM-диапазон 2,4 ГГц и определяет скорости передачи 5,5 и 11 Мбит/с [2, 3]. В технологии HR-DSSS используется та же схема организации каналов, что и в технологии DSSS, - полоса частот шириной 22 МГц, 14 (в России 13) каналов, из них 3 неперекрывающихся [2, 3].

Физический уровень DSSS стандарта 802.11b совместим с существующими WLAN стандарта 802.11. При этом применяется кодирование с использованием комплементарных кодов (complementary code keying, CCK⁴) или технология двоичного пакетного сверточного кодирования (packet binary convolutional coding, PBCC⁵). При этом данные передаются с использованием модуляции CCK или PBCC (5,5 или 11 Мбит/с), а заголовки с использованием DSSS (1 Мбит/с) [2].

Технологии стандарта IEEE 802.11a

Опубликованный в 1999 году, стандарт [4] предусматривает скорость передачи данных до 54 Мб/с. Это наиболее широкополосный стандарт из семейства стандартов 802.11. Спецификациями 802.11a предусмотрена работа в диапазонах U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure) 5,15-5,25 ГГц, 5,25-5,35 ГГц и 5,725-5,825 ГГц [4]. Оборудование, работающее в частотном диапазоне 5,725-5,825 ГГц, не подчиняется требованиям стандарта и, в основном, применяется для построения распределенных беспроводных сетей. Стандарт 802.11a регламентирует использование каналов шириной 20 МГц и определяет по четыре канала для каждого из трех диапазонов [4]. В качестве метода модуляции сигнала выбрано ортогональное частотное мультиплексирование (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM⁶). В отличие от технологий DSSS и FHSS, метод OFDM предполагает передачу полезного сигнала одновременно по нескольким частотам диапазона. В результате повышается пропускная способность канала и качество сигнала. Стандартом определены три обязательные скорости - 6, 12 и 24 Мбит/с и пять необязательных - 9, 18, 36, 48 и 54 Мбит/с [4].

К недостаткам 802.11a относятся: большая потребляемая мощность радиопередатчиков для частот 5 ГГц и также меньший радиус действия. Кроме того, устройства для 802.11a дороже.

⁴ Подробнее в стандартах и литературе [1-3, 9, 13, 14, 17-21]

⁵ Подробнее в стандартах и литературе [1-3, 9, 13, 14, 17-21]

⁶ Подробнее в стандартах и литературе [4, 9, 13, 14, 17-21]

Технологии стандарта IEEE 802.11g

IEEE 802.11g – стандарт [5], описывающий работу WLAN в нелицензируемом частотном диапазоне 2,4 ГГц. Максимальная скорость передачи данных в беспроводных сетях IEEE 802.11g может составлять до 54 Мбит/с. В стандарте обязательными являются скорости передачи⁷ 1; 2; 5,5; 6; 11; 12, и 24 Мбит/с, а скорости передачи 9; 18; 36; 48 и 54 Мбит/с - опциональными⁸.

Стандарт 802.11g представляет собой развитие 802.11b и обратно совместим с ним. В числе преимуществ 802.11g надо отметить низкую потребляемую мощность, дальное действие и высокую проникающую способность сигнала, меньшую стоимость оборудования (по сравнению с 802.11a), поскольку низкочастотные устройства проще в изготовлении. Спецификация 802.11g полностью включает в себя 802.11b, допуская применение как схемы DSSS, так и OFDM-модуляции.

При разработке стандарта 802.11g рассматривались две конкурирующие технологии: метод ортогонального частотного разделения OFDM, заимствованный из стандарта 802.11a и предложенный к рассмотрению компанией Intersil, и метод двоичного пакетного свёрточного кодирования PBCC, опционально реализованный в стандарте 802.11b и предложенный компанией Texas Instruments. В результате стандарт 802.11g содержит компромиссное решение: в качестве базовых применяются технологии OFDM и CCK, а опционально предусмотрено использование технологии PBCC.

Если в локальной сети используются только устройства стандарта 802.11g, передача осуществляется с максимально возможной скоростью. Однако, если в нее вводятся устройства стандарта 802.11b, информация заголовков должна передаваться со скоростями стандарта 802.11b, чтобы их могли принимать устройства этого стандарта (см. Рис. 1.1). Такое снижение скорости должно выполняться при всех передачах, независимо от того, происходят они между устройствами стандарта 802.11g или 802.11b.

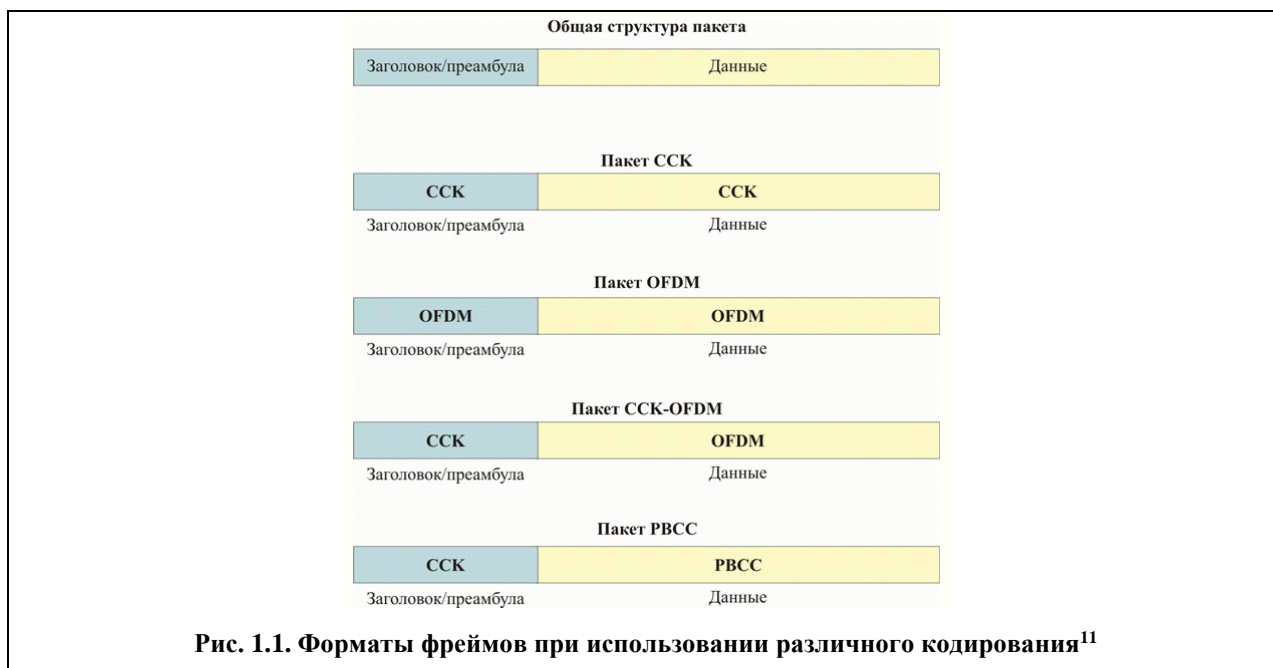
Технология кодирования PBCC может использоваться на скоростях 5,5, 11, 22 и 33 Мбит/с, из которых скорости 5,5 и 11 Мбит/с являются обязательными⁹, а 22 и 33 Мбит/с - опциональными¹⁰.

⁷ Стандарт 802.11g [5]

⁸ Стандарт 802.11g [5]

⁹ Стандарт 802.11g [5]

¹⁰ Стандарт 802.11g [5]



Топологии WLAN

В основу сетей стандарта IEEE 802.11 положена сотовая архитектура. Сеть может состоять из одной или нескольких ячеек (сот). Каждая сота управляется базовой станцией, называемой точкой доступа (Access Point, AP). Точки доступа многосотовой сети взаимодействуют между собой через распределительную систему (Distribution System, DS), представляющую собой эквивалент магистрального сегмента кабельных ЛС. Вся инфраструктура, включающая точки доступа и распределительную систему, образует расширенную зону обслуживания (Extended Service Set). Стандартом предусмотрен также односотовый вариант беспроводной сети, который может быть реализован и без точки доступа (IBSS). При этом часть ее функций выполняется непосредственно рабочими станциями.

Сети стандарта 802.11 используют три вида топологий:

- независимые базовые зоны обслуживания (independent basic service sets, IBSS) – точка доступа в такой сети отсутствует;
- базовые зоны обслуживания (basic service sets, BSS) – используется одна точка доступа, подключенная к распределительной системе;
- расширенные зоны обслуживания (extended service sets, ESS) – точки доступа соединены через распределительную систему.

Зона обслуживания (service set) - это логически сгруппированные устройства. Принимающая станция может получать сигналы на нескольких частотных каналах.

¹¹ Технологии беспроводных сетей семейства 802.11: <http://www.thg.ru/network/20030828/>

Передающая станция вначале передает идентификатор зоны обслуживания (service set identifier, SSID). Станция-приемник использует SSID для фильтрации получаемых сигналов и выделения того, который ей нужен.

Области применения WLAN¹²

Беспроводные сети в помещениях

В помещениях WLAN развертываются, если необходимо обеспечить мобильность пользователей внутри здания, для временных сетей (например, на выставках и конференциях), если проложить кабельную сеть в здании сложно, дорого или невозможно. Беспроводные локальные сети также используются, если сеть необходимо ввести в эксплуатацию за относительно небольшое время. WLAN дают возможность сотрудникам иметь постоянный доступ к информационным ресурсам компании, даже если они находятся не на рабочем месте. В первую очередь, это необходимо руководству компании, часто проводящему совещания, переговоры. Кроме руководства, беспроводное подключение удобно для сотрудников, часто бывающих в командировках или не имеющих постоянного рабочего места (обычно такие сотрудники имеют ноутбуки).

Для крупных компаний наличие беспроводного сегмента сети – это еще и имиджевый ход. Любой гость, приехавший к ним, сможет быстро подключиться к Интернету или корпоративной сети.

Наличие беспроводной сети в магазине или на складе позволяет оперативно отслеживать движение и количество товаров, своевременно пополнять запасы и вести статистику. Беспроводные считыватели штрих-кодов позволяют быстро учесть товар и сразу отправить информацию в базу данных. Подключение POS-терминалов (касс) к локальной сети магазина дает возможность управляющему учитывать и контролировать работу всего магазина в режиме реального времени.

Расчет беспроводных сетей внутри зданий значительно затруднен из-за трудно предсказуемого затухания сигнала при прохождении через стены и перекрытия, многократных отражений. Технологии, используемые в таких сетях, должны быть хорошо приспособлены к многолучевому приему. Мощности передатчиков, антенны и их месторасположение следует выбирать таким образом, что бы сигнал проходил через перегородки внутри здания, но не проникал за внешние стены. Т.е. не создавал помехи другим беспроводным системам. Частоты следует распределять таким образом, чтобы уменьшить или вовсе исключить внутрисистемные помехи, которые создают друг другу

¹² По материалам статьи [60]

узлы беспроводной сети. Также, нужно обратить внимание на устройства, которые потенциально являются источниками электромагнитных помех (микроволновые печи, радиотелефоны и т.д.).

WLAN в общественных местах (Hot-Spot)

Такие сети сейчас появляются во многих общественных местах, - на вокзалах, в залах ожидания аэропортов, дорогих гостиницах, ресторанах и кафе. С их помощью пользователям предоставляются информационные услуги такие, как доступ к сети Интернет, электронной почте, базам данных и т.д.

К проблемам, которые присущи беспроводным сетям в помещениях, добавляется гораздо более сложная ЭМО (например, в аэропортах, где действуют большое количество различных радиосистем).

Организация беспроводного канала связи между несколькими зданиями

С помощью беспроводных технологий можно организовать единое информационное пространство, объединив сети (в том числе и телефонные), расположенные на территории одного предприятия, но в разных зданиях. Такая задача решается путем установки радиомостов или радиомаршрутизаторов и направленных антенн.

В этом случае следует тщательно подбирать мощности, частоты, антенны и месторасположение передатчиков, для исключения взаимных помех с беспроводными системами, располагающимися на соседних территориях, не принадлежащих предприятию.

Корпоративные сети на ограниченной территории

Особенностью таких сетей является то, что все соединяемые объекты находятся на территории одной организации, и между соединяемыми объектами нет строений, принадлежащих другим владельцам. Примерами могут служить сеть университетского городка или территория завода, в цехах которого организована беспроводная сеть.

Беспроводную локальную сеть такого типа лучше разбивается на сегменты, соты. Одна сота - один радиоканал, совместно используемый несколькими имеющими к нему доступ станциями. Территории соседних сот частично перекрываются, поэтому соседние соты должны работать на разных частотах. В таких сетях также следует внимательно относиться к возможному возникновению взаимных помех с беспроводными системами, располагающимися на соседних территориях, не принадлежащих предприятию.

1.2.Проблемы ЭМС и методы их решения в WLAN

В этом разделе формулируются основные проблемы ЭМС, с которыми приходится сталкиваться в беспроводных локальных сетях, и описываются методы решения этих проблем.

Проблемы ЭМС, существующие в WLAN

Встроенные механизмы WLAN обеспечивают эффективную одновременную работу небольшого числа компьютеров внутри одной соты. Они не позволяют выделить гарантированную полосу пропускания для каждого пользователя. С ростом плотности абонентов увеличиваются взаимные помехи, повышается число коллизий и повторно передаваемых пакетов, возрастает время доступа к сети и задержки при передаче информации. Т.е. проблема повышения эффективности доступа становится все более актуальной.

Проблема скрытого узла

В беспроводных сетях возможна следующая ситуация: две станции (А и В) находятся вне зоны видимости друг друга. Станция С может взаимодействовать с обеими станциями (А и В). Станция А передает информацию на станцию С. Станция В «не видит», что среда передачи занята, т.к. ст. А находится для нее вне зоны досягаемости, и, считая что среда передачи свободна, начинает передавать информацию. В результате на станцию С приходят одновременно два сигнала от станции А и В, т.е. происходит коллизия. Эта ситуация известна как проблема скрытого узла.

Взаимные помехи между соседними сотами (внутрисистемная ЭМС)

В сетях стандартов 802.11 b и g доступно только три неперекрывающихся канала. Если сеть состоит из 1-3 сот, то уровень внутрисистемных помех относительно невелик. В беспроводной сети, состоящей из четырех и более сот, МС и АР соседних сот, работающих на перекрывающихся частотных каналах, создают значительные взаимные помехи. Это приводит к ухудшению качества связи, уменьшению пропускной способности и увеличению времени доступа к сети, вплоть до ее полной неработоспособности.

Межсистемная ЭМС

Необходимо учитывать взаимные помехи с различными радиоустройствами, работающими на той же территории (радиотелефоны, другие беспроводные сети, устройства Bluetooth). В зависимости от интенсивности излучения, такие помехи могут привести к значительному ухудшению связи или полной неработоспособности сети.

Обеспечение QoS для критичных приложений

Механизмы QoS стандарта 802.11e обеспечивают защиту чувствительного к задержкам трафика (голосовой, видео), от трафика остальных приложений, использующих беспроводную среду передачи, но они не спасают от изменений в среде передачи данных. Увеличение количества пользователей сети, наличие внешних и внутрисистемных помех приводят к неконтролируемому росту числа коллизий и повторно передаваемых пакетов. Это, в свою очередь, приводит к увеличению времени доступа к сети, уменьшению доступной полосы пропускания. Как следствие, эффективность механизмов QoS снижается или их работа полностью блокируется.

Влияние особенностей местности

Рельеф, физические препятствия на местности (трассе распространения) влияют на распространение радиоволн, а, следовательно, и на качество принимаемого сигнала. Это могут быть деревья, строения, стены здания, двери, автомобили, книжные полки, предметы дизайна (особенно металлические элементы), и т.д.

Погода также влияет на распространение радиоволн. Обычно осадки сказываются на частотах выше 5 ГГц, но, могут быть ситуации, когда их влияние достаточно сильно и на частотах выше 400 МГц (например, мокрая листва деревьев в парке). Эта проблема актуально для уличных беспроводных сетей и ее необходимо учитывать еще на стадии проектирования WLAN.

Существующие методы решения проблем ЭМС и их недостатки

Проблемы ЭМС (внутрисистемной и межсистемной) решаются при проектировании оборудования беспроводной сети (например используются различные способы кодирования, повышающие помехоустойчивость) и при проектировании непосредственно самой беспроводной сети. При этом возможности, заложенные в технические средства, определяют возможности проектировщика сети.

Механизмы доступа к среде передачи¹³

Механизмы доступа к среде передачи, существующие в сетях 802.11, показаны на рис. 1.2. WLAN используют механизм, который называется "множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий" (carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA). CSMA/CA представляет собой механизм "прослушивание перед передачей" (listen before talk, LBT). Передающая станция проверяет, присутствует ли в среде сигнал несущей и, прежде чем начать передачу, ожидает ее освобождения.

¹³ Подробно работа механизма доступа к среде в WLAN рассмотрена в литературе [9, 13, 14, 17-21, 59]

Предотвращение коллизий является ключевым моментом для беспроводных сетей, поскольку последние не имеют явного механизма для их обнаружения. При использовании технологии CSMA/CA коллизия обнаруживается только при неполучении передающей станцией ожидаемого подтверждения.



Компоненты механизма CSMA/CA:

- контроль несущей;
- распределенная функция координации (distributed coordination function, DCF);
- фреймы подтверждения;
- резервирование среды передачи с помощью механизма "готовность к передаче/готовность к приему" (Request-to-Send/Clear-to-Send, RTS/CTS).

Кроме того, два других механизма характерны для доступа к среде передачи по стандарту 802.11, но не связаны непосредственно с технологией CSMA/CA:

- фрагментация фреймов;
- точечная функция координации (point coordination function, PCF).

Станция, которая намеревается осуществить передачу в проводной среде, должна вначале проверить, используется ли несущая. Если несущая занята, то передача откладывается до момента освобождения среды. Станция определяет состояние среды с помощью двух методов.

- Проверка физического уровня на наличие несущей.

- Использование виртуальной функции контроля несущей, вектора распределения сети (network allocation vector, NAV).

Станция может проверить физический уровень и убедиться в том, что несущая свободна. Но, в некоторых случаях, среда передачи может быть все еще занята другой станцией через вектор распределения сети. Это таймер, значение которого обновляется данными фреймов, передаваемых через среду передачи. Станция обновляет значение вектора распределения сети только тогда, когда полученное значение поля продолжительности превышает хранимое в ее векторе распределения сети.

Утвержденный IEEE механизм доступа к среде передачи для сетей стандарта 802.11 - это распределенная функция координации (DCF), механизм доступа к среде передачи, основанный на методе CSMA/CA.

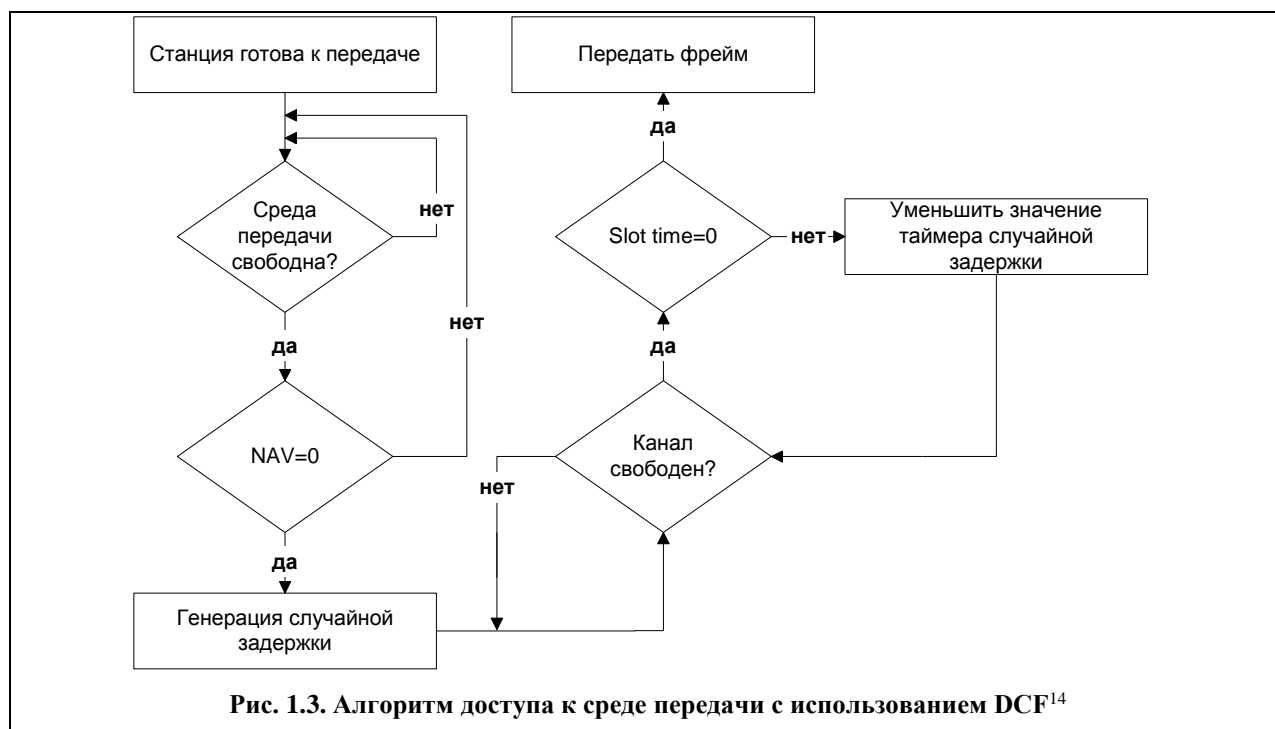
При работе с использованием DCF станция, намеревающаяся передать фрейм, должна выждать определенное время после того, как среда освободится. Этот интервал времени называется межфреймовый зазор DCF (DCF interframe space, DIFS). По истечении интервала времени DIFS станция может принять участие в состязании за право доступа к среде передачи. Существует большая вероятность того, что несколько станций одновременно попытаются начать передачу тотчас после освобождения среды, что приведет к возникновению коллизии. Чтобы избежать этой ситуации, DCF использует таймер случайной задержки (random backoff timer).

Спецификация 802.11 требует, чтобы принимающая станция передала станции-отправителю фрейм подтверждения. Если передающая станция не получает фрейм подтверждения, она считает, что в среде передачи произошла коллизия. Передающая станция обновляет значение своего счетчика числа попыток, удваивает ширину окна конкуренции и начинает процесс доступа к среде передачи сначала. На рис. 1.3 представлен алгоритм получения доступа к среде передачи с использованием DCF.

В беспроводных сетях стандарта 802.11 проблема скрытого узла решается с помощью специального управляющего фрейма, который называется фрейм RTS (фрейм готовности к передаче). Фрейм RTS, содержащий время необходимое для обмена фреймами, посылается точке доступа.

Точка доступа получает фрейм RTS от станции и отвечает управляющим фреймом CTS (фреймом готовности к приему). Последний также содержит поле продолжительности, значение которого достаточно для того, чтобы передающая станция могла завершить обмен фреймами. Обмен фреймами включает тот фрейм, который станция намерена передать, а также ожидаемый ею фрейм подтверждения. Все станции,

находящиеся в зоне действия точки доступа получают фрейм CTS и обновляют значения своих NAV (векторов распределения сети).



Изначальный фрейм RTS должен пройти через процедуру DCF, как любой другой фрейм. Но, аналогично фрейму подтверждения, соответствующий CTS-фрейм, передаваемый точкой доступа, минует процедуру случайной задержки и, перед тем, как быть переданным, должен выждать время, равное интервалу SIFS.

Станция, получившая фрейм, подтверждает его безошибочный прием отправкой передающей станции фрейма подтверждения. Фреймам подтверждения разрешается не принимать участия в процессе случайной задержки. Это гарантирует принимающей станции наибольший шанс получения доступа к среде передачи, по сравнению с другими станциями. При каждой неудачной попытке доступа к среде станция увеличивает значение счетчика попыток. Когда значение счетчика числа попыток достигает установленного администратором сети порога, станция пытается зарезервировать среду.

Фрагментация фрейма - это выполняемая на уровне MAC функция, назначение которой повысить надежность передачи фреймов через беспроводную среду. Под фрагментацией понимается дробление фрейма на меньшие фрагменты и передача каждого из них отдельно. Получение каждого фрагмента фрейма подтверждается отдельно. Следовательно, если какой-нибудь фрагмент будет передан с ошибкой или вступит в коллизию, только его придется передавать повторно, а не весь фрейм. Это косвенно увеличивает пропускную способность. Каждый фрагмент фрейма включает

¹⁴ По материалам [7]

заголовок, и требует передачи отдельного фрейма подтверждения. В результате увеличивается число служебных сигналов и снижается доля передаваемых полезных данных. Размер фрагмента может задавать администратор сети. Фрагментации подвергаются только одноадресные фреймы. Широковещательные и многоадресные фреймы передаются целиком. Кроме того, фрагменты фрейма передаются пакетом, с использованием только одной итерации механизма доступа к среде передачи DCF.

PCF - необязательный механизм доступа к среде передачи, который используется дополнительно к механизму DCF. Работа PCF возможна только в инфраструктурах BSS. Механизм PCF разрешает передачу фреймов по опросу, ограничивая свободный доступ к среде передачи. Большинство производителей не обеспечивают поддержку механизма PCF в своих устройствах, потому что он увеличивает количество передаваемых служебных сигналов в BSS.

Механизм PCF основан на взаимодействии точки координации (point coordinator, PC) и станций, опрашиваемых точкой координации (станции CF-Pollable). При работе под управлением механизма PCF, станции могут передавать данные (по одному фрейму за один раз) только тогда, когда точка координации производит их опрос. Точка координации может посылать фреймы станциям, опрашивать их на предмет передачи фреймов, подтверждать прием фреймов в соответствии с требованиями MAC-уровня или закончить сеанс CFP.

Механизм доступа к среде передачи: эффективность при воздействии помех

Механизмы контроля несущей с помощью временного разделения обеспечивают одновременную работу только одного передатчика в одной соте. При наличии помех этот механизм неэффективен, т.к. беспроводная среда может быть занята независимым сторонним мешающим передатчиком.

Функции координации DCF и PCF обеспечивают распределение полосы пропускания между абонентами.

С помощью фреймов подтверждения определяется факт доставки информации получателю и необходимость повторной отправки пакетов.

Механизм RTS/CTS решает проблему скрытого узла и обеспечивает доступ абонента к среде передачи в загруженной BSS. Этот механизм действует только в пределах одной соты и не может регулировать работу соседних сот.

За счет фрагментации фреймов можно повысить надежность передачи фреймов в беспроводных локальных сетях, т.к. вероятность успешной передачи меньшего фрагмента через зашумленную беспроводную среду выше. В то же время, это приводит к

увеличению передаваемой служебной информации. Фрагментация может быть полезна в загруженной беспроводной сети или при наличии помех.

Из рассмотренных механизмов только фреймы подтверждения и фрагментацию можно использовать для противодействия радиопомехам. Этого явно недостаточно. Остальные механизмы предназначены только для обеспечения связи внутри соты и уязвимы как для межсистемных помех, так и для помех от соседних сот.

Спецификация IEEE 802.11e¹⁵

Стандарт IEEE 802.11e разработан для обеспечения прикладных сервисов необходимой полосой пропускания с допустимой задержкой передачи данных (Quality of Service, QoS). Трудность решения этой проблемы в отношении беспроводных сетей заключается в том, что количество ошибочных пакетов может достигать 10–20%, а скорость передачи данных существенно зависит от местоположения абонента и может изменяться во время соединения. Устройство, управляющее выделением требуемой полосы пропускания, остается в неведении относительно располагаемых ресурсов, поскольку аналогичное соседнее устройство может в любой момент использовать часть этих ресурсов для своих нужд.

Спецификация 802.11e предполагает маркировку пакетов, относящихся к критичным данным, метками приоритета. Максимальный приоритет получают пакеты голосовых данных (IP-телефония), как наиболее критичные к задержке и полосе пропускания, потоки передающие видеоинформацию, которым выделяется требуемая полоса при ее наличии. В BSS и ESS передача данных идет только от клиента к точке доступа и обратно. Спецификация 802.11e добавляет возможность обмена трафиком непосредственно между двумя клиентами, что не только позволяет более эффективно использовать полосу пропускания, но и добавляет некоторые функциональные возможности, в частности, для домашних беспроводных сетей, способных обходиться без точки доступа вообще.

Исследовательская группа 802.11e для обеспечения QoS в сетях стандарта 802.11 предложила два решения, реализуемых на MAC-подуровне.

- Гибридная функция координации (hybrid coordination function, HCF) с работой в режиме конкуренции. Чаще это решение называют расширенная распределенная функция координации (enhanced DSF, EDSF).
- HCF с работой в режиме поочередного доступа.

В спецификации стандарта 802.11e данные разбиты на восемь классов. EDSF и HCF в режиме поочередного доступа используют эти восемь классов, называемые классы

¹⁵ По материалам [19]

трафика (traffic classes, TC), соотношение которых с восемью классами, определенными в стандарте 802.1D, представлено в табл. 1.1. Трафик разделен на четыре большие категории, называемые категории доступа (access categories, AC). Категории доступа 0-3 указывают на приоритет классов стандарта 802.11e.

Табл. 1.1. Соответствие классов трафика категориям доступа

ТС по стандарту 802.1D	Описание	АС и очередность передачи
0	Наибольшее благоприятствование (best effort)	0
1	Низкий приоритет	0
2	Низкий приоритет	0
3	Сигнализация/контроль	1
4	Видеозондирование (video probe)	2
5	Видео	2
6	Голос	3
7	Управление сетью	3

Любая система, обеспечивающая различные уровни обслуживания, имеет три основных компонента.

- Механизм классификации трафика.
- Механизм пометки трафика соответствующим значением качества связи (QoS).
- Механизм передачи, учитывающий классы передаваемого трафика.

Механизм классификации и пометки фреймов данных не подпадает под действие проекта документа 802.11e, но можно предположить, что приложение (такое как обеспечивающее передачу речи и установленное в телефоне стандарта 802.11) должно отметить биты приоритета IP-дейтаграммы. Клиентское устройство преобразует эти значения в классы трафика стандарта 802.11e. При наличии классифицированного и снабженного метками трафика стандарт 802.11e обеспечивает механизм дифференциации и приоритезации передаваемого трафика.

После того, как трафик классифицирован и помещен в соответствующую очередь, следующий шаг состоит в передаче фреймов.

EDSF обеспечивает механизм разделения трафика по приоритетам для клиентских устройств, не связанных непосредственно одно с другим.

Целью мер, принимаемых в обеспечение QoS, является защита трафика высокоприоритетных приложений от влияния трафика низкоприоритетных приложений. Если две или больше станций вступят в коллизию, то в этом случае фрейм высокоприоритетной станции имеет преимущество, и низкоприоритетная станция будет вынуждена освободить среду передачи и увеличить ширину своего окна конкуренции.

Механизм управления входом (admission control) отслеживает наличные ресурсы сети и разрешает или отклоняет новые сеансы связи приложений. Расширенная

распределенная функция координации (EDSF) использует схему управления входом, получившую название распределенное управление входом (distributed admission control, DAC). Механизм DAC отслеживает в процентах доли использования среды передачи, приходящейся на каждую категорию доступа. Неиспользуемая доля пропускной способности среды передачи называется наличный бюджет (available budget) для данной категории. О наличном бюджете точка доступа сообщает станциям в сигнальных фреймах. Если бюджет начинает приближаться к нулю, станции не могут инициировать новые потоки приложений. Данный процесс защищает существующие информационные потоки приложений от влияния со стороны новых потоков.

Работа HCF в режиме поочередного доступа аналогична работе функции точки координации PCF. Точка доступа содержит логический объект (logical entity), называемый гибридный координатор (hybrid coordinator, HC), который отслеживает потоки информации клиентских станций HCF и назначает интервалы опросов. Получение доступа в результате опроса HCF позволяет станции требовать нужное ей время для передачи, а не просто определять свободную полосу пропускания, как в случае использования EDSF. HCF позволяет гибриднему координатору определить, какие ресурсы беспроводной среды доступны, и принять либо отклонить информационные потоки трафика приложения.

HCF может функционировать в двух режимах, один из них сосуществует с EDSF, а второй использует период, свободный от конкуренции (CFP), аналогично PCF.

Механизм распределенного управления входом (DAC) не обладает нужными характеристиками, потому что не осуществляет строгий контроль входа. Станции потенциально могут осуществлять передачу и тем самым негативно влиять на уже существующие информационные потоки. Эффективность механизмов 802.11e быстро снижается при усилении перекрытия по совмещенному каналу.

Эффективность работы механизмов стандарта IEEE 802.11e при воздействии помех

Таким образом, оборудование стандарта IEEE 802.11e защищает высокоприоритетный трафик беспроводной сети от низкоприоритетного внутри одной соты. Независимые от соты мешающие передатчики отрицательно влияют на любой вид передаваемого трафика. В результате поврежденные пакеты должны передаваться повторно. Для низкоприоритетного трафика задержка в доставке пакетов не очень критична. Для высокоприоритетного трафика (например ip-телефония) это неприемлемо, т.к. механизмы 802.11e как раз и предназначены для того, что бы обеспечить быструю доставку высокоприоритетных данных.

Дополнительные спецификации, предназначенные для уменьшения влияния помех: стандарты IEEE 802.11h¹⁶ и IEEE 802.11k¹⁷

Стандарт IEEE 802.11h дополняет существующую спецификацию 802.11a алгоритмами эффективного выбора частот, а также средствами управления излучаемой мощностью и генерации соответствующих отчетов. Протоколы, используемые в стандарте, предусматривают динамическое реагирование клиентов беспроводной сети на интерференцию радиосигналов путем перехода на другой канал, снижением мощности, либо обоими способами. Решение этих задач базируется на протоколах DFS (Dynamic Frequency Selection) и TPC (Transmit Power Control).

Технология DFS обнаруживает другие устройства, использующие тот же радиоканал, что и точка доступа WLAN, и, при необходимости, переключает BSS на другой канал. DFS отвечает за отсутствие интерференции сигналов точки доступа и других средств связи, включая радарные системы и «чужие» сегменты WLAN.

Когда беспроводное устройство впервые соединяется с точкой доступа, оно высылает базовой станции список каналов, которые может поддерживать. Если точке доступа необходимо переключиться на другой радиоканал, она проверяет полученные данные для определения наилучшего из них. Точка доступа инициирует переключение канала с помощью отсылки соответствующего кадра на все беспроводные устройства, связанные с ней в процессе сеанса. В кадре указываются: номер нового рабочего канала, время до переключения и разрешение на передачу до момента переключения канала. Все абонентские станции, получающие уведомление о переключении рабочего канала, меняют свои настройки по истечении указанного периода.

Точка доступа постоянно измеряет активность канала для выявления в нем трафика чужих систем. Для этого она посылает запросы на измерения на абонентский терминал или группу терминалов, указывая номер канала, который следует проверить, время начала измерения и продолжительность замеров. Абонентская станция проводит измерение активности канала и генерирует отчет для точки доступа.

Технология TPC предназначена для уменьшения помех от сетей WLAN спутниковым и радарным службам, что осуществляется снижением мощности радиопередачи. TPC также может применяться для управления энергопотреблением

¹⁶ По материалам статьи «Status of Project IEEE 802.11h», http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgh_update.htm

¹⁷ По материалам статей:

- Леонид Бараш, «Беспроводные стандарты: Вот алфавит кончается...», Компьютерное Обозрение (20 января 2005), <http://www.itc.ua/>
- «Адаптивный подход к оптимизации производительности беспроводных сетей», КомпьютерПресс №5, 2004, <http://www.compress.ru/>
- Павел Иванов, «Единство в многообразии символов», <http://www.abn.ru/>

беспроводных устройств, для изменения рабочей дистанции между точками доступа и беспроводными устройствами. Точки доступа ограничивают максимально допустимую мощность передачи как свою, так и обслуживаемых абонентских станций. Мощность передачи любой из станций, при связи с данной точкой доступа, не может превышать максимальной величины, указанной точкой доступа. Когда каждый новый терминал 802.11 соединяется с ней, он сообщает требуемую величину мощности сигнала. Точка доступа аккумулирует данные о связанных с ней станциях для определения максимальной мощности всего сегмента локальной радиосети. Мощность радиоизлучения в этом сегменте WLAN регулируется для уменьшения помех, создаваемых другим системам, причем поддерживается достаточный ее запас для надежной работы беспроводной сети.

Стандарт IEEE 802.11k предназначен для сетей 802.11 и предусматривает обмен различными служебными параметрами. Часть из них связана с процедурой внутрисетевого роуминга и позволяет оптимизировать распределение трафика по сети.

В беспроводной среде клиентское устройство устанавливает соединение с точкой доступа по максимальному уровню сигнала. При определенном числе и расположении пользователей вполне возможно, что какая-то точка доступа окажется перегруженной, а остальные будут работать с минимальной нагрузкой, что приведет к снижению общей производительности сети. В беспроводной сети стандарта 802.11k, при полной загрузке точки доступа с наибольшим уровнем сигнала, клиентские запросы на установление соединений будут переадресовываться другим устройствам. В итоге, благодаря более рациональному использованию ресурсов, суммарная пропускная способность сети возрастет. Само решение о перенаправлении клиента на другую точку доступа принимается на основе полученной от абонентских устройств информации обо всех распознанных ими точках доступа, интенсивности сигналов, поддерживаемых сервисах, типах шифрования и т. д.

Стандарт IEEE 802.11k обеспечивает доступ к параметрам, измеряемым на первом и втором уровнях модели OSI, с более высоких уровней. Точка доступа может запросить у клиента сведения об уровне шумов в канале, не относящихся к работе устройств стандарта 802.11, о загрузке и продолжительности использования данного канала. Эта информация будет использоваться при выборе радиоканала для установления соединения. Для улучшения качества обслуживания предназначен и сбор данных о так называемых скрытых узлах. Их наличие снижает эффективность работы механизма предотвращения коллизий и, как следствие, общую производительность сети. Спецификация 802.11k предусматривает передачу клиентами на точки доступа сведений о выявленных скрытых узлах. Стандарт IEEE 802.11k предполагает получение точками доступа от клиентов

полной статистической информации о сетевых параметрах и событиях, а также применение процедур управления излучаемой мощностью в различных частотных диапазонах в соответствии с требованиями регулирующих органов разных стран.

Эффективность механизмов стандартов IEEE 802.11h и IEEE 802.11k при воздействии помех

Для того, чтобы организовать оптимальное распределение пользователей между точками доступа необходимо увеличивать зоны перекрытия между соседними сотами. В результате уменьшается расстояние между сотами, работающими на одном частотном канале, а, соответственно, увеличиваются внутрисистемные помехи. Эффективно использовать такую возможность можно в WLAN состоящих из одной-трех сот, когда отсутствуют помехи по перекрывающемуся каналу.

Автоматический выбор частотных каналов с наименьшим уровнем помех. Такая возможность полезна при наличии в сети одной-двух сот. Если сот три и больше, то число доступных частотных каналов, на которые можно осуществить переход крайне ограничено. При этом может потребоваться синхронизированное переключение частотных каналов сразу всех сот. Это возможно только при наличии единой системы управления беспроводной сетью. При наличии 11 частотных каналов (например в США) такое переключение вообще невозможно, т.к. комбинация из трех неперекрывающихся каналов может быть получена только при использовании 1-го, 6-го и 11-го каналов.

Регулирование мощности излучения. Точка доступа должна излучать сигнал, который смогла бы принять даже наиболее удаленная от нее МС. При этом регулировать мощность излучения АР практически не имеет смысла. Если антенны точек доступа всенаправленные, то АР находятся в центре соты. При этом максимальная мощность, требуемая для передачи данных от граничной МС к точке доступа, будет примерно равной для всех МС, находящихся на границе сот. Т.е. граничные МС, имеющие наибольшее мешающее влияние на соседние соты, будут, как и раньше, излучать с максимальной мощностью. В итоге, при использовании всенаправленных антенн уменьшается только средний уровень внутрисистемных помех. Эффективность механизмов стандарта IEEE 802.11k показана на рис.1.4.



Кодирование и модуляция

Кодирование - это механизм, позволяющий осуществлять высокоскоростную передачу данных по зашумленным каналам. Все каналы передачи подвержены помехам, из-за чего возникают ошибки в виде искаженных битов. Кодирование увеличивает объем данных, передаваемых через зашумленную среду передачи, заменяя последовательности битов более длинными кодами. Это позволяет распознать и исправить искаженные биты. Длина кодового ограничения (constraint length of a code) показывает, как много выходных элементов выходит из системы в пересчете на один входной. Коды характеризуются эффективной степенью (или коэффициентом) кодирования (code rate). Этот коэффициент указывает, сколько выходных битов, приходится на один входной. Коды с более высокой эффективной степенью кодирования позволяют передавать данные с большей скоростью, но они более чувствительны к помехам.

Одним из основных предположений, на которых основан механизм кодирования, состоит в том, что ошибки, возникающие при передаче информации, являются независимыми событиями. Но зачастую ошибки в передаче происходят сериями. По этим причинам используется чередование для разброса битов блочных ошибок, делая, таким образом, ошибки похожими на независимые. Основная цель чередования - разбросать соседние биты путем размещения между ними битов несоседних.

При кодировании информационный бит, представляемый прямоугольным импульсом, разбивается на последовательность более мелких импульсов-чипов. В

результате спектр сигнала значительно расширяется, поскольку ширину спектра можно с достаточной степенью точности считать обратно пропорциональной длительности одного чипа. Такие кодовые последовательности часто называют шумоподобными кодами. Наряду с уширением спектра сигнала, уменьшается и спектральная плотность энергии, так что энергия сигнала как бы размазывается по всему спектру, а результирующий сигнал становится шумоподобным в том смысле, что его теперь трудно отличить от естественного шума.

Одна из наиболее известных таких последовательностей - код Баркера длиной в 11 чипов: 11100010010. Коды Баркера обладают наилучшими среди известных псевдослучайных последовательностей свойствами шумоподобности. Для передачи единичного и нулевого символов сообщения используются, соответственно, прямая и инверсная последовательности Баркера.

В приёмнике полученный сигнал умножается на код Баркера (вычисляется корреляционная функция сигнала), в результате чего он становится узкополосным, и его фильтруют в узкой полосе частот. Любая узкополосная помеха, попадающая в полосу исходного широкополосного сигнала, после умножения на код Баркера, наоборот, становится широкополосной, а в узкую информационную полосу попадает лишь часть помехи, по мощности примерно в 11 раз меньшая¹⁸, чем помеха, действующая на входе приёмника. Основной смысл использования кода Баркера заключается в том, чтобы гарантировать высокую степень достоверности принимаемой информации и при этом передавать сигнал практически на уровне помех.

Таким образом, при скорости передачи 1 или 2 Мбит/с энергия узкополосной помехи распределяется по всему спектру сигнала и ее уровень уменьшается в 11 раз¹⁹.

Если помеха широкополосная, то уменьшение уровня помехи можно оценить следующим образом. Допустим, что помеха, повреждает какую-то часть спектра сигнала p , %. Тогда, после декодирования, энергия помехи распределится по всему спектру сигнала. Представим широкополосную помеху набором узкополосных помех шириной ∂f :

$$\partial f = \Delta f / 11 ;$$

где ∂f - ширина узкополосной помехи, МГц;

Δf - ширина полосы спектра сигнала, МГц.

¹⁸ «Технологии беспроводных сетей семейства 802.11»
<http://www.thg.ru/network/20030828/>

¹⁹ «Технологии беспроводных сетей семейства 802.11»
<http://www.thg.ru/network/20030828/>

Каждая из узкополосных составляющих широкополосной помехи, распределенная по всей ширине спектра должна уменьшиться в 11 раз. При этом сумма уровней узкополосных помех равна:

$$\begin{aligned} a_{помехи} &= 10 \log P_{помехи}; \\ P_{i_помехи} &= P_{помехи}/11; \\ P_{\Sigma_помехи} &= \sum_{i=1}^n P_{i_помехи} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{помехи}}{11} = n \cdot \frac{P_{помехи}}{11}; \\ a_{\Sigma_помехи} &= 10 \log(P_{\Sigma_помехи}) = 10 \log(P_{помехи}) + 10 \log(n) - 10 \log 11; \\ a_{\Sigma_помехи} &= 10 \log(P_{помехи}) + 10 \log(n) - 10,4; \quad (1.1) \end{aligned}$$

где $P_{помехи}$ - уровень широкополосной помехи, попадающей в приемник, мВт;

$a_{помехи}$ - уровень широкополосной помехи, попадающей в приемник, дБм;

$P_{i_помехи}$ - уровень узкополосной составляющей помехи, после умножения на код Баркера, дБм;

$P_{\Sigma_помехи}$ - уровень широкополосной помехи после умножения на код Баркера, мВт;

$a_{\Sigma_помехи}$ - уровень широкополосной помехи после умножения на код Баркера, дБм;

n - число узкополосных помех, составляющих широкополосную помеху, шт.

Использование ССК-кодов позволяет кодировать 8 битов на один символ²⁰ при скорости 11 Мбит/с и 4 бита на символ²¹ при скорости 5,5 Мбит/с. Сами кодовые последовательности являются 8-чиповыми²², и при скорости передачи 11 Мбит/с кодирование 8 битов на символ соответствует символьной скорости $1,375 \cdot 10^6$ символов в секунду²³ ($11/8 = 1,385$). Аналогичная символьная скорость используется и при скорости передачи 5,5 Мбит/с, так как в данном случае в одном символе кодируется только 4 бита.

В табл. 1.2 показаны значения скорости передачи и соответствующие типы модуляции в стандарте IEEE 802.11b.

²⁰ Стандарт IEEE 802.11 [1]

²¹ Стандарт IEEE 802.11b [2]

²² Стандарт IEEE 802.11b [2]

²³ Стандарт IEEE 802.11b [2]

Табл. 1.2. Скорости передачи и тип модуляции в стандарте IEEE 802.11b²⁴

Скорость передачи, Мбит/с	Кодовая последовательность	Тип модуляции	Символьная скорость, символов в секунду	Количество бит на символ
1	11-чиповая (Баркера)	DBPSK	10^6	1
2	11-чиповая (Баркера)	DQPSK	10^6	2
5,5	8-чиповая (ССК)	DQPSK	$1,375 \cdot 10^6$	4
11	8-чиповая (ССК)	DQPSK	$1,375 \cdot 10^6$	8

Для того чтобы обеспечить достоверность принимаемых данных (т.е. иметь возможность обнаруживать и исправлять ошибки) в режимах передачи по технологии OFDM, используют добавление избыточной информации и так называемое свёрточное кодирование. Суть свёрточного кодирования заключается в том, что к последовательности передаваемых битов добавляются служебные биты, значения которых зависят от нескольких предыдущих переданных битов. При одном и том же типе модуляции в стандартах используются различные скорости передачи. Рассмотрим модуляцию BPSK, при которой скорость передачи данных составляет 6 или 9 Мбит/с. Время длительности одного символа составляет²⁵ 4 мкс. Следовательно, частота следования импульсов равна²⁶ 250 кГц. Учитывая, что в каждом подканале кодируется по одному биту, а всего таких подканалов²⁷ 48, получим, что общая скорость передачи составит $250 \text{ кГц} \times 48 \text{ каналов} = 12 \text{ Мбит/с}$. При степени свёрточного кодирования $1/2$, на каждый информационный бит добавляется один служебный (избыточность равна 2). По этой причине при степени свёрточного кодирования $1/2$ информационная скорость вдвое меньше скорости передачи. При степени свёрточного кодирования $3/4$ на каждые три информационных бита добавляется один служебный, поэтому в данном случае полезная (информационная) скорость составляет $3/4$ от полной скорости. Соответственно, при общей скорости передачи 12 Мбит/с, информационная скорость для коэффициента кодирования $1/2$ составит $12 \times 1/2 = 6 \text{ Мбит/с}$. А для коэффициента кодирования $3/4$ информационная скорость составит $12 \times 3/4 = 9 \text{ Мбит/с}$.

²⁴ «Технологии беспроводных сетей семейства 802.11»

<http://www.thg.ru/network/20030828/>

²⁵ Стандарт IEEE 802.11a [4]

²⁶ Стандарт IEEE 802.11a [4]

²⁷ Стандарт IEEE 802.11a [4]

Табл. 1.3. Параметры передатчика стандарта 802.11a²⁸

Скорость передачи данных (Мбит/с)	Сигнальное созвездие	Степень сверточного кодирования	Число канальных битов на поднесущую	Число канальных битов на символ	Число битов данных на символ OFDM
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

Технология двоичного пакетного свёрточного кодирования опционально используется и в стандарте 802.11b на скоростях 5,5 Мбит/с и 11 Мбит/с. В основе метода RBCC лежит так называемое свёрточное кодирование со скоростью²⁹ 1/2. Используемые в RBCC типы модуляции: BPSK³⁰ для скорости 5,5 Мбит/с и QPSK³¹ для скорости 11 Мбит/с.

Для получения скоростей 22 и 33 Мбит/с в технологии RBCC используется 8-позиционная фазовая модуляция 8-PSK. Данные поступают сначала на сверточный кодер с коэффициентом кодирования³² 1/2, а затем на пунктурный кодер, с коэффициентами кодирования 4/3 (22 Мбит/с)³³ и 2/1 (33 Мбит/с)³⁴. Пунктурный кодер необходим для уменьшения избыточности передаваемой информации. Результирующий коэффициент кодирования составит 2/3 для скорости 22 Мбит/с, и 1 для скорости 33 Мбит/с.

Можно предположить, что тип используемой модуляции задает требование к отношению сигнал/помеха³⁵, а кодирование и избыточность передаваемых данных определяют выигрыш в отношении сигнал/помеха³⁶ при декодировании в зависимости от степени повреждения помехой полезного сигнала.

В идеале, допустимое отношение сигнал/помеха должно быть указано производителем оборудования. К сожалению, для оборудования WLAN такая информация обычно отсутствует.

Для оборудования стандартов 802.11b/g, считать допустимое отношение сигнал/помеха необходимо при разнице между соседними каналами 25 МГц (помеха от соседнего канала) и 35 МГц (перекрестная помеха). Тогда для оборудования стандарта

²⁸ Стандарт IEEE 802.11a [4]

²⁹ Стандарт IEEE 802.11b [2]

³⁰ Стандарт IEEE 802.11b [2]

³¹ Стандарт IEEE 802.11b [2]

³² Стандарт IEEE 802.11g [5]

³³ Стандарт IEEE 802.11g [5]

³⁴ Стандарт IEEE 802.11g [5]

³⁵ Имеется в виду широкополосная помеха

³⁶ Имеется в виду узкополосная помеха, существенно воздействующая только на определенную часть спектра сигнала

802.11g, использующего технологии OFDM, согласно спектральной маске³⁷ и данных о допустимых уровнях помех³⁸, уменьшение уровня сигнала при удалении от несущей на 16 и более МГц составит не менее 24 дБ, уменьшение уровня сигнала при удалении от несущей на 30 и более МГц составит не менее 40 дБ. В табл. 1.4 показаны характеристики радиостанций стандарта 802.11g.

Табл. 1.4. Минимально допустимые характеристики радиостанций стандарта 802.11g OFDM

Скорость передачи данных (Мбит/с)	Модуляция	Степень сверточного кодирования	Доп. превышение уровня помехи над уровнем сигнала, дБ ($\Delta f > 25$ МГц)	Доп. превышение уровня помехи над уровнем сигнала, дБ ($\Delta f > 35$ МГц)	Доп. отношение сигнал/помеха, дБ
6	BPSK	1/2	16	32	8 = 24-16=40-32
9	BPSK	3/4	15	31	9 = 24-15=40-31
12	QPSK	1/2	13	29	11 = 24-13=40-29
18	QPSK	3/4	11	27	13 = 24-11=40-27
24	16-QAM	1/2	8	24	16 = 24-8=40-24
36	16-QAM	3/4	4	20	20 = 24-4=40-20
48	64-QAM	2/3	0	16	24 = 24-0=40-16
54	64-QAM	3/4	-1	15	25 = 24-(-1)=40-15

В стандартах 802.11 DSSS, 802.11b и 802.11g PBCC указано, что связь должна обеспечиваться при превышении уровня соседнего канала (разница 25 МГц, уменьшение уровня не менее 30 дБ) над сигналом не менее, чем 35 дБ. Согласно спектральной маске отношение сигнал/помеха в этом случае будет 30-35=-5дБ. Т.е. уровень помехи может превышать уровень сигнала на 5 дБ. Для оценки допустимого отношения сигнал/помеха при воздействии помехи по перекрывающемуся каналу это число не годится. По результатам тестирования³⁹, при испытаниях устройств при одном и том же уровне пакетных ошибок (PER =0,01) и скорости передачи 11 Мбит/с, работа в режиме ССК была возможной при отношении сигнал/шум 8,5 дБ, а применение PBCC позволило уменьшить это соотношение до 4,5 дБ.

Для модели точки доступа DWL-900AP+ производитель указывает⁴⁰ требования к отношению сигнал/помеха, соответствующие данным табл. 1.5 (кроме режима 33Мбит/с, неподдерживаемого той точкой доступа). В режиме PBCC 33Мбит/с требование к чувствительности⁴¹ на 2 дБ ниже, чем в режиме PBCC 22Мбит/с. Следовательно, при одинаковом уровне шума приемника, допустимое отношение сигнал/помеха должно быть на 2 дБ выше (см. табл. 1.5).

³⁷ Стандарты IEEE 802.11 a,g [4, 5]

³⁸ Стандарты IEEE 802.11 a,g [4, 5]

³⁹ И.Шахнович, «Беспроводные локальные сети. Анатомия стандартов IEEE 802.11»

ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес 1/2003

⁴⁰ «Точка доступа DWL-900AP+», www.dlink.ru

⁴¹ Стандарт IEEE 802.11g [5]

Табл. 1.5. Минимально допустимое отношение сигнал/помеха в радиостанциях стандартов 802.11

DSSS, 801.11b и 802.11g PBCC

Скорость передачи данных	Допустимое отношение сигнал/помеха
1 Мбит/с, Barker	3 дБ
2 Мбит/с, Barker	3 дБ
5,5 Мбит/с, CCK	5,5 дБ
11 Мбит/с, CCK	8,5 дБ
5,5 Мбит/с, PBCC	1,5 дБ
11 Мбит/с, PBCC	4,5 дБ
22 Мбит/с, PBCC	8,5 дБ
33 Мбит/с PBCC	10,5 дБ

Обеспечение ЭМС на этапе проектирования WLAN

Процесс проектирования беспроводной сети необходимо проводить с учетом параметров используемого оборудования, особенностей местности, влияния межсистемных и внутрисистемных помех. В последнее время появились системы, позволяющие планировать беспроводную сеть и осуществлять ее мониторинг и управление. Одна из наиболее функциональных из существующих систем проектирования и управления WLAN – Cisco Wireless Control System (WCS)⁴². WCS позволяет осуществлять контроль и визуализацию работы внутренней сети в режиме реального времени. Основной упор в этой системе сделан не на проектирование WLAN, а на централизованное управление и мониторинг беспроводной сети. Интерфейс системы WCS показан на рис. 1.5.

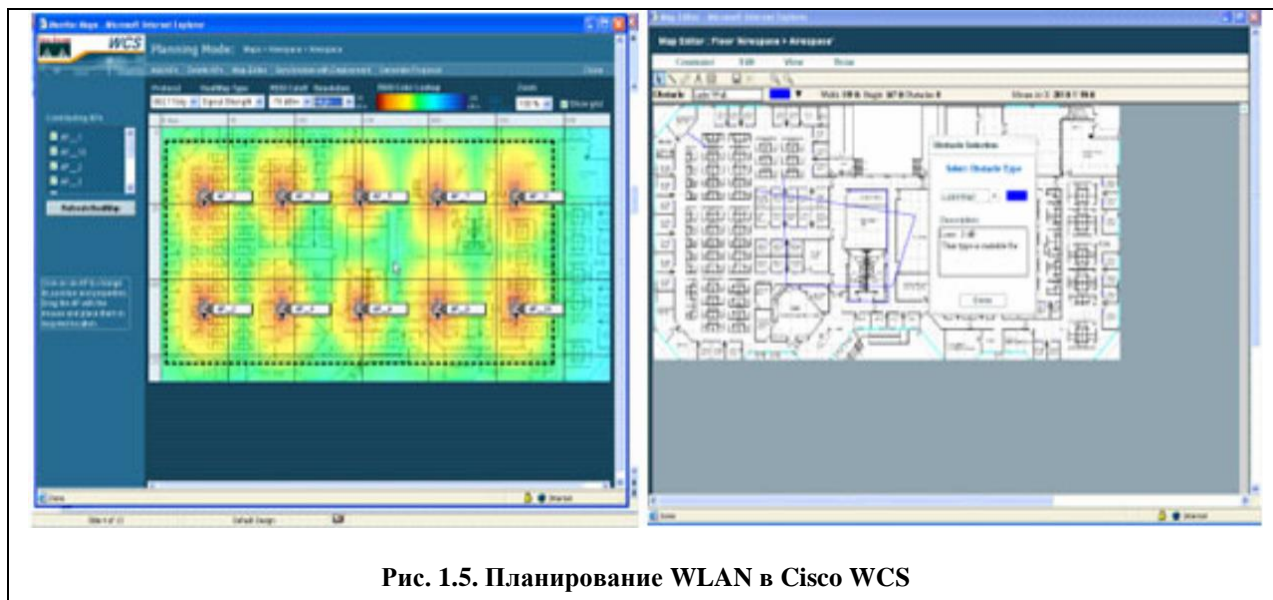


Рис. 1.5. Планирование WLAN в Cisco WCS

⁴² По материалам сайта www.cisco.com и статьи «Cisco Airespace», www.comptek.ru/box/1093

При проектировании WLAN осуществляется определение зоны покрытия в зависимости от материалов, из которых построено здание. Имеется встроенный редактор плана этажей. На основании предоставленных данных WCS помогает выбрать оптимальное расположение точек доступа и показывает ожидаемую зону покрытия.

Достоинствами системы WCS являются:

- широкие возможности по мониторингу сети (вплоть до отслеживания координат MC);
- удобное управление беспроводной сетью (управление настройками оборудования);
- беспроводная сеть, работающая под управлением WCS, активно использует возможности стандартов IEEE 802.11 k и IEEE 802.11 h (регулировка мощности, автоматический переход на другие частоты и т.д.);
- при планировании размещения точек доступа учитываются особенности местности (составляется план-карта помещений, указываются материалы стен).

Недостатки системы WCS:

- высокая цена (в зависимости от конфигурации 4...50 тыс. долларов, см. табл. 1.6);
- планирование размещения антенн и оценка зоны обслуживания точек доступа осуществляются без учета помех (внутрисистемных и межсистемных).

Табл. 1.6. Стоимость системы Cisco WCS⁴³

Код продукта	Название продукта	Цена	
AIR-WCS-WB-1.0-K9	Cisco WCS Base v1.0 up to 50 1000 Series AP Win2K/2003Server	3995	USD
AIR-WCS-LB-1.0-K9	Cisco WCS Base v1.0 up to 50 1000 Series APs, Linux RedHat	3995	USD
AIR-WCS-WL-1.0-K9	Cisco WCS w/Location v1.0 up to 50 1000 Series AP W2K/2003	5995	USD
AIR-WCS-LL-1.0-K9	Cisco WCS w/ Location v1.0 up to 50 1000 Series APs, Linux	5995	USD
AIR-WCS-WLB-100EX	Cisco WCS Base Expansion License add 100 AP Win/Linux	5995	USD
AIR-WCS-WLL-100EX	Cisco WCS w/Location Expansion License add 100 AP, Win/Linux	8995	USD
AIR-WCS-WL-UG-K9	Cisco WCS Base to Location System UG, Windows	3495	USD
AIR-WCS-LL-UG-K9	Cisco WCS Base to Location System Upgrade, Linux	3495	USD
AIR-WCS-WL-S-UG-K9	Cisco WCS Base to Location Site License UG, Windows	29995	USD
AIR-WCS-LL-S-UG-K9	Cisco WCS Base to Location Site License Upgrade, Linux	29995	USD
AIR-WCS-WLB-SITE	Cisco WCS Base Site License for unlimited APs, Win/Linux	34995	USD
AIR-WCS-WLL-SITE	Cisco WCS w/Location Site License unlimited APs, Win/Linux	51995	USD
AIR-WCS-LL-EX-UG	Cisco WCS Base to Location 100EX license UG, Linux	5495	USD
AIR-WCS-WL-EX-UG	Cisco WCS Base to Location 100EX license UG, Windows	5495	USD

⁴³ По материалам сайта <http://www.muvicom.ru/> (прайс от 17 ноября 2005)

1.3.Постановка задач

Механизмы, заложенные в WLAN, ориентированы на организацию работы беспроводной сети внутри одной соты, а дополнительные меры (IEEE 802.11 h и k) эффективны в небольших сетях и лишь расширяют возможности проектировщика. Для проектирования WLAN с учетом радиопомех необходимо создание методики проектирования беспроводных локальных сетей, учитывающей внутрисистемную и межсистемную ЭМС. Для оценки и уменьшения влияния радиопомех необходима разработка алгоритмов расчетов, позволяющих моделировать различные зависимости, существующие в беспроводных локальных сетях, работающих в условиях помех. Для обеспечения внутрисистемной ЭМС между соседними сотами, работающими на одной территории на одинаковых (или перекрывающихся) частотных каналах, необходима разработка алгоритмов доступа к среде передачи, обеспечивающих безконфликтную работу приемопередатчиков соседних сот.

Существующие системы проектирования WLAN включают в себя методику проектирования и алгоритмы расчетов зоны покрытия. Они позволяют оценить влияние особенностей местности, в которой разворачивается беспроводная сеть, но не учитывают воздействие межсистемных помех и помех от соседних сот. Существующий механизм доступа к среде передачи предназначен для организации безконфликтной работы приемопередающих устройств внутри одной соты и уязвим для помех, создаваемых передающими станциями соседних сот.

На рис. 1.6 показаны проблемы ЭМС в WLAN и предлагаемые пути решения.

На основании проведенного анализа сформулирована цель диссертационной работы: повышение эффективности проектирования беспроводных локальных сетей. Повышение эффективности проектирования WLAN заключается в снижении уровней внутрисистемных помех между приемопередатчиками соседних сот, в повышении помехоустойчивости проектируемых беспроводных локальных сетей к внешним по отношению к WLAN помехам, в сокращении материальных и временных затрат на проектирование беспроводных локальных сетей.

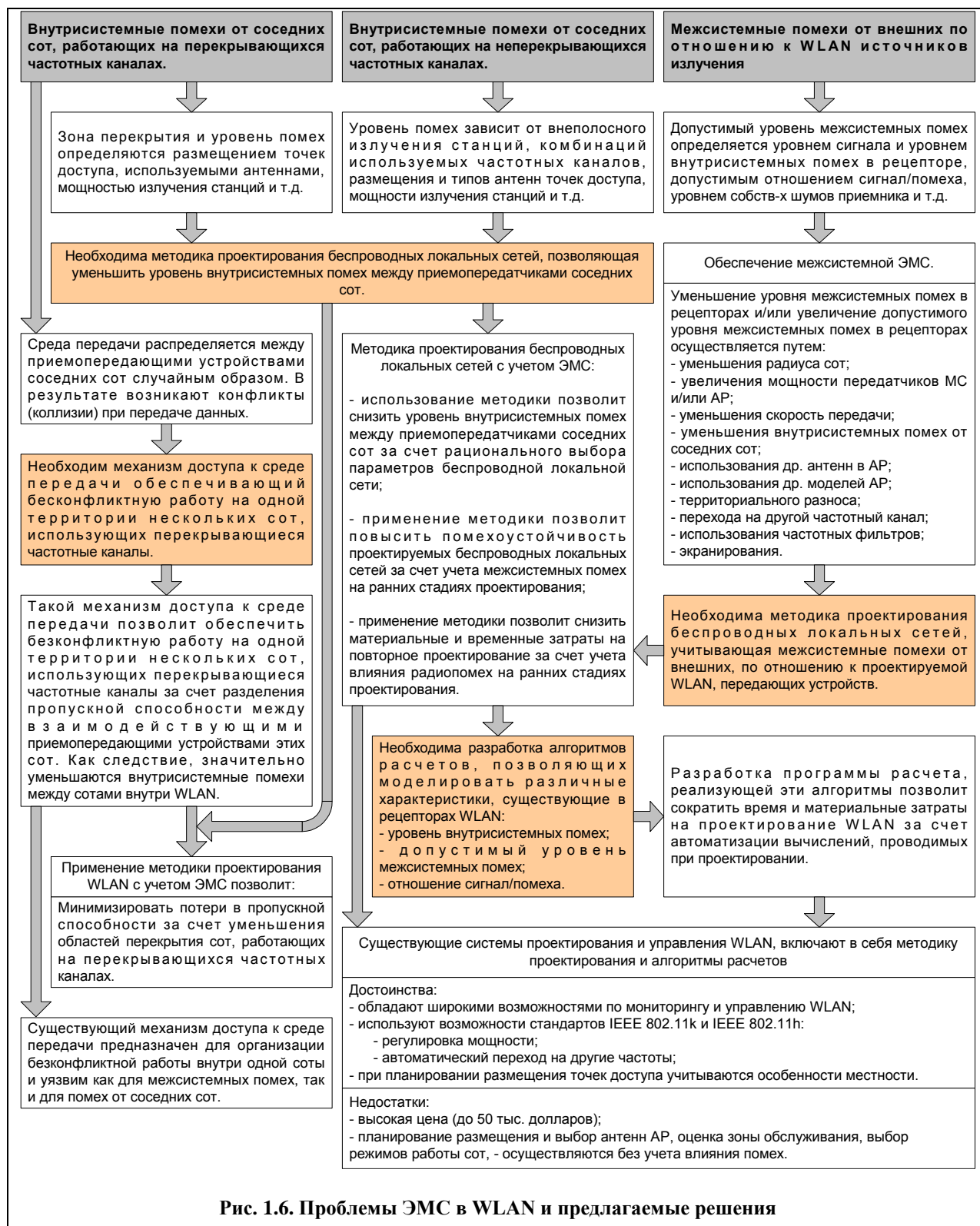


Рис. 1.6. Проблемы ЭМС в WLAN и предлагаемые решения

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие задачи.

1. Проведение анализа характеристик и принципов работы беспроводных локальных сетей, проблем ЭМС и методов их решения, существующих в таких сетях.
2. Разработка алгоритмов работы для механизмов доступа к среде передачи.

3. Разработка методики проектирования беспроводных локальных сетей, учитывающей проблемы ЭМС.
4. Разработка алгоритмов расчетов, позволяющих моделировать различные зависимости, существующие между параметрами WLAN.
5. Реализация разработанных методов и алгоритмов расчетов в программе расчета и их экспериментальная проверка.

Выводы по первой главе

1. Проанализированы области применения, технологии и принципы работы беспроводных локальных сетей, что позволило обозначить “узкие” места этих технологий, на которые необходимо обращать особое внимание при проектировании:
 - проблема скрытого узла;
 - взаимные помехи между соседними сотами (внутрисистемная ЭМС);
 - межсистемные помехи;
 - обеспечение QoS для критичных приложений;
 - расширение беспроводной сети;
 - влияние особенностей местности.
2. Показаны методы, используемые для решения проблем ЭМС в беспроводных локальных сетях и проанализирована их эффективность:
 - механизм доступа к среде передачи;
 - стандарт IEEE 802.11e (QoS);
 - дополнительные стандарты, предназначенные для уменьшения влияния помех (IEEE 802.11 h и k);
 - кодирование и модуляция;
 - системы планирования и управления WLAN (на примере Cisco WCS).
3. Показано, что учет внутрисистемных и межсистемных помех необходимо проводить на ранних стадиях проектирования беспроводных локальных сетей.
4. Сформулирована цель и поставлены задачи диссертационной работы.

Глава 2: ЭМС в беспроводных локальных сетях стандарта 802.11

Под электромагнитной совместимостью РЭС понимается их способность одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных радиопомех, не создавая недопустимых радиопомех другим радиосредствам. Другими словами, ЭМС РЭС - это свойство РЭС функционировать без ухудшения качественных показателей ниже допустимого в заданной электромагнитной обстановке (ЭМО). Под электромагнитной обстановкой будем понимать совокупность электромагнитных полей РЭС различных служб радиосвязи в рассматриваемой области пространства. Оценка ЭМС РЭС является общей задачей и неотъемлемой частью процесса согласования условий совместной работы РЭС. В ходе оценки ЭМС РЭС вырабатываются условия, удовлетворяющие критерию ЭМС в ЭМО. Эти условия могут включать: территориальные ограничения на размещение станции - источника помех; ограничение ЭИИМ станции-источника мешающих сигналов в направлении на станцию, подверженную помехе; защитные полосы и частотные ограничения РЭС; значение необходимого подавления боковых лепестков диаграмм направленности передающей и приёмной антенн; оптимизацию параметров расположения РЭС и ориентации антенн и др.

За критерий обеспечения ЭМС обычно принимают защитное отношение радиоприемника - минимальное допустимое отношение сигнал/радиопомеха на входе приемника, обеспечивающее требуемое качество функционирования в условиях воздействия непреднамеренных радиопомех.

Для решения проблемы ЭМС РЭС используются организационные и технические меры. Технические меры обеспечения ЭМС обусловлены изменением технических параметров РЭС (например, снижение уровней внеполосных и побочных излучений передатчиков, повышение избирательных свойств приемников, снижение уровней боковых лепестков диаграмм направленности антенн и др.). Они достаточно эффективны, но могут быть применимы в основном при разработке новых типов оборудования. Для РЭС, находящихся в эксплуатации, наиболее приемлемыми и действенными мерами обеспечения ЭМС являются организационные меры. Они включают рациональное назначение рабочих частот, сочетаемое с введением частотных, территориальных, временных и пространственных ограничений, накладываемых на РЭС.

В этой главе рассмотрены основные принципы оценки ЭМС радиосистем и сформулированы задачи по оценке ЭМС, которые необходимо решать при проектировании беспроводных локальных сетей. Проанализированы требования

стандартов к характеристикам оборудования, которые необходимо учитывать при обеспечении ЭМС.

2.1. Анализ задач по оценке ЭМС при проектировании беспроводных локальных сетей стандарта 802.11

Конечная цель оценки ЭМС радиосистем – это вычисление отношения сигнал/помеха в приемном устройстве и сравнения его с допустимым значением [6].

Основные шаги при оценке ЭМС включают в себя:

- анализ параметров источников полезного и мешающих сигналов;
- анализ характера трасс распространения между рецептором и источниками полезного и мешающих сигналов;
- анализ параметров рецептора полезного сигнала при одновременном воздействии полезного и мешающих сигналов.

В качестве исходных данных для прогнозирования ЭМС двух радиосистем задаются:

- Параметры всех радиоустройств (приемников и передатчиков), находящихся в пределах возможного помехового воздействия:
 - Частоты полезного и мешающего сигналов;
 - Мощности полезного и мешающего сигналов;
 - Полосы пропускания трактов передатчика и приемника;
 - Уровень внеполосного излучения мешающего передатчика;
 - Потери в фидерах передатчиков и приемника;
 - Взаимная ориентировка антенн передатчиков и приемника;
 - Характеристики антенн (коэффициент усиления, диаграмма направленности, азимут основного лепестка, высота установки);
 - Чувствительность приемника;
 - Защитные отношения в приемнике (допустимое отношение сигнал/помеха).
- Условия распространения электромагнитной волны в свободном пространстве:
 - Координаты установки радиосредств;
 - Высоты установки антенн над уровнем моря;
 - Наличие или отсутствие прямой видимости между источниками и рецепторами;
 - Характеристики окружающей местности (тип местности, рельеф, климатические условия).

На основе полученных данных проводятся расчеты затухания сигнала и помехи. ЭМС обеспечивается, если уровень помехи не превышает допустимого уровня.

Оценка потерь на трассе распространения

Потери на трассе распространения в открытом пространстве L вычисляются следующим образом [6]:

$$L = 20 \cdot \lg(4 \cdot \pi \cdot l \cdot f \cdot 10^6 / c), \text{ дБ}; \quad (2.1)$$

где f – частота сигнала, МГц;

$c = 300\,000\,000$ - скорость света, м/с;

$l = \sqrt{d^2 + (h_1 - h_2)^2}$ – расстояние между приемником и передатчиком, м;

d – расстояние между приемником и передатчиком в горизонтальной плоскости, м;

h_1 и h_2 - высоты установки антенн передатчика и приемника, м.

Высота расположения антенн МС, как правило, определяется высотой столов (рабочих мест), на которых располагаются абонентские МС. Среднее значение высоты расположения антенн МС принимается равным 1 м.

Формулу (2.1) можно привести к следующему виду:

$$L = 20 \lg(4 \cdot \pi) + 20 \lg(l) + 20 \lg(f) + 20 \lg 10^6 - 20 \lg(c);$$

$$L = 21,984 + 20 \lg(l) + 20 \lg(f) + 120 - 169,542;$$

$$L = 20 \lg(l) + 20 \lg(f) - 27,558. \quad (2.2)$$

Рассмотрим разницу в потерях на трассе распространения, между первым и 14-м частотным каналом в диапазоне 2,5 ГГц. В случае прямой видимости, потери на распространение вычисляются следующим образом:

$$L = 20 \cdot \lg(4 \cdot \pi \cdot l \cdot f \cdot 10^6 / c), \text{ дБ};$$

$$\Delta L = L_{14} - L_1 = 20 \cdot \lg(4 \cdot \pi \cdot l \cdot 10^6 / c) + 20 \lg f_{14} - 20 \cdot \lg(4 \cdot \pi \cdot l \cdot 10^6 / c) - 20 \lg f_1;$$

$$\Delta L = 20 \lg f_{14} - 20 \lg f_1 = 20 \lg \left(\frac{f_{14}}{f_1} \right);$$

где ΔL - разница в потерях на трассе распространения, между 1-м и 14-м частотным каналом, дБ;

f_1 и f_{14} - центральные частоты 1-го и 14-го частотных каналов, МГц.

Значение центральной частоты для первого канала $f_1 = 2412$ МГц, для 14-го канала $f_{14} = 2484$ МГц. Соответственно, $\Delta L = 20 \lg(2484 / 2412) = 0,26$ дБ. Этой разницей можно пренебречь. Расчет зон обслуживания следует вести для седьмого частотного канала, находящегося в центре частотного диапазона ($f_7 = 2442$ МГц):

$$L = 20 \log(l) + 20 \log(f_7) - 27,558 = 20 \log(l) + 20 \log(2442) - 27,558;$$

$$L = 40,2 + 20 \log(l). \quad (2.3)$$

Для оценки дополнительных затуханий на трассе используется следующая зависимость:

$$A_{\text{доп.}} = \sum A_{i-\text{доп.}}; \quad (2.4)$$

где $A_{\text{доп.}}$ - дополнительные потери на трассе распространения, дБ: потери на препятствиях, стенах или листве деревьев и т.д. ;

$A_{i-\text{доп.}}$ - дополнительные потери на трассе распространения от i -го препятствия, дБ.

Модели и табличные значения для вычисления затухания сигналов на различных типах препятствий показаны в приложениях.

Вычисление суммарного уровня помех в рецепторе

Помехи от разных мешающих передатчиков могут приходить в фазе или противофазе. В этом случае они будут складываться или компенсировать друг друга. Для оценки ЭМС рассматривается худший случай, в котором помехи складываются.

В рецепторах WLAN действует набор из нескольких помех:

- собственный шум приемника;
- помехи от соседних сот;
- межсистемные помехи от функционирующих поблизости радиосистем.

При проектировании необходимо учитывать все перечисленные виды помех.

Суммарный уровень помех вычисляется следующим образом:

$$\begin{aligned} a_i &= b + c_i; & a_i &= 10 \lg P_i; & P_i &= 10^{\frac{a_i}{10}}; & P_{\Sigma} &= \sum_i P_i; \\ a_{\Sigma} &= 10 \lg P_{\Sigma} = 10 \lg \left(\sum_i P_i \right) = 10 \lg \left(\sum_i 10^{\frac{a_i}{10}} \right) = 10 \lg \left(\sum_i 10^{\frac{b+c_i}{10}} \right); \\ a_{\Sigma} &= 10 \lg \left(\sum_i \left[10^b \cdot 10^{\frac{c_i}{10}} \right] \right) = 10 \lg \left(10^b \cdot \sum_i \left[10^{\frac{c_i}{10}} \right] \right) = 10 \lg 10^b + 10 \lg \left(\sum_i \left[10^{\frac{c_i}{10}} \right] \right); \\ a_{\Sigma} &= b + 10 \lg \left(\sum_i \left[10^{\frac{c_i}{10}} \right] \right); \end{aligned} \quad (2.5)$$

где a_i - уровень i -й помехи, дБм;

c_i - индивидуальная составляющая i -й помехи, дБм;

b - составляющая, одинаковая для всех помех, дБм;

P_i - уровень i -й помехи, мВт;

P_{Σ} - суммарный уровень помех, мВт;

a_{Σ} - суммарный уровень помех, дБм.

В случае, когда складываются помехи с одинаковым уровнем, то $a_{\Sigma} = a_i + 10 \lg n$, где n – число таких помех.

Оценку вклада помехи в суммарный уровень помех можно оценить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 10 \lg P_1 = a_1 = \lg 10^{a_1}; \quad 10 \lg P_2 = a_2 = \lg 10^{a_2}; \\
 \lg P = \frac{\lg 10^a}{10} = \lg 10^{\frac{a}{10}}; \quad P = 10^{\frac{a}{10}}; \\
 a_{\Sigma} = 10 \lg(P_1 + P_2) = 10 \lg(10^{\frac{a_1}{10}} + 10^{\frac{a_2}{10}}) = 10 \lg \left[\left(\frac{10^{\frac{a_1}{10}}}{10^{\frac{a_2}{10}}} + 1 \right) \cdot 10^{\frac{a_2}{10}} \right] = 10 \lg 10^{\frac{a_2}{10}} + 10 \lg \left(\frac{10^{\frac{a_1}{10}}}{10^{\frac{a_2}{10}}} + 1 \right); \\
 a_{\Sigma} = a_2 + 10 \lg \left(10^{\frac{a_1 - a_2}{10}} + 1 \right); \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

где a_1 – меньшая по уровню из двух складываемых помех, дБм;

a_2 – большая по уровню из двух складываемых помех, дБм;

a_{Σ} - суммарный уровень двух помех, дБм;

P_1 и P_2 - складываемые уровни помех, мВт.

На рис. 2.1 показан график зависимости $f(\Delta = a_2 - a_1) = a_{\Sigma} - a_2$.

При сложении двух синусоидальных сигналов одинаковой частоты разность в фаз нескольких одновременно пришедших в рецептор мешающих сигналов можно учесть следующим образом:

$$P_{\Sigma} = |P_0 \cdot \cos(\varphi_0) + P_1 \cdot \cos(\varphi_1) + P_2 \cdot \cos(\varphi_2) + \dots + P_N \cdot \cos(\varphi_N)|; \quad (2.7)$$

где P_{Σ} - суммарный уровень помех, мВт;

P_0, P_1, \dots, P_{N-1} - уровни суммируемых помех, мВт;

N - число помех в рецепторе, шт.;

$\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{N-1} = 0^\circ \dots 360^\circ$ - фазовые сдвиги соответствующих помех, градусов.

Если задана вероятность (ν) того, что суммарная помеха не превысит некоторое предельное значение и необходимо посчитать это предельное значение ($P_{пред.}$), можно воспользоваться предлагаемым методом.

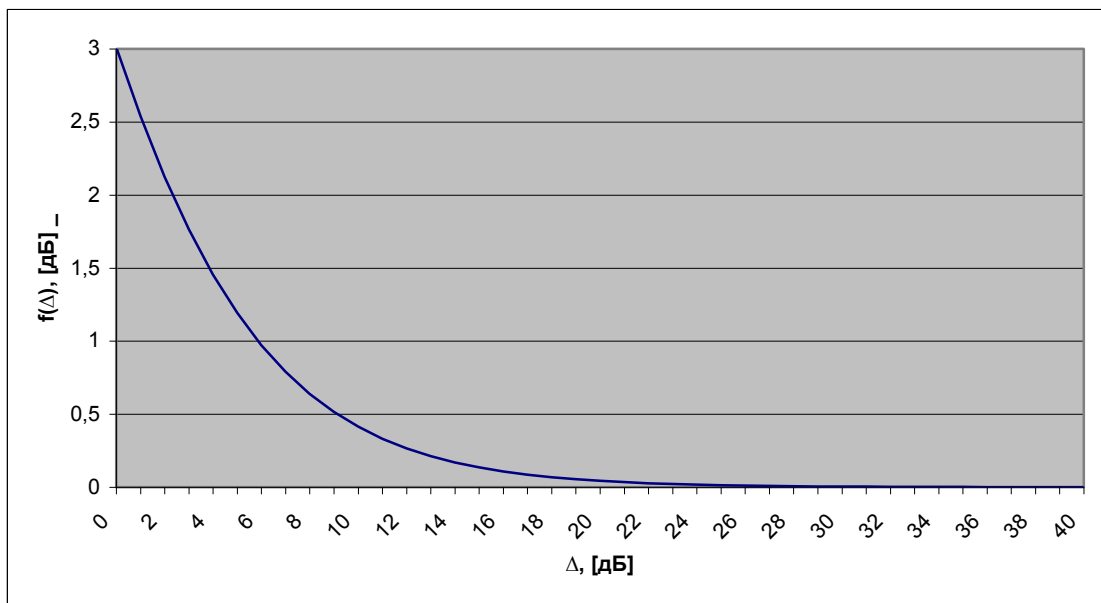


Рис. 2.1. Увеличение уровня суммарной помехи при сложении двух помех

Диапазон значений $\varphi = 0^\circ \dots 360^\circ$ разбивается на k одинаковых отрезков. Попадание фазового сдвига помехи в любой из таких отрезков – равновероятное событие. Фазовый сдвиг помехи может попадать только в один из таких отрезков, т.е. события являются несовместимыми. Функция $\cos(\varphi)$ представляется набором точек, каждая из которых размещена в центре соответствующего отрезка. Таким образом число значений, которое может принимать $P_\Sigma(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_N)$ получается равным k^N . Вероятность появления каждой комбинации равна $1/k^N$. Максимальное значение $P_{max} = P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_N$ достигается при $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \dots = \varphi_N = 0^\circ$, либо при $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \dots = \varphi_N = 180^\circ$. Минимальное значение равно 0 мВт.

Диапазон значений $0 \leq P_\Sigma \leq P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N$ разбивается на m отрезков (они необязательно должны быть равны). Границами первого отрезка будут значения $p_0 = 0 \leq P_\Sigma \leq p_1$; границами второго отрезка $p_1 < P_\Sigma \leq p_2$; и т.д. Границами последнего отрезка будут значения $p_{m-1} < P_\Sigma \leq p_m = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N$. Если для каждого такого отрезка рассчитывается число комбинаций (u_j), при которых значение $P_\Sigma(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_N)$ попадает в этот отрезок. По результатам вычислений можно нарисовать функцию распределения вероятности уровня суммарной помехи на отрезке $0 \leq P_\Sigma \leq P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N$.

Площадь (S), которую ограничивает график функции распределения вероятности на отрезке $0 \leq P_\Sigma \leq P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N$, равна 1. Значение $P_{пред.}$ разделяет график

функции распределения вероятности на две части: площадь одной части (отрезок $0 \leq P_{\Sigma} < P_{пред.}$) равна ν ; площадь другой части (отрезок $P_{пред.} < P_{\Sigma} \leq P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N$) равна $1 - \nu$.

Площадь функции распределения вероятности, ограниченная j -м отрезком (S_j) будет равна:

$$S_j = (P_j - P_{j-1}) \cdot u_j \cdot k^{-N}. \quad (2.8)$$

Последовательно суммируя площади S_j , начиная с $j = m$, затем $j = m - 1$ и т.д., находим максимальное значение $j = x$, при котором $\sum_{j=x}^m S_j \leq 1 - \nu$. Значение $P_{пред.}$ будет равно p_x . Точность расчетов увеличивается при увеличении значений k и m .

На рис. 2.2 представлен разработанный алгоритм расчета суммарного уровня помех для метода, позволяющего учесть разницу фаз мешающих сигналов, пришедших в рецептор.

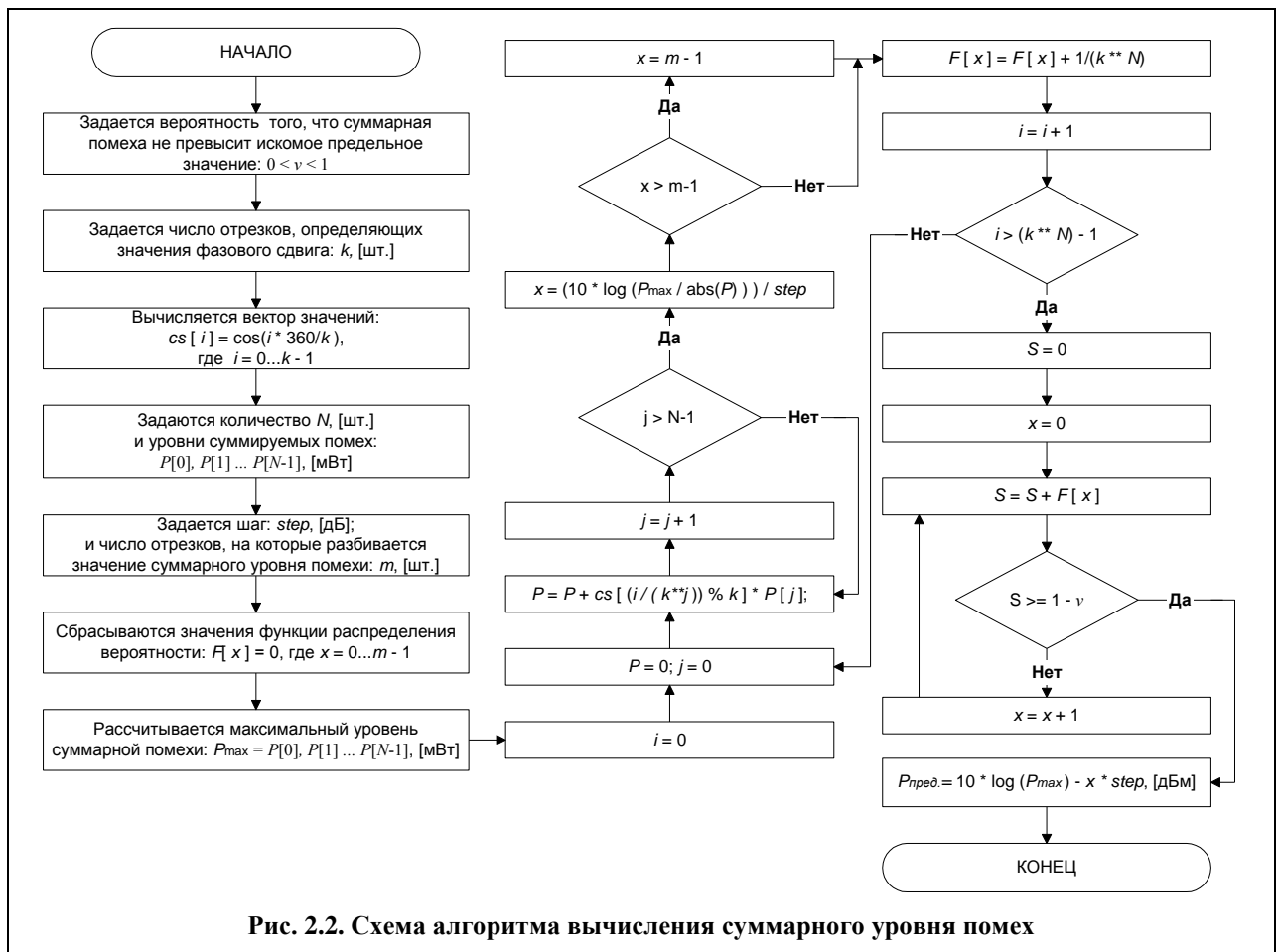
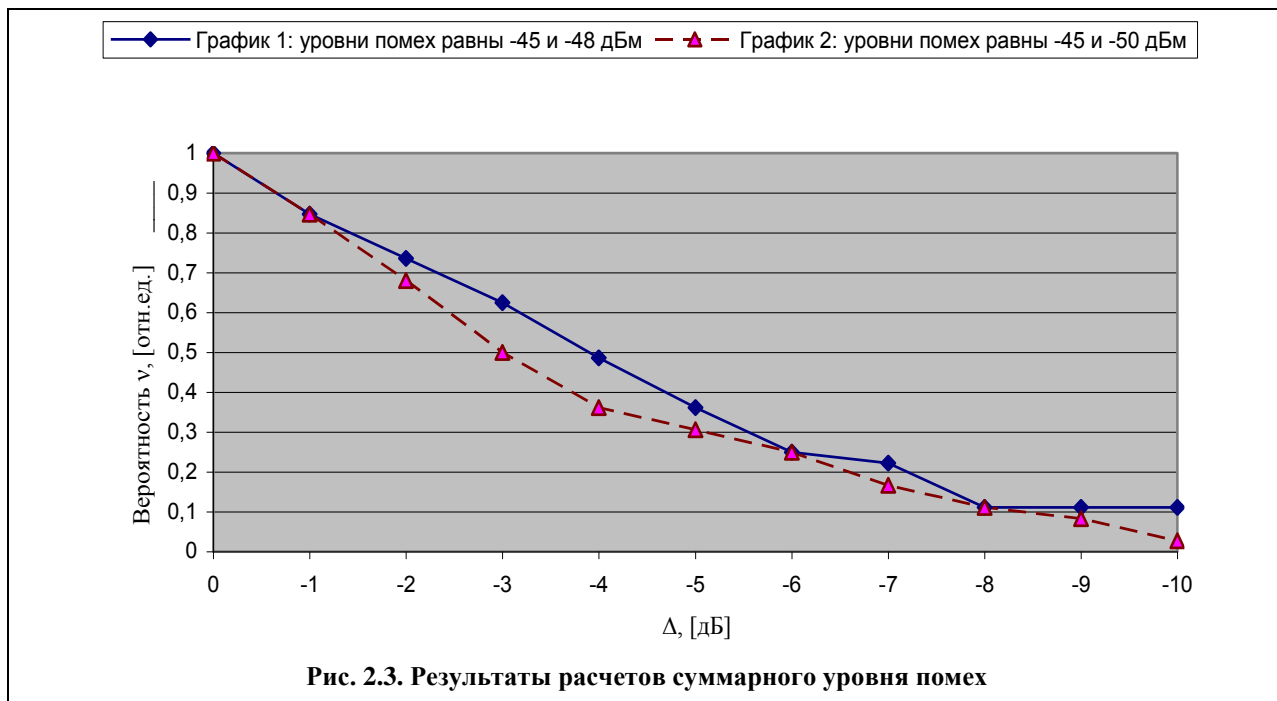


Рис. 2.2. Схема алгоритма вычисления суммарного уровня помех

По предложенному алгоритму был проведен расчет для следующих исходных данных:

- график 1: уровни помех равны: -45 дБм и -48 дБм; максимальный уровень суммарной помехи равен -43,2 дБм; $k = 6$; $step = 1$ дБ.
- график 2: уровни помех равны: -45 дБм и -50 дБм; максимальный уровень суммарной помехи равен -43,8 дБм; $k = 6$; $step = 1$ дБ.

Результаты расчетов показаны на рис. 2.3 в виде графиков, где $P_{пред.} = P_{max} - \Delta$, дБм.



Поскольку мешающие сигналы, могут воздействовать на приемник на разных участках спектра, то точную оценку суммарного уровня помех можно провести, сложив (как показано выше) отдельные спектральные составляющие всех мешающих сигналов.

Задачи по оценке ЭМС в беспроводных локальных сетях стандарта 802.11

При оценке ЭМС прежде всего необходимо определить источники и рецепторы сигнала. Трафик в беспроводной сети передается между МС и АР. Источником или рецептором сигнала может быть точка доступа или мобильная станция. Антенна точки доступа имеет фиксированное расположение, которое не меняется со временем. МС может располагаться в любом месте соты. Наибольшие потери распространения будут, скорее всего, между точкой доступа и наиболее удаленной от нее МС. Оценка ЭМС сводится, соответственно, к двум задачам:

- определение уровня сигнала и помехи в граничной МС, наиболее удаленной от точки доступа (с наибольшими потерями);

- определение уровня сигнала, переданного наиболее удаленной МС (с наибольшими потерями), и уровня помех в АР.

Трасса распространения сигнала от АР к МС называется прямой, от МС к АР обратной.

При оценке внутрисистемной ЭМС в WLAN необходимо определить источники помех. Механизм доступа к среде передачи определяет, что в одной соте может излучать только один передатчик: точка доступа или мобильная станция. Следовательно, помехой от соседней соты может быть или АР или МС. Расположение точки доступа зафиксировано, а МС может находиться в любом месте соты. В худшем случае, который и следует учитывать при оценке ЭМС, МС будет располагаться на расстоянии, максимально близком к рецептору. Уровень помехи от соседней соты в рецепторе следует считать равным максимальной из двух возможных помех: от АР или ближайшей МС соседней соты. Если соседних сот несколько, то и помех тоже будет несколько.

В диапазоне 2,4ГГц наиболее часто межсистемные радиопомехи создаются другими беспроводными локальными сетями. В табл. 2.1 представлены параметры различных беспроводных устройств.

Табл. 2.1. Основные характеристики межсистемных радиопомех от устройств стандартов 802.11x, Bluetooth, HomeRF и HiperLAN2⁴⁴

	802.11	802.11b	802.11g	802.11a	Bluetooth	HomeRF	Hiper-LAN2
Дата принятия	Июнь 1997	Сентябрь 1999	Ноябрь 2001	Сентябрь 1999	Февраль 2001 (v.1.1.)	Март 2001 (v.2.0.)	Февраль 2000
Диапазон частот, ГГц	2,400-2,4835	2,400-2,4835	2,400-2,4835	5,15-5,25 5,25-5,35 5,725-5,825	2,400-2,4835	2,400-2,4835	5,15-5,35 5,470-5,725
Метод доступа	DSSS, FHSS	DSSS	PBCC, CCK, OFDM	OFDM	FHSS	WBFH	OFDM
Доступная полоса частот, МГц	83	83	83	300	83	83	455
Скорости передачи, Мбит/с	1, 2	5,5; 11	33 PBCC 54 OFDM	54	0,721 (V1.1) 10,0 (V 2.0)	от 1,6 (1.0) до 20 (2.0))	54
Дальность действия, м	100-300	100-300	100	50	10	50	150
Макс. выходная мощность, мВт	100	100	100	50 - нижний диапазон	1 (класс 3)	100	200 (1) 1000 (2)
				250 - средний диапазон	2,5 (класс 2)		
				1Вт – верхний диапазон	100 (класс 1)		

⁴⁴ По материалам статьи «Технологии WLAN», Ростислав Сергеев, <http://www.bytemag.ru/>

2.2. Анализ технических требований к оборудованию WLAN

В этом разделе показаны и проанализированы требования к оборудованию WLAN.

Передатчики

Одной из важнейших характеристик радиостанции является мощность ее передатчика. Выходная мощность измеряется в линии передачи, кабеле или антенне и обычно указывается в ваттах (Вт) или милливаттах (мВт). Для сравнения мощностей применяется логарифмическая шкала. Отношение мощностей измеряется в децибелах (дБ). Производители радиостанций указывают их мощность в дБм, т.е. в децибелах по отношению к мощности в 1 мВт, или в дБВ, т.е. в децибелах по отношению к мощности 1 Вт. Другой важной характеристикой передатчика является его АЧХ. Она определяет уровень внеполосного излучения, создаваемого передатчиком.

Приемники

Радиоприемники характеризуются, прежде всего, их чувствительностью, которая определяется как минимальный уровень сигнала, при котором приемник способен удовлетворительно декодировать информацию. Порог приемлемости определяется частотой появления ошибочных битов (BER), частотой появления ошибочных пакетов (packet error rate, PER) или частотой появления ошибочных фреймов (frame error rate, FER). Например, стандарт 802.11a, при скорости передачи данных 54 Мбит/с и PER, составляющей 10%, указывает минимально приемлемую чувствительность приемника равной⁴⁵ -65 дБм.

Чувствительность приемника радиостанции зависит от уровня собственного шума приемника. Поскольку каждая схема модуляции имеет свои требования к отношению сигнал/шум (SNR), чувствительность приемника указывается для конкретной скорости передачи. В общем случае, чем выше скорость передачи данных, тем больше уровень собственного шума приемника и требуемое отношение сигнал/шум. Следовательно, чувствительность приемника уменьшается.

Диапазон 2,400 - 2,483 ГГц

В России разрешено использование данного частотного диапазона для построения беспроводных сетей как внутри помещений, так и вне их с максимальной выходной мощностью передатчика до 1 Вт. В настоящий момент диапазон практически исчерпан в городах для построения сетей вне помещений. Однако, для построения сетей в зданиях он подходит как нельзя лучше, в основном за счет наибольшей зоны покрытия (на одинаковой площади точек доступа придется ставить меньше, чем, например, в диапазоне

⁴⁵ Стандарт IEEE 802.11a [4]

5 ГГц). При построении беспроводных сетей в помещениях для диапазона 2,4 ГГц не нужно оформлять лицензию. При этом ЭИИМ (эффективная изотропно-излучаемая мощность) любой РЭС офисной системы беспроводной передачи данных не должна превышать **100 мВт**. Также рекомендуется использовать диапазон 2,4 ГГц, для построения сетей в областях, вне крупных населенных пунктов. Основная причина та же, - дальность связи до 50 км и больше, с применением внешних усилителей. Кроме того, оборудование для этого диапазона выпускается давно, представлено большим количеством производителей, и стоит относительно недорого.

В соответствии с действующим законодательством, регламентирующим порядок использования радиочастотного ресурса в России, можно выделить три типа оборудования беспроводного доступа. Для каждой из групп характерны свои особенности использования радиочастотного ресурса в полосе частот 2400-2483,5 МГц и свой порядок получения разрешительных документов.

- Внутриофисные системы беспроводной передачи данных:
 - Решение ГКРЧ от 29 октября 2001 года (протокол № 13/2).
 - Решение ГКРЧ № 04-03-04-003 от 6 декабря 2004 года, об использовании полосы радиочастот 2400-2483,5 МГц для внутриофисных систем передачи данных. Для внутриофисных систем действует упрощенный порядок.
 - Решение ГКРЧ № 05-05-05-110 от 04.04.2005, о внесении в текст приложения №2 к решению ГКРЧ № 04-03-04-003 от 06.12.2004 РЭС стандарта 802.11g.
- Уличные операторские сети беспроводной передачи данных:
 - Решение ГКРЧ от 25 сентября 2000 г. (протокол № 2/7);
 - Для уличных операторских сетей действует частично-упрощенный порядок.
- Bluetooth:
 - Решение ГКРЧ от 31 марта 2003 года (протокол № 25/2);
 - Для Bluetooth действует безлицензионный порядок.

Диапазон 5,150-5,20 и 5,250-5,350 ГГц

В России эти два диапазона рассматриваются как для построения WLAN внутри помещений (по стандарту IEEE 802.11a), так и для развертывания территориально распределенных сетей масштаба города. Для их использования необходимо получение лицензии.

В диапазоне 5 ГГц порядок назначения радиочастот одинаковый как для уличных операторских сетей, так и для внутриофисных сетей беспроводной передачи данных.

Действующие решения ГКРЧ:

- Решение ГКРЧ от 30 июля 2001 года (протокол № 11/1).
- Решение ГКРЧ от 23 декабря 2002 года (протокол № 23/5).

Порядок регистрации РЭС описан в постановлении Правительства Российской Федерации от 12 октября 2004 г. № 539 "О порядке регистрации радиоэлектронных средств и высокочастотных устройств".

Требования стандарта IEEE 802.11 к устройствам, использующим технологию DSSS

В табл. 2.2 представлены частотные каналы WLAN диапазона 2,4 ГГц, использующих технологию DSSS, и указано, в каких странах какие из них используются.

Табл. 2.2. Частотные каналы используемые сетями 802.11, работающими по технологии DSSS⁴⁶

Номер канала	Основная частота	Частотные каналы					
		FCC (США)	ETSI (Европа)		Сингапур	Япония	Израиль
			Россия и др. страны	Франция ⁴⁷			
1	2412 МГц	X	X	X	-	X	-
2	2417 МГц	X	X	X	-	X	-
3	2422 МГц	X	X	X	-	X	X
4	2427 МГц	X	X	X	-	X	X
5	2432 МГц	X	X	X	-	X	X
6	2437 МГц	X	X	X	-	X	X
7	2442 МГц	X	X	X	-	X	X
8	2447 МГц	X	X	X	-	X	X
9	2452 МГц	X	X	X	-	X	X
10	2457 МГц	X	X	X	X	X	-
11	2462 МГц	X	X	X	X	X	-
12	2467 МГц	-	X	X	X	X	-
13	2472 МГц	-	X	X	X	X	-
14	2484 МГц	-	-		-	X	-

Минимальный уровень передаваемой мощности должен быть не меньше⁴⁸ 1 мВт. Для стран, применяющих правила ETSI, Европейский стандарт на телекоммуникации

⁴⁶ Стандарт IEEE 802.11, IEEE 802.11b [1, 2, 3]

⁴⁷ Каналы 1...9 можно использовать, с максимальным уровнем EIRP, равным 10 дБм

⁴⁸ Стандарт IEEE 802.11 [1]

(European Telecommunications Standard, ETS) EIRP ограничивается уровнем⁴⁹ 100 мВт (20 дБм).

Относительно центральной частоты, спектральные составляющие излучаемого сигнала должны иметь уровень⁵⁰ менее -30 дБ на частотах, отстоящих от несущей на 11 МГц, и менее -50 дБ на частотах, отстоящих от несущей более чем на 22 МГц. На рис. 2.4 показана спектральная маска сигнала, регламентируемая стандартом 802.11.



Для скорости работы 2 Мбит/с (DQPSK-модуляция), должно обеспечиваться $\text{FER} \leq 8 \cdot 10^{-2}$ при MPDU длиной 1024 байт для входного уровня сигнала -80 дБм, измеренного в соединителе антенны⁵². Соответственно, чувствительность при этих условиях должна быть меньше либо равна -80 дБм.

Также приемник должен обеспечить $\text{FER} \leq 8 \cdot 10^{-2}$ для MPDU длиной 1024 байта, для максимального входного уровня сигнала -4 дБм, измеренного в антенне (для 2 Мбит/с, DQPSK-модуляция)⁵³.

В выделенном диапазоне можно разместить 3 неперекрывающихся канала⁵⁴. Расстояние между центральными частотами двух неперекрывающихся каналов больше либо равно⁵⁵ 30 МГц. Стандарт требует, чтобы приемник обеспечивал работу при уровне помехи от соседнего канала, превышающем уровень сигнала не более чем на 35 дБ (при соблюдении требований к спектральной маске, определенных стандартом)⁵⁶.

Следует обратить внимание, что в стандарте 802.11b, неперекрывающийся канал — это канал, с центральной частотой отличающейся не менее, чем на 25 МГц. А в стандарте

⁴⁹ Стандарт IEEE 802.11 [1]

⁵⁰ Стандарт IEEE 802.11 [1]

⁵¹ Стандарт IEEE 802.11 [1]

⁵² Стандарт IEEE 802.11 [1]

⁵³ Стандарт IEEE 802.11 [1]

⁵⁴ Стандарт IEEE 802.11 [1]

⁵⁵ Стандарт IEEE 802.11 [1]

⁵⁶ Стандарт IEEE 802.11 [1]

802.11 DSSS на 30 МГц. Тем не менее, общепринято считать разницу между центральными частотами соседних неперекрывающихся каналов 25 МГц.

Требования стандарта IEEE 802.11b

Требования к передатчику (уровни мощности и спектральная маска) предъявляются такие же, как для технологии DSSS в стандарте 802.11.

Для скорости работы 11 Мбит/с (ССК-модуляция), должно обеспечиваться $FER \leq 8 \cdot 10^{-2}$ при PSDU длиной 1024 октета для входного уровня сигнала -76 дБм, измеренного в соединителе антенны⁵⁷. Соответственно, чувствительность при этих условиях должна быть меньше либо равна -76 дБм.

Также приемник должен обеспечить $FER \leq 8 \cdot 10^{-2}$ для PSDU длиной 1024 октета, для максимального входного уровня сигнала -10 дБм, измеренного в антенне (для 11 Мбит/с, ССК-модуляция).

Расстояние между основными частотами двух неперекрывающиеся каналов больше либо равно 25 МГц. Стандарт требует, что бы приемник обеспечивал работу при уровне помехи от соседнего канала, превышающем уровень сигнала не более чем на 35 дБ (при соблюдении требований к спектральной маске, определенных стандартом).

Требования стандарта IEEE 802.11a

Частоты диапазона U-NII доступны в основном в США и странах, которые приняли правила использования спектра FCC-типа. Диапазон U-NII 1 простирается от 5,15 до 5,25 ГГц, диапазон U-NII 2 непосредственно граничит с ним и простирается от 5,25 до 5,35 ГГц, а диапазон U-NII 3 занимает участок 5,725-5,825 ГГц [7]. Нумерация каналов начинается с отметки 5,000 ГГц, и номер канала увеличивается на 1 через каждые 5 МГц. Подобный способ обозначения дает схему нумерации каналов, позволяющую охватить все частоты всего диапазона 5 ГГц, которые когда-либо будут использованы в WLAN. На рис. 2.5 представлены неперекрывающиеся каналы диапазонов U-NII 1, U-NII 2 и U-NII 3. Центральные частоты (диапазонов U-NII 1 и 2) крайних каналов отстоят на 30 МГц от граничных частот диапазона. Центральные частоты диапазона U-NII 3 отстоят лишь на 20 МГц от граничных частот диапазона. Этот факт важно помнить при рассмотрении требований к побочному радиоизлучению и спектральной маске для этого диапазона, потому что выполнять их разработчикам радиотракта сложнее, чем аналогичные требования нижних диапазонов.

⁵⁷ Стандарт IEEE 802.11 [1]

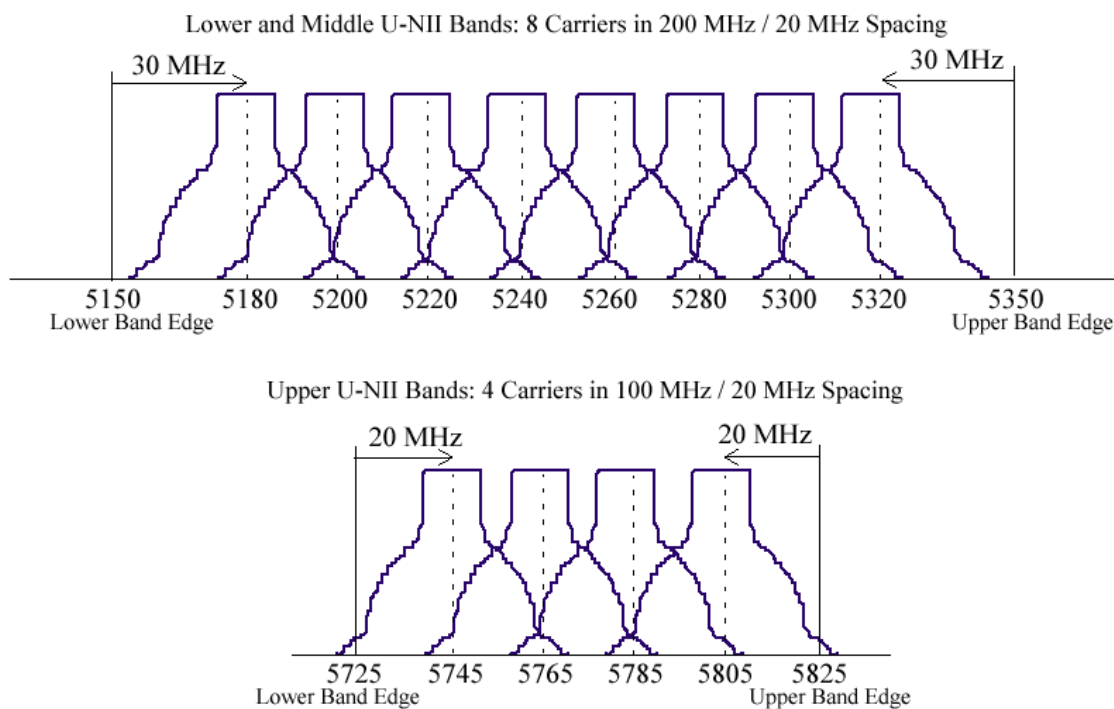


Рис. 2.5. Каналы диапазонов U-NII 1, U-NII 2 и U-NII 3⁵⁸

При применении внешних антенн необходимо иметь информацию о требованиях, предъявляемых к спектральной маске и побочному радиоизлучению. Когда производители сертифицируют свои радиостанции и антенны на предмет соответствия требованиям FCC⁵⁹ они задают уровни, базируясь не только на пределах EIRP, но также на ограничениях, обусловленных этой спектральной маской. Коэффициент усиления антенны и уровни мощности необходимо приводить в соответствие с требованиями спектральной маски.

Три диапазона U-NII имеют различные ограничения на мощность излучения. U-NII 1 предназначен для использования устройствами, рассчитанными на работу только в помещениях, при наименьших уровнях излучения. Диапазон U-NII 3 имеет наивысшие уровни, потому что он предназначен для устройств, работающих вне помещений и на больших расстояниях. В диапазонах U-NII установлены следующие ограничения на излучаемую мощность:

- В диапазоне U-NII 1 можно использовать передатчик мощностью до 40 мВт, 16 дБм и антенну с коэффициентом усиления до 6 дБи при максимуме EIRP, составляющем 22 дБм [7]. Кроме того, при каждом повышении

⁵⁸ Стандарт IEEE 802.11a [4]

⁵⁹ Federal Communications Commission, <http://www.fcc.gov/>

коэффициента усиления антенны на 1 дБ выше 6 дБи излучаемая мощность должна быть снижена на 1 дБ [7].

- В диапазоне U-NII 2 можно использовать передатчик мощностью до 200 мВт, 23 дБм и антенну с коэффициентом усиления до 6 дБи при максимуме EIRP, составляющем 29 дБм [7]. Кроме того, при каждом повышении коэффициента усиления антенны на 1 дБ выше 6 дБи излучаемая мощность должна быть снижена на 1 дБ [7].
- В диапазоне U-NII 3 можно использовать передатчик мощностью до 800 мВт, 29 дБм и антенну с коэффициентом усиления до 6 дБи при максимуме EIRP, составляющем 35 дБм [7]. Кроме того, при каждом повышении коэффициента усиления антенны на 1 дБ выше 6 дБи излучаемая мощность должна быть снижена на 1 дБ [7]. При работе в диапазоне U-NII 3 можно использовать антенну на 23 дБи без снижения мощности передатчика, но только в фиксированных каналах типа "точка-точка" [7]. При таких условиях максимум EIRP может составлять 52 дБм.

Стандарт 802.11a определяет спектральную маску для передачи в диапазонах U-NII. Передаваемый спектр должен быть на уровне 0 дБ по отношению к максимуму спектральной плотности сигнала вплоть до максимальной ширины полосы частот 18 МГц, а затем он должен быть меньше -20 дБ "на расстоянии" 11 МГц от центральной частоты, -28 дБ на частотах, отстоящих от центральной на 20 МГц, и -40 дБ для частот, отстоящих от центральной на 30 МГц и более [4]. Эта спектральная маска показана на рис. 2.6.

Аналогично 802.11b, стандарт 802.11a также определяет минимально допустимые параметры радиостанции. В табл. 2.3 приведены минимальная чувствительность приемника, допустимое превышение уровня помехи от соседнего канала (разница в центральных частотах не менее 20 МГц) над уровнем сигнала и допустимое превышение уровня перекрестной помехи от соседнего канала (разница в центральных частотах не менее 30 МГц) над уровнем сигнала (alternate adjacent channel rejection) на соединителе антенны для скоростей передачи данных стандарта 802.11a при PER менее 10% и длине PSDU 1000 байт.

Приемник должен обеспечить максимум $PER = 10\%$ для PSDU длиной 1000 байт, для максимального входного уровня сигнала -30 дБм, измеренного в антенне (для любой модуляции) [4].

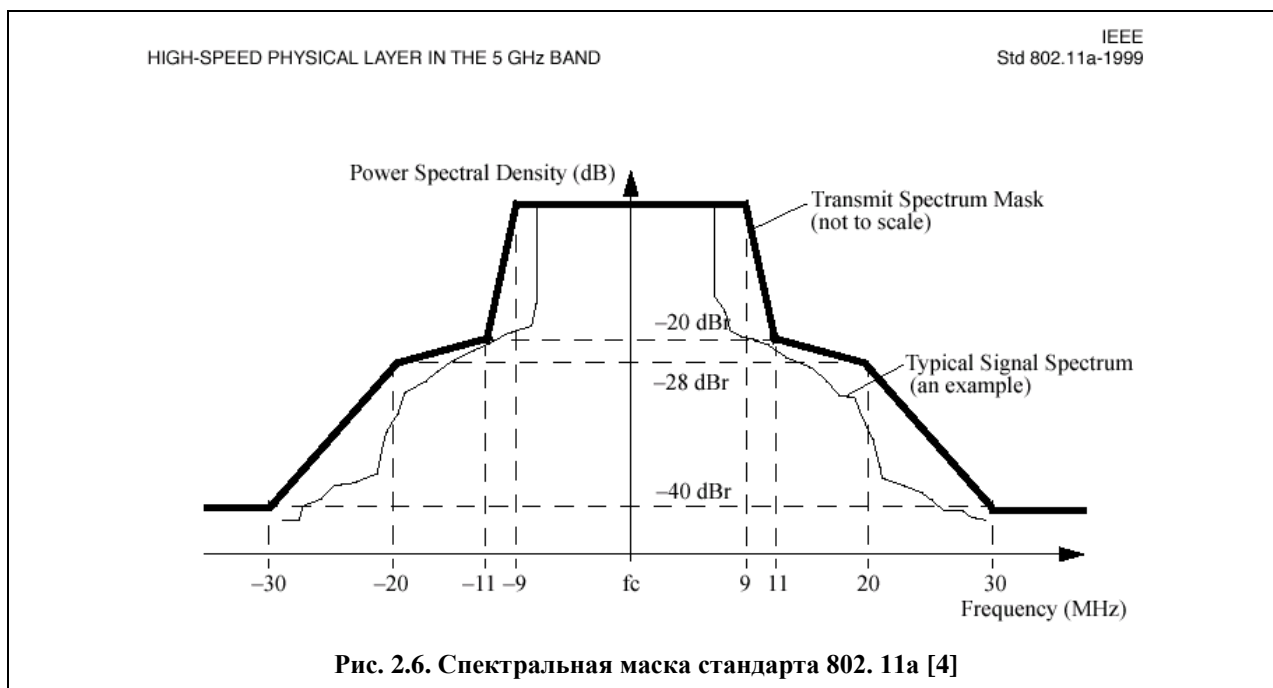


Табл. 2.3. Минимально допустимые характеристики радиостанции стандарта 802.11a⁶⁰

Скорость передачи данных (Мбит/с)	Минимальная чувствительность (дБм)	Допустимое превышение уровня помехи от соседнего канала (разница в частотах не менее 20 МГц)	Допустимое превышение уровня перекрестной помехи от соседнего канала (разница в центральных частотах не менее 30 МГц)
6	-82	16	32
9	-81	15	31
12	-79	13	29
18	-77	11	27
24	-74	8	24
36	-70	4	20
48	-66	0	16
54	-65	-1	15

Требования стандарта IEEE 802.11g

Оборудование этого стандарта использует ту же полосу частот и те же частотные каналы, что и стандарт 802.11b. Максимальный уровень излучаемой мощности ограничен регулируемыми органами и для России составляет EIRP = 100 дБм.

Требования к спектральной маске определяются используемой модуляцией. Для режимов ERP-OFDM используется спектральная маска стандарта 802.11a, для режимов ERP-DSSS и ERP-PBCC спектральная маска стандарта 802.11b.

В режимах ERP-DSSS минимальная чувствительность определяется так же, как и для стандарта 802.11b [5].

Для скорости работы 22 Мбит/с (ERP-PBCC -модуляция) при PSDU длиной 1024 октета, $FER \leq 8 \cdot 10^{-2}$ для входного уровня сигнала -76 дБм, измеренного в соединителе антенны. Соответственно, чувствительность при этих условиях должна быть меньше либо

⁶⁰ Стандарт IEEE 802.11a [4]

равна -76 дБм [5]. Для работы на скорости 33 Мбит/с (ERP-PBCC -модуляция) минимальная чувствительность равна -74 дБм [5].

Соседние каналы определены, как отстоящие друг от друга на 25 МГц [1, 2, 5].

Для режимов ERP-OFDM требования к минимальной чувствительности, допустимое превышение уровня помехи от соседнего канала (разница в центральных частотах не менее 20 МГц) и допустимое превышение уровня перекрестной помехи от соседнего канала (разница в центральных частотах не менее 30 МГц) задаются такие же, как и для стандарта 802.11a [4, 5].

Стандарт требует, что бы в режимах ERP-DSSS и ERP-PBCC приемник обеспечивал работу при уровне помехи от соседнего канала (разница в центральных частотах более 25 МГц), превышающем уровень сигнала не более чем на 35 дБ (при соблюдении требований к спектральной маске, определенных стандартом) [5].

Приемник должен обеспечить $FER < 10\%$ для PSDU длиной 1000 байт, для максимального входного уровня сигнала -20 дБм, измеренного в соединителе антенны (для любого поддерживаемого типа модуляции, т.е. 1, 2, 5.5, 6, 9, 11, 12, 18, 22, 24, 33, 36, 48, 54 Мбит/с) [5].

Анализ АЧХ передатчиков стандарта 802.11b

На рис. 2.7 ... 2.12 приведены результаты измерений АЧХ различных устройств. Все АЧХ были измерены⁶¹ на 7 частотном канале 2442 МГц с использованием спектрального анализатора HP8563E.

По паспортным данным производителя мощность излучения устройства Linksys WET11 составляет 15 дБм, однако реально этот показатель больше. В принципе уровень излучения удовлетворяет требованиям стандарта, но может привести к превышению требований к EIRP при использовании направленных антенн. Уровень внеполосного излучения этой карты выше, чем у большинства устройств. Производитель (Alvarion) заявляет выходную мощность 14 дБм. Реально ее величина составляет 20 дБм, причем внеполосное излучение данного устройства превышает аналогичные показатели других устройств. Это может привести к нарушению требований к EIRP при использовании антенн с КУ больше 0. Радиокарты Orinoco (чипсет Agere Systems-Lucent Technologies) имеют наиболее чистый и узкий спектр по сравнению со всеми другими тестируемыми устройствами. Соответственно, среди перечисленных устройств, с точки зрения обеспечения ЭМС, оборудование, построенные на этих чипсетах, является оптимальным выбором при проектировании беспроводных сетей.

⁶¹ По материалам статьи «FREQUENCY SPECTRUM»,
http://www.antennspecialisten.se/en/support/t1_spektrum.html

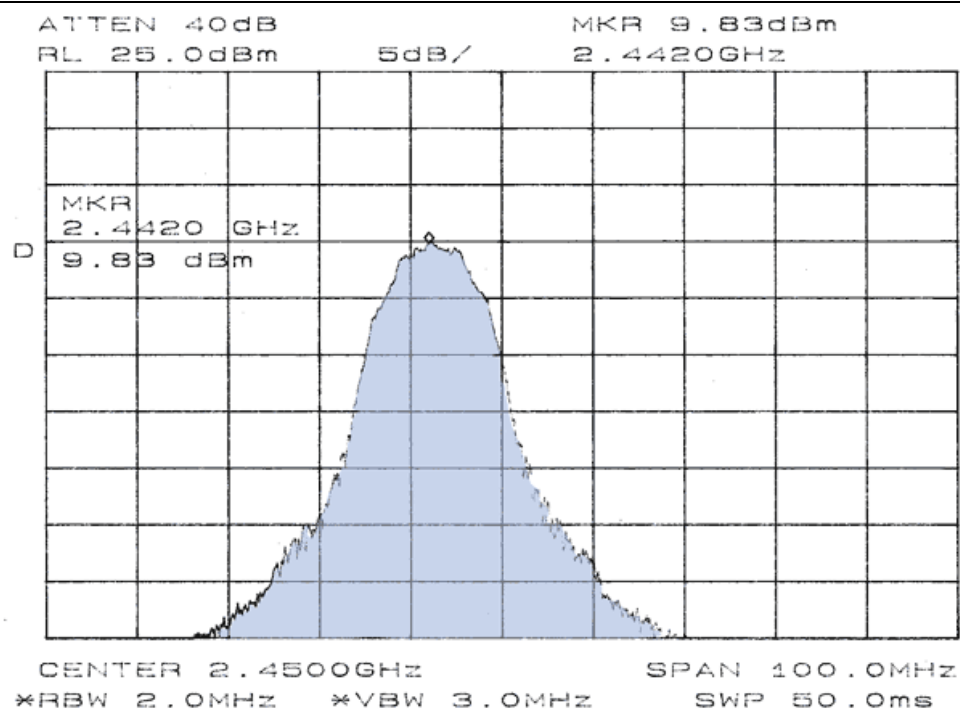


Рис. 2.7. D-Link DWL650

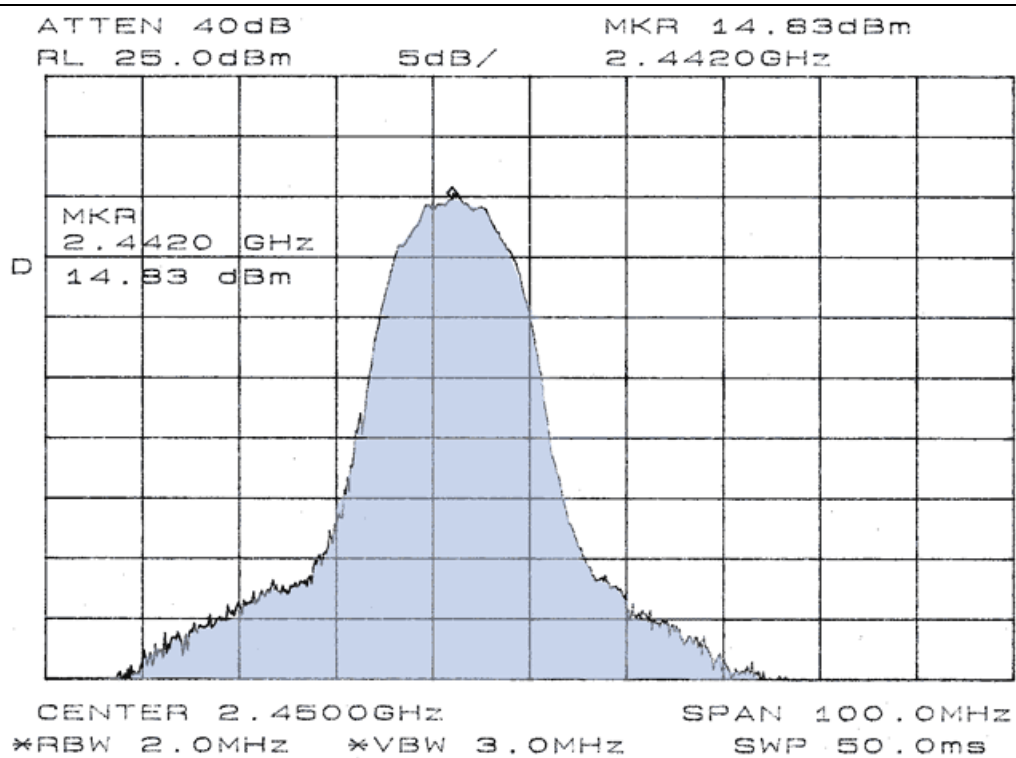


Рис. 2.8. D-Link DWL810

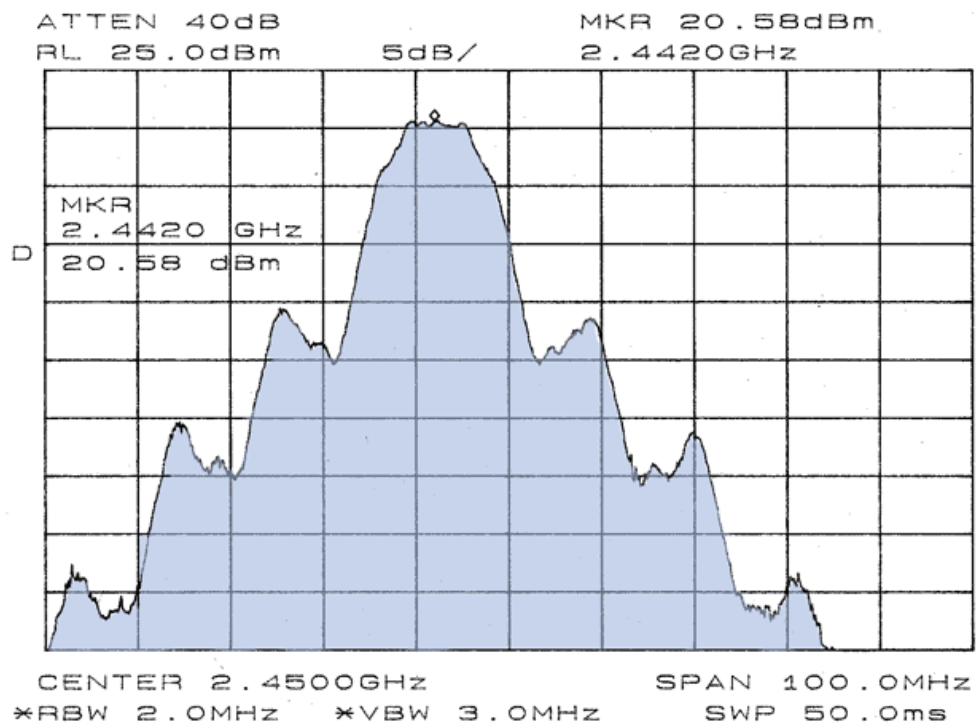


Рис. 2.9. Linksys WET11

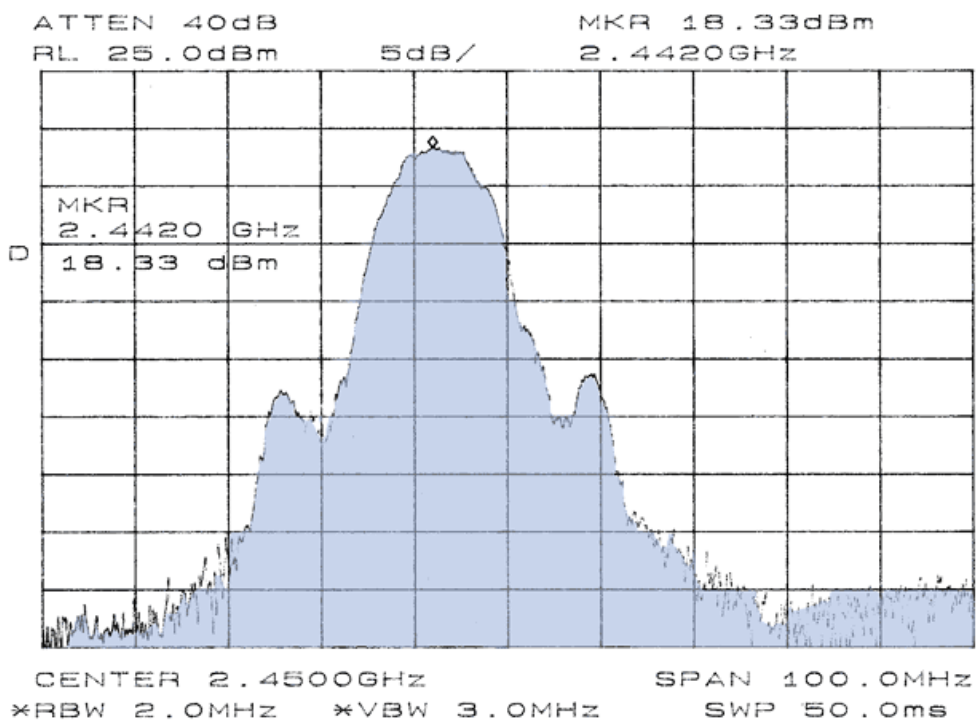


Рис. 2.10. AirBridge

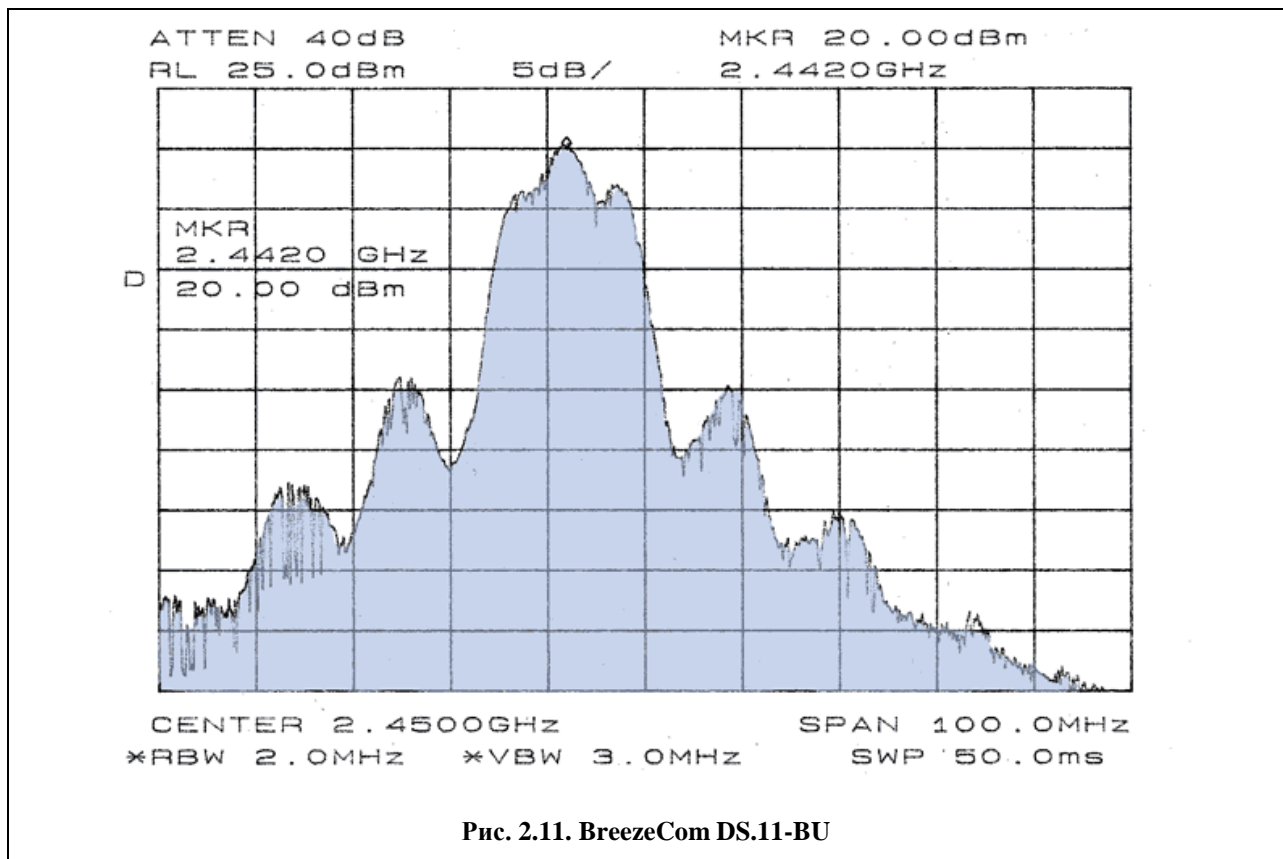


Рис. 2.11. BreezeCom DS.11-BU

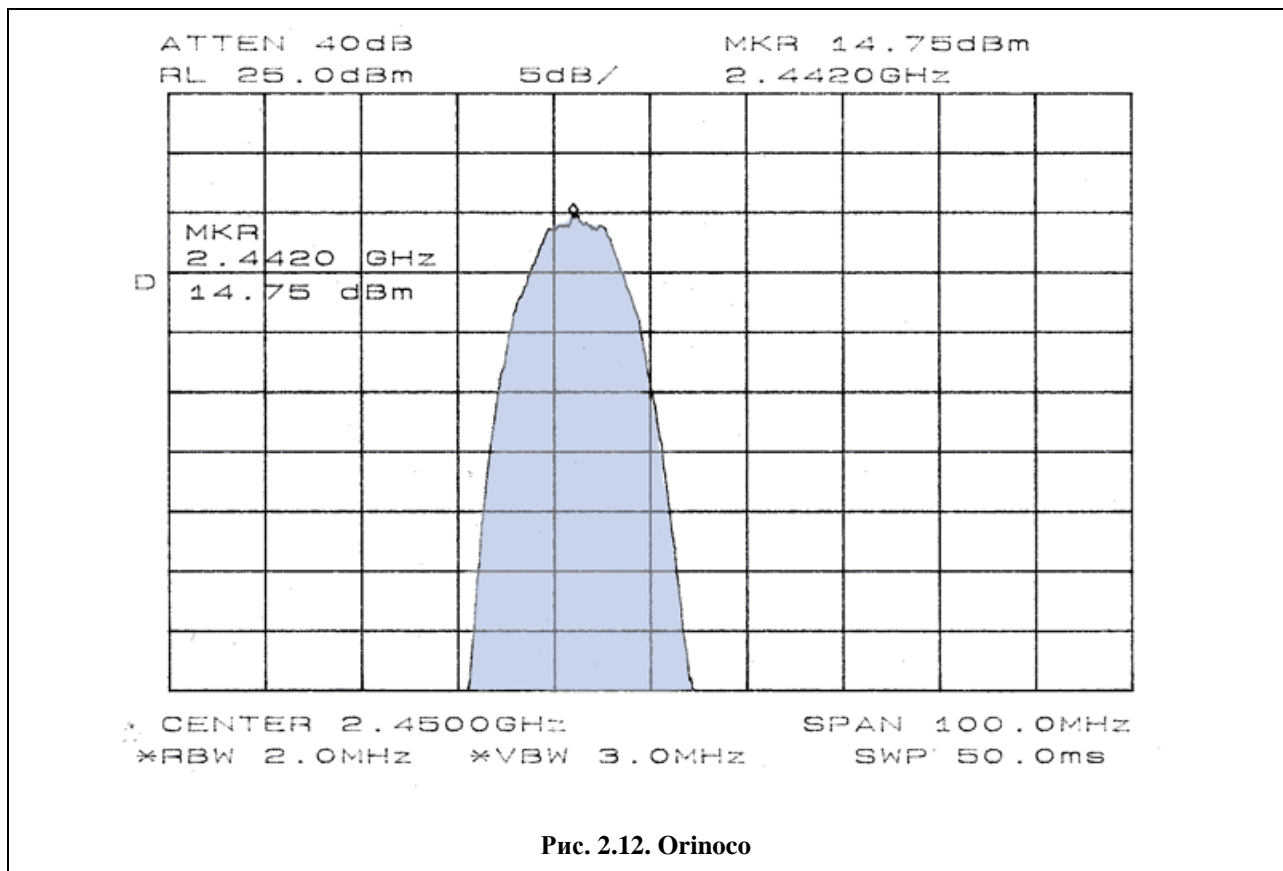


Рис. 2.12. Orinoco

2.3. *Разработка алгоритмов работы для механизма резервирования среды передачи*

Для уменьшения влияния внутрисистемных помех от соседних сот, работающих на одном частотном канале был разработан усовершенствованный механизм резервирования среды передачи. Существующий механизм предназначен для резервирования среды передачи (RTS/CTS) предназначен для организации безконфликтной радиосвязи внутри одной соты. Основная идея механизма RTS/CTS заключается в передаче точкой доступа управляющего фрейма, содержащего в поле продолжительности время, в течение которого передающая МС могла бы завершить обмен фреймами. Пока не истечет указанное время, другие станции не пытаются получить доступ к среде передачи. При наличии независимых передатчиков работающих на одинаковой частоте с сотой-рецептором, этот механизм становится неэффективен. При наличии в сети трех и более сот, приходится повторно использовать одни и те же частотные каналы в разных сотах. Передатчики соседних сот работают независимо друг от друга, поэтому создаваемые ими взаимные помехи нарушают работу беспроводной сети. Для решения этой проблемы предлагается усовершенствованный механизм резервирования среды передачи.

В WLAN передача может вестись между МС и точкой доступа; между МС-источником сигнала, точкой доступа (выступающей, по сути, в качестве ретранслятора) и МС-рецептором сигнала; или между двумя МС. Для того, что бы сигнал был правильно принят адресатом, в каждом из рецепторов в это время должна отсутствовать радиопомеха, которая может повредить сигнал. Для резервирования среды передачи предлагается использовать схему, показанную на рис. 2.13.

Шаг 1. Фрейм RTS перед передачей должен пройти процедуру DCF (как и в стандартном механизме резервирования среды передачи). При этом генерируется таймер случайной задержки. Фрейм RTS содержит суммарное время, необходимое для получения фрейма резервирования среды приемником (фрейм CTS); для передачи фрейма данных; для получения фрейма подтверждения. Точки доступа и МС, находящиеся в зоне действия станции-отправителя, увеличивают вектор распределения (NAV) до этой величины.

Шаг 2. Фрейм CTS, как и в стандартном механизме резервирования среды передачи, должен пройти процедуру DCF. Процедура случайной задержки при этом не выполняется и фрейм CTS посылается через время, задаваемое интервалом SIFS. Фрейм CTS содержит время, необходимое для передачи информации станцией-отправителем и фрейма подтверждения станцией-получателем. Может получиться, что станция-получатель должна ждать освобождения среды больше времени, чем отведено для

резервирования приема. В этом случае фрейм CTS не посылается. Фрейм CTS получают все станции и точки доступа, находящиеся в зоне действия станции-рецептора. Они увеличивают значение NAV до указанного в фрейме CTS. Станция-отправитель после получения фрейма CTS может начинать передачу фрейма данных. Если станция-отправитель по каким-то причинам не получила фрейм CTS по истечении времени, отведенного на резервирование среды в приемнике, то она не может начать передачу и должна заново попытаться зарезервировать среду.

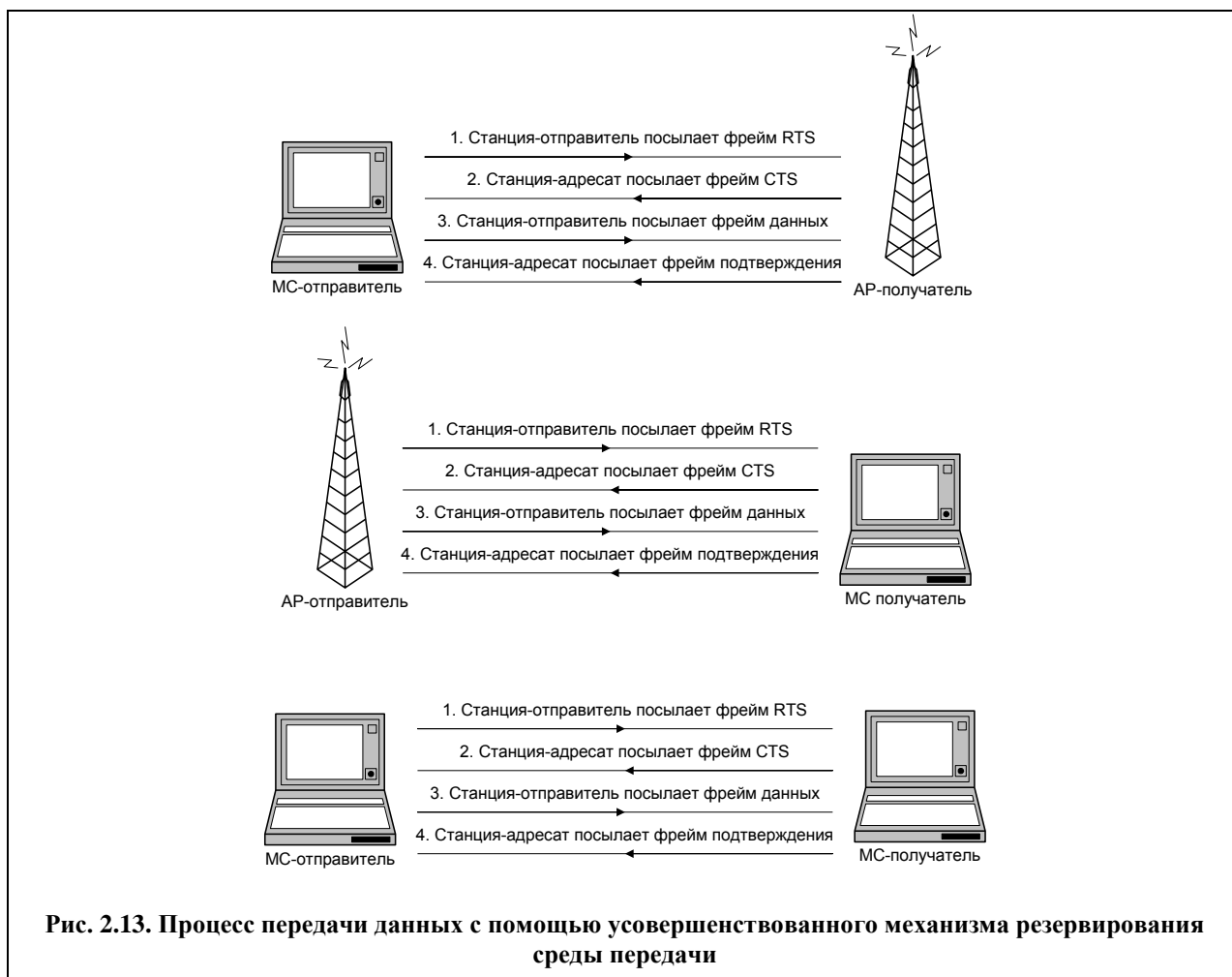
Шаг 3. Станция-отправитель посылает фрейм данных. Фрейм должен пройти стандартную процедуру DCF. При этом минует процедура случайной задержки и фрейм данных передается через время, задаваемое интервалом SIFS. Если истекло время, отведенное для передачи фрейма данных, то он не передается и станция-отправитель должна заново резервировать среду.

Шаг 4. После получения фрейма данных, станция-получатель отправляет фрейм подтверждения. При этом минует процедура случайной задержки и фрейм подтверждения передается через время, задаваемое интервалом SIFS. Если станция-отправитель не получает фрейм-подтверждение в течение заданного времени, то она считает, что данные не доставлены и требуется их повторная передача. Все станции, получившие фрейм подтверждения, уничтожают информационные блоки, связанные с этим сеансом передачи. Станции, получившие фрейм CTS, но не получившие фрейм подтверждения ждут окончания времени жизни информационного блока, а затем уничтожают его. Если передача ведется между МС посредством точки доступа, то точка доступа может передать фрейм резервирования среды передачи вместе с фреймом подтверждения.

В усовершенствованном механизме резервирования среды передачи задействованы следующие стандартные фреймы:

- фрейм резервирования среды источником, RTS (приоритет равен 0);
- фрейм резервирования среды получателем, CTS (приоритет равен 1);
- фрейм данных (приоритет равен 2);
- фрейм-подтверждение доставки данных (приоритет равен 3);

Управляющие фреймы RTS, CTS, фрейм-подтверждение следует с максимальной мощностью, в режиме, который характеризуется наименьшими требованиями к отношению сигнал/помеха и поддерживается всеми станциями-приемниками (скорость передачи 1 Мбит/с). Для того чтобы заголовки фреймов данных могли принять все находящиеся поблизости приемопередающие станции, их желательно передавать способом, аналогичным способу передачи управляющих фреймов.



При использовании усовершенствованного механизма резервирования среды передачи в сети необходимо, чтобы следующие параметры синхронизированы и равны для каждого приемопередатчика WLAN:

- время ожидания фрейма CTS;
- время передачи фрейма CTS;
- время ожидания фрейма данных;
- время ожидания фрейма подтверждения;
- время передачи фрейма подтверждения.

При приеме или запросе на передачу фрейма создается информационный блок, содержащий следующие данные:

- Идентификатор фрейма данных, для передачи которого создан этот инф. блок (IDD);
- Идентификатор отправителя фрейма данных (IDT);
- Идентификатор получателя фрейма данных (IDR);
- Начало отсчета времени жизни информационного блока (ST);
- Время жизни информационного блока (timeout);

- Состояние информационного блока (status);
- Действие, выполняемое при активизации информационного блока (action).

Вектор распределения сети (NAV) определяется по информационному блоку, запрещающему передачу и имеющему наибольшее оставшееся время жизни.

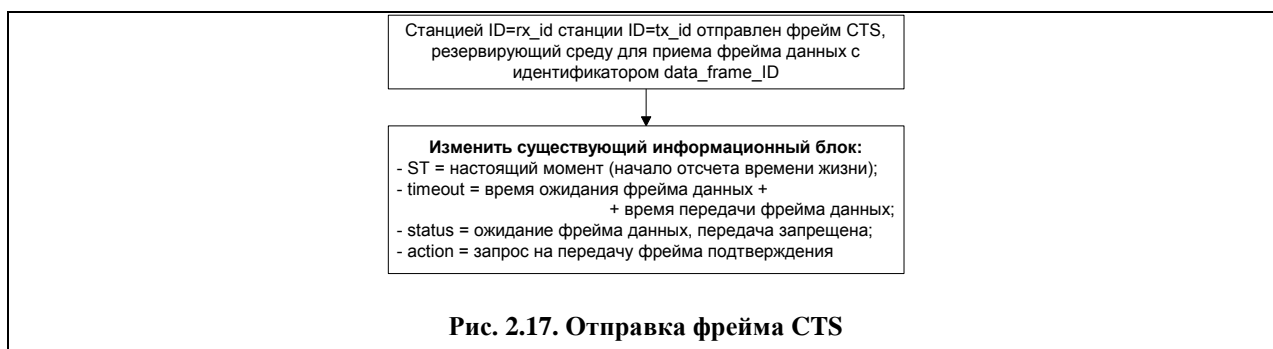
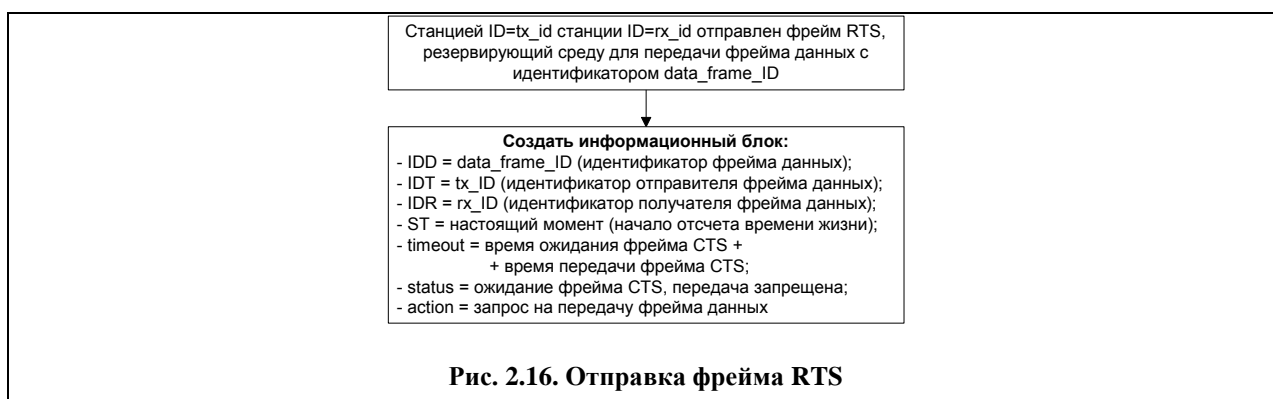
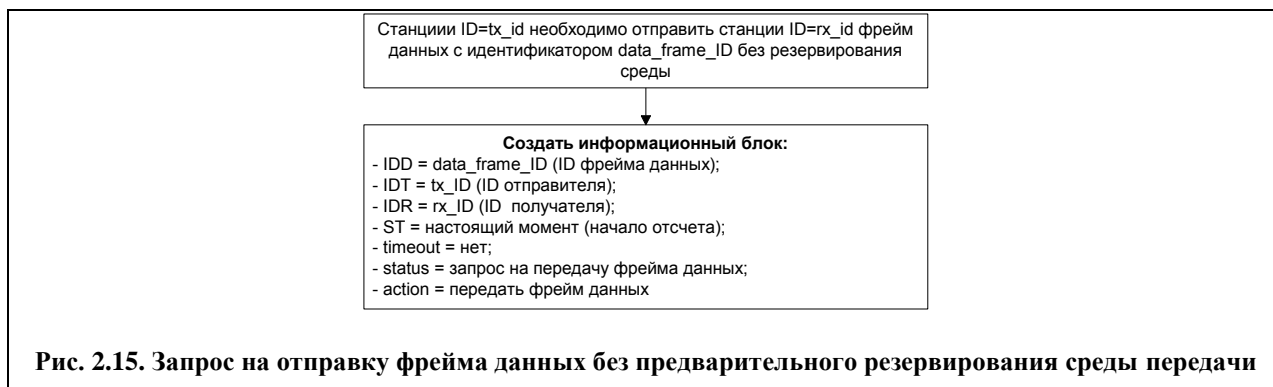
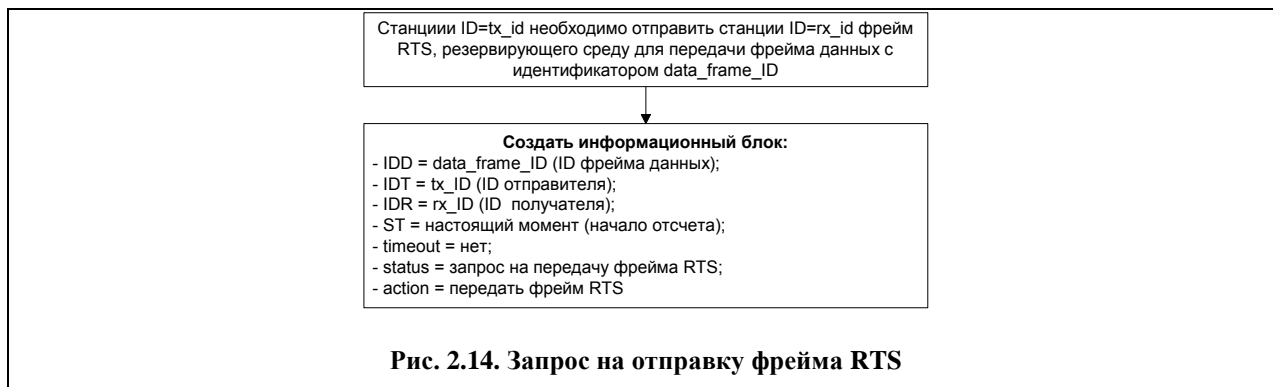
В табл. 2.4 показаны отличия стандартного и усовершенствованного механизма резервирования среды передачи.

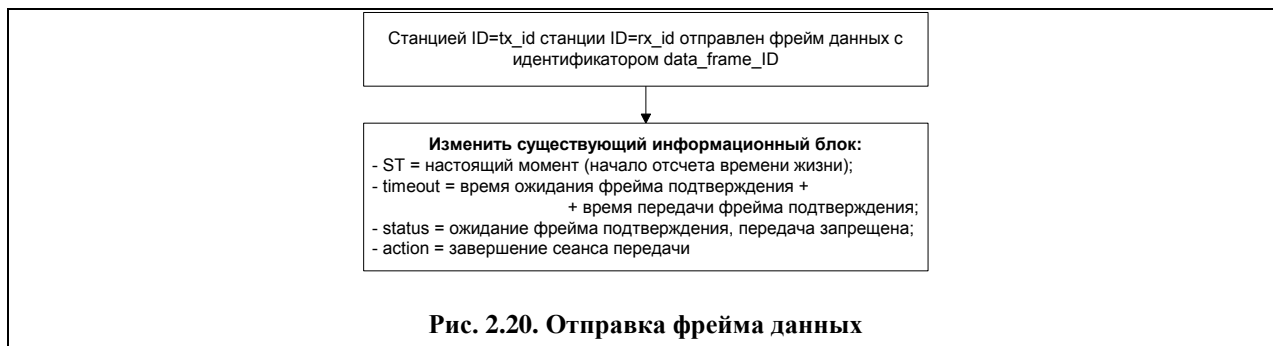
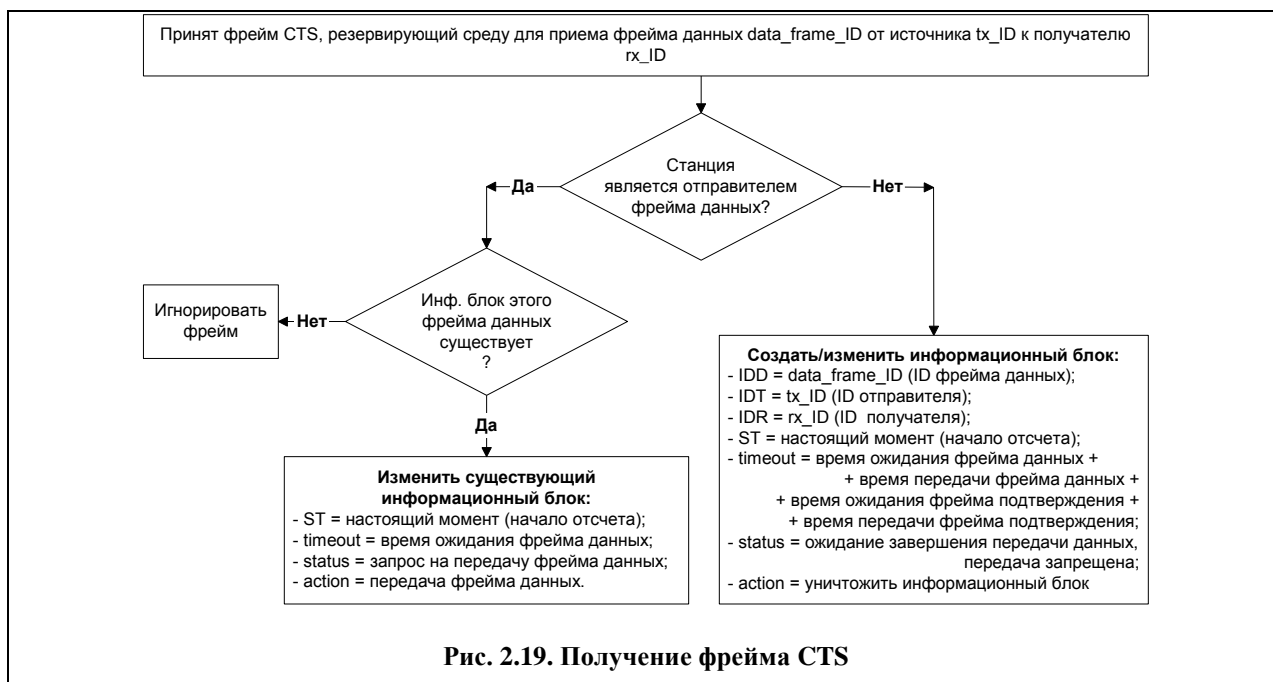
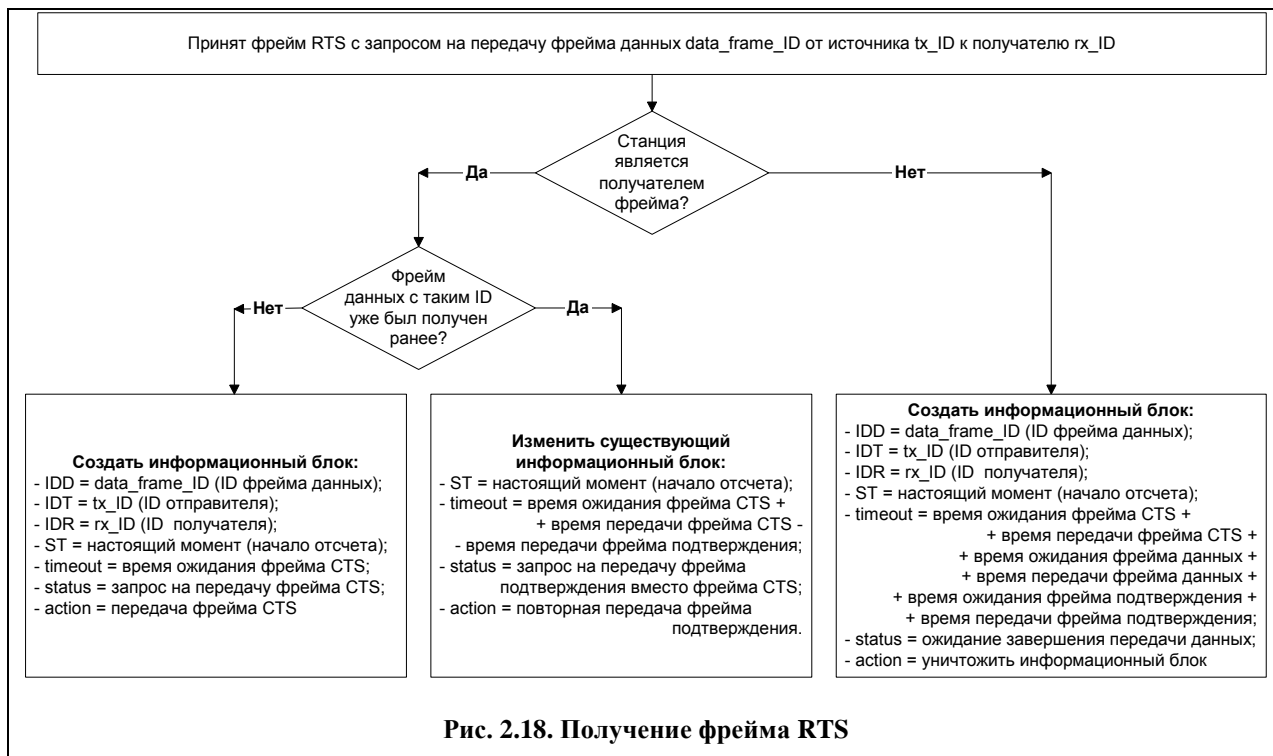
Табл. 2.4. Отличие стандартного и усовершенствованного механизма резервирования среды передачи

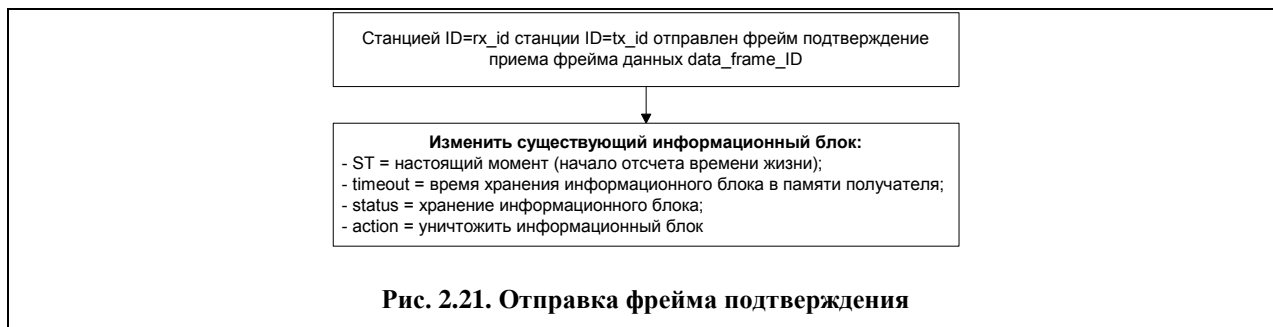
Стандартный механизм резервирования среды передачи	Усовершенствованный механизм резервирования среды передачи
Фрейм RTS может быть отправлен только от МС к точке доступа.	Фрейм RTS может отправить и МС и точка доступа.
Фрейм CTS может быть отправлен только от АР к точке доступа.	Фрейм CTS может отправить и МС и точка доступа.
При передаче данных между МС через АР, фрейм подтверждения сначала посылается МС-получателем точке доступа, а затем точка доступа пересылает фрейм подтверждения МС-отправителю.	При передаче данных между МС через АР, сначала подтверждается доставка данных к точке доступа, а затем доставка данных от точки доступа МС-получателю.
Применяется только в топологиях BSS или ESS.	Может применяться в топологиях BSS, ESS или IBSS (работает без точки доступа вообще).
Для расширения соты применяются АР-повторители.	Вместо точки АР-повторителя можно установить полнофункциональную точку доступа, работающую на том же частотном канале и имеющую собственное подключение к системе распределения.

В стандартном механизме резервирования среды, при передаче данных от точки доступа к МС возможность резервирования среды отсутствует. Благодаря использованию фреймов RTS/CTS и в точке доступа и в МС, резервирование среды возможно при передаче данных в любом направлении. В стандартном механизме резервирование среды происходит только внутри одной соты, фреймы RTS/CTS от соседних сот игнорируются. При наличии поблизости сот, работающих на перекрывающемся частотном канале, работа стандартного механизма RTS/CTS блокируется. В усовершенствованном механизме, резервирование среды производится во всех взаимодействующих приемопередатчиках WLAN, работающих на перекрывающихся частотных каналах. Управляющие фреймы RTS, CTS и фрейм подтверждения принимаются всеми взаимодействующими МС и АР. Поэтому, для охвата всех устройств WLAN, скорость передачи берется минимальной, а мощность передачи равна максимуму, определенному этого устройства.

Далее приведены разработанные алгоритмы усовершенствованного механизма резервирования среды передачи (см. рис. 2.14 ... 2.24).







С помощью передачи дополнительной информации, можно обеспечить автоматическое регулирования мощности, выбор наиболее подходящих скоростей передачи, автоматический выбор и переход на др. частотный канал. Мощность излучения передатчика, разницу между мощностью передатчика и принимаемым уровнем сигнала, уровень помех в рецепторе и загрузка частотного канал можно передавать в фреймах RTS/CTS. Чувствительность приемника в разных режимах, требуемое

отношение сигнал/помеха на разных скоростях – это величины постоянные. Их можно передавать в процессе привязки МС к точке доступа.

Разработанный механизм резервирования среды передачи призван организовать одновременное безконфликтное использование несколькими сотами, принадлежащими одной беспроводной локальной сети, одного частотного канала на одной территории. Для его внедрения необходимо обновление программного обеспечения точек доступа и клиентских адаптеров. Замены аппаратной части не требуется. На рис. 2.24 показан механизм доступа к среде передачи, реализующий работу усовершенствованного механизма резервирования среды передачи.



Рис. 2.24. Механизм доступа к среде передачи, реализующий работу усовершенствованного механизма резервирования среды передачи.

Выводы по второй главе

1. Рассмотрены основные принципы оценки ЭМС радиосистем и сформулированы задачи по оценке ЭМС, которые необходимо решать при проектировании беспроводных локальных сетей.
2. Разработаны методы для вычисления суммарного уровня помех:
 - метод, позволяющий рассчитать худший случай, в котором мешающие сигналы складываются друг с другом (упрощенный метод);
 - метод, позволяющий учесть разницу фаз мешающих сигналов, пришедших в рецептор.
3. Проанализированы требования стандартов к характеристикам оборудования, которые необходимо учитывать при обеспечении ЭМС. Рассмотрено соответствие параметров реального оборудования требованиям стандартов.
4. Разработаны алгоритмы усовершенствованного механизма резервирования среды передачи, позволяющие организовать одновременную работу на одной территории нескольких сот, принадлежащих одной WLAN и использующих один частотный канал. Для его внедрения необходимо обновление программного обеспечения точек доступа и клиентских адаптеров. Обновление аппаратной части не требуется.

Глава 3: Разработка методики проектирования беспроводных локальных сетей, учитывающей ЭМС

Целью этой главы была поставлена разработка методики проектирования беспроводных локальных сетей с учетом ЭМС. Проектирование WLAN включает в себя выбор частотных каналов, используемых в сети, расположения антенн точек доступа и режимов работы оборудования (мощности передатчиков AP и MC, скорость передачи данных), определение необходимого количества точек доступа, моделей приемопередающих антенн AP, их ориентирование. Для предварительной оценки работоспособности сети, а также для выбора оптимальных режимов работы проводится расчет уровней сигналов и помех в сотах. Все компоненты выбираются и настраиваются с учетом рассчитанных зависимостей и данных межсистемной ЭМС, полученных при анализе ЭМО. При проектировании WLAN необходимо учесть:

- Приложения, используемые беспроводными клиентами.
- Особенности протокола 802.11.
- Характеристики выбранного оборудования.
- Перемещение мобильных узлов.
- ЭМО.
- Особенности местности (рельеф, застройка).

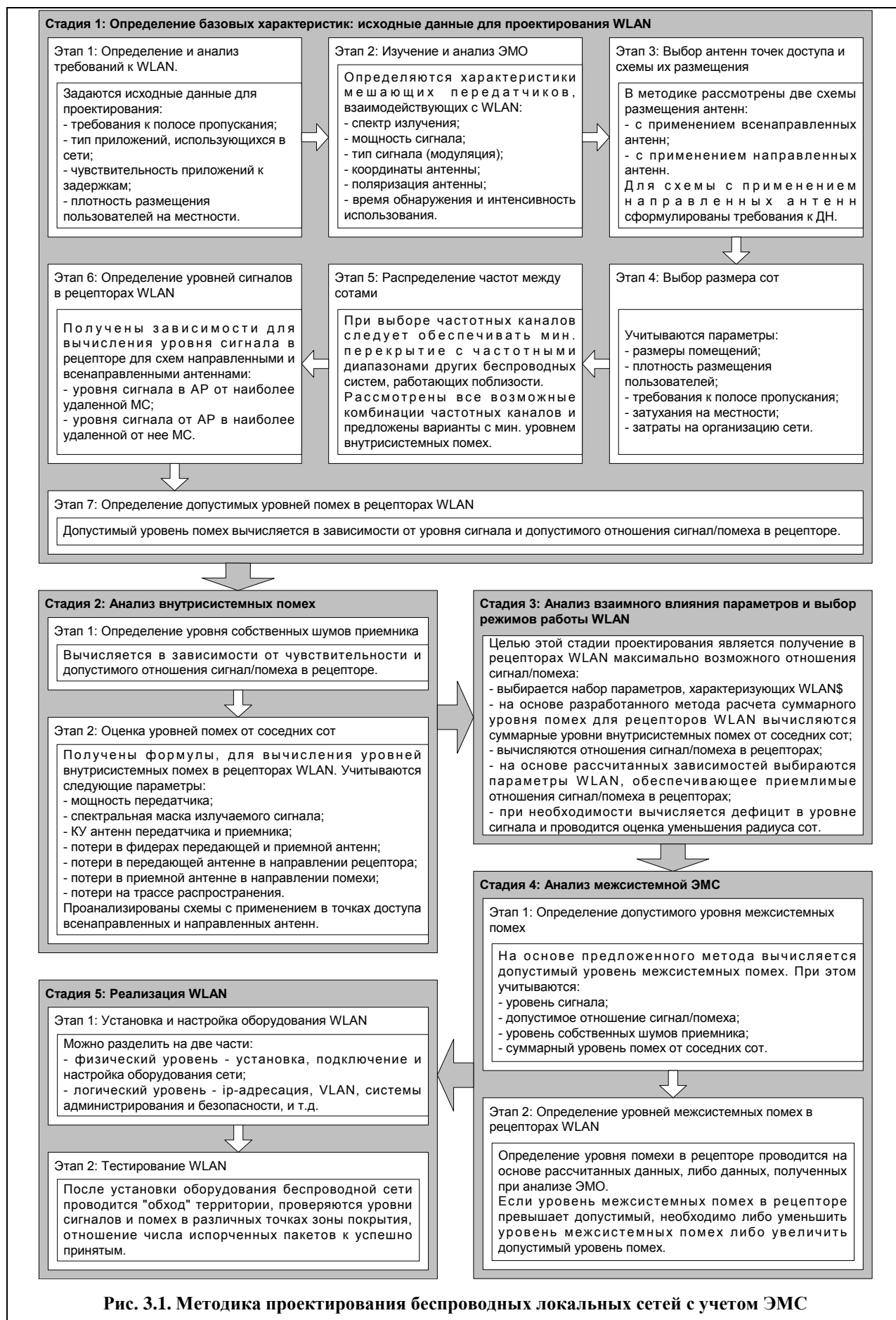
Методика проектирования беспроводных локальных сетей разделена на несколько стадий, которые, в свою очередь, разбиты на этапы (см. рис. 3.1).

3.1. *Определение базовых характеристик*

Этап 1: Определение и анализ требований к WLAN

В зависимости от приложений, с которыми будут работать пользователи беспроводной сети, определяются и требования к ней. Прежде чем планировать WLAN, важно сформулировать эти требования:

- требования к полосе пропускания (в расчете на одного клиента);
- тип приложения: потоковое (телефония, видео) или пульсирующее (почта, веб);
- QoS (чувствительность приложений к задержкам).



С увеличением плотности клиентов, требования к суммарной полосе пропускания возрастают. В беспроводных сетях довольно значительная часть полосы пропускания расходуется на прикладные нужды. В стандарте 802.11b, при скорости передачи 11 Мбит/сек, реальная производительность составляет около 6 Мбит/с [62]. Для стандартов 802.11a/g при скорости передачи 54 Мбит/сек, реальная производительность составляет примерно 22 Мбит/с [62]. В зависимости от потребностей пользователей WLAN в полосе пропускания, определяется количество пользователей, обслуживаемых одной точкой доступа.

Типы используемых приложений существенно влияют на объемы передаваемых данных. Требования приложений потокового типа, таких как передача голоса или видео, значительно отличаются от приложений пульсирующего типа, например HTTP или POP3.

Полоса пропускания, используемая приложениями пульсирующего типа, непостоянна и непредсказуема. Как следствие, очень трудно определить количество пользователей, которое должна обслуживать одна точка доступа. Верхним пределом считается 25 пользователей на одну точку доступа⁶².

Все станции, как правило, имеют одинаковые права доступа к среде передачи. Чем больше станций, тем больше шансов на возникновение коллизий, и повторную передачу. Как результат, - возникновение задержек при передаче данных. Для уменьшения этого эффекта, разумно выбирать высокую плотность размещения точек доступа.

Существуют 2 метода планирования размещения:

- По максимальной зоне обслуживания каждой AP.
- По максимальной пропускной способности.

Метод, ориентированный на максимальную зону обслуживания направлен на обеспечение максимального покрытия, при минимально возможном количестве точек доступа. Плотность пользователей в таких сетях составляет порядка 25 на 1 точку доступа⁶³. В этом случае обычно применяются приложения пульсирующего типа с низкой скоростью передачи данных. Небольшие требования к полосе пропускания позволяют уменьшить скорость работы до 1-2 Мбит/сек. Подобный вариант WLAN также применяется для временных сетей.

WLAN с максимальной пропускной способностью должны обеспечивать максимальную производительность и скорость передачи пакетов для каждого клиента. Они применяются в следующих случаях:

- Используются приложения, требующие высокой скорости передачи.

⁶² По материалам www.cisco.com, литература [7, 24]

⁶³ По материалам www.cisco.com, литература [7, 24]

- Используются приложения чувствительные к задержкам.
- Развертываются подсети меньших масштабов (или несколько подсетей в одной зоне обслуживания).
- В местах с высокой плотностью размещения пользователей.

Размеры сот для таких WLAN меньше, соответственно количество используемых точек доступа больше. При этом каждая точка доступа может обслуживать не более 12 пользователей⁶⁴.

При внедрении беспроводной сети необходимо обеспечить подключение точек доступа к распределительной системе. Следует учесть место (расстояние до точки подключения) и технологию подключения (например в технологии FastEthernet максимальная длина линии связи 100 м), удаленность антенн от AP и длины фидеров (соответственно и потери в них), доступность электропитания, ip-адресацию, маршрутизацию, VLAN, полосу пропускания, и т.д.

Этап 2: Изучение и анализ электромагнитной обстановки

При анализе ЭМО определяется наличие мешающих сигналов в месте развертывания сети.

- Выявляются беспроводные системы, функционирующие в данной местности в выбранных диапазонах частот.
- Определяется оборудование, чувствительное к радиопомехам, и учитываются его характеристики.
- Проводится поиск излучающих радиоэлектронных устройств, которые потенциально являются помехами (радиотелефоны, микроволновые печи, медицинское оборудование, и т.д.). Для каждой обнаруженной помехи фиксируются тип сигнала (модуляция), мощность, направление, и поляризация антенны, АЧХ, время обнаружения (например в рабочие дни с 9-00 до 18-00, круглосуточно и т.д.).

Для исследования ЭМО используются спектральные анализаторы, которые графически показывают энергию сигнала на различных частотах. Высокий уровень сигнала (например 20 дБм или выше) могут повредить анализатор. Для защиты используются встроенный или внешний входные аттенюаторы, уменьшающие амплитуду сигналов.

⁶⁴ По материалам www.cisco.com, литература [7, 24]

По получаемой на анализаторе спектра картинке можно определить уровень сигнала, центральную частоту и ширину частотного канала, а также тип используемой модуляции.

Направление на источник сигнала определяется с помощью направленной антенны. Вращая ее в различных направлениях, фиксируют направление на источник сигнала, совпадающее с направлением, в котором принимается максимальный уровень сигнала.

Изменяя поляризацию антенны анализатора (вращением) от горизонтальной до вертикальной, можно определить поляризацию антенны, излучающей сигнал⁶⁵.

Модуляцию сигнала можно определить по форме спектра излучения, зафиксированной анализатором.

Спектр сигнала может изменяться во времени. Для того, что бы лучше проанализировать спектр сигнала, необходимо использовать режим, в котором анализатор фиксирует на экране наибольшие значения уровней принимаемого излучения.

Большинство сигналов, обнаруженных в полосе 2,4ГГц будут OFDM, DSSS, FHSS-сигналы или их комбинации (например DSSS+OFDM).

DSSS-сигнал просто определить, по ширине используемого спектра (22 МГц) и форме сигнала. На рис. 3.2 показаны два сильных (порядка -60 дБм) сигнала DSSS в полосе 2.4 ГГц. Один сигнал излучается на 1-м частотном канале (2412 МГц), а другой на 6-м (2437 МГц). OFDM-сигнал также можно определить по его спектральной маске.

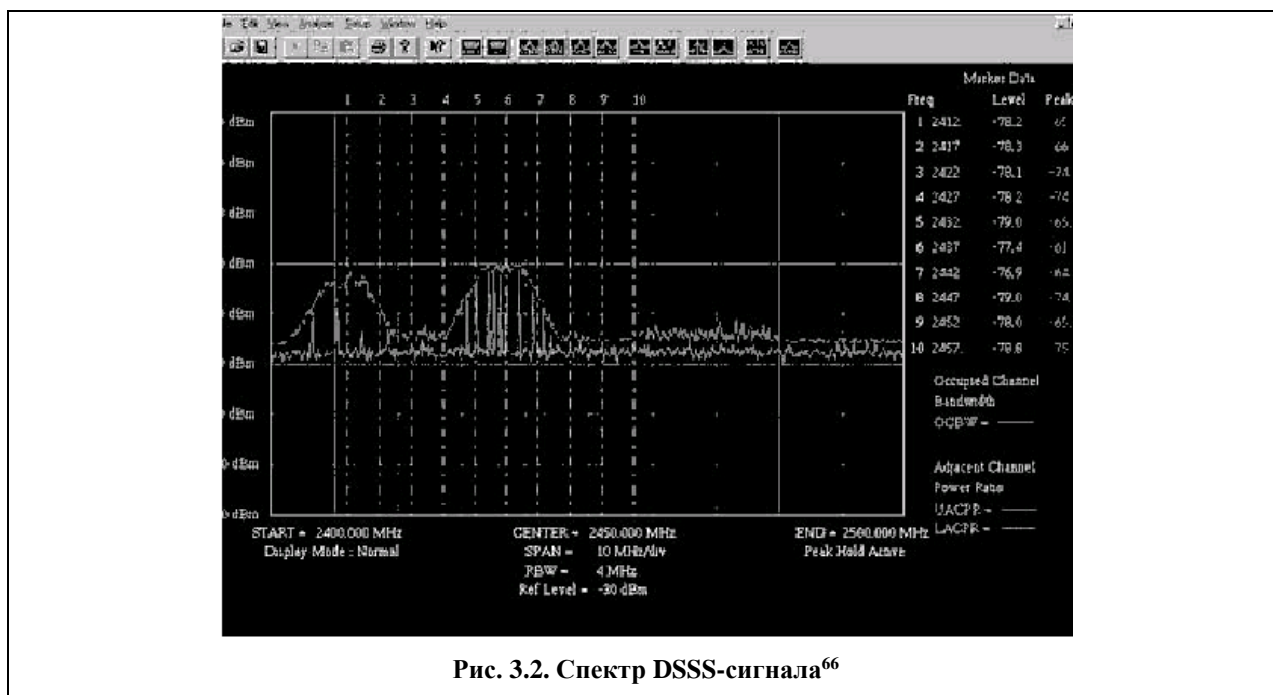


Рис. 3.2. Спектр DSSS-сигнала⁶⁶

⁶⁵ Поляризация источника сигнала совпадает с поляризацией антенны анализатора, при которой наблюдается наибольший уровень сигнала.

⁶⁶ Примеры спектров сигналов приведены из [24]

Сигнал FHSS можно определить по множеству пиков: сигнал переходит с канала на канал через 1 МГц, по всей доступной полосе частот (см. рис. 3.3).

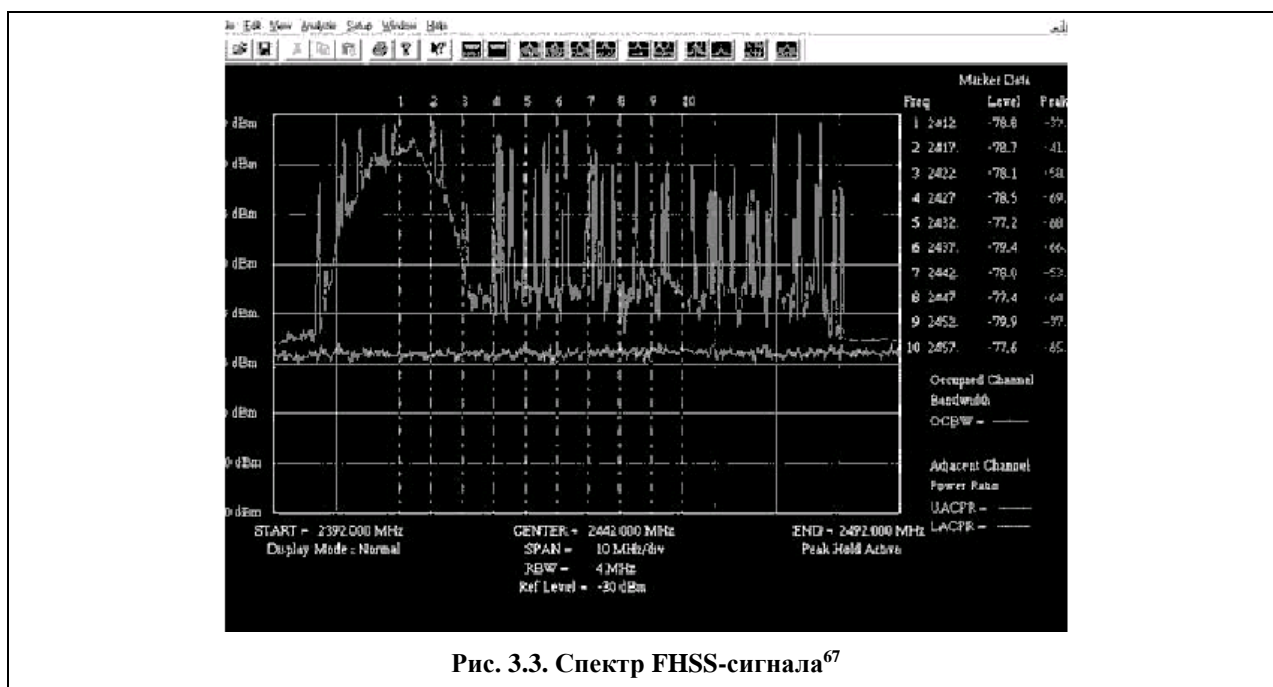


Рис. 3.3. Спектр FHSS-сигнала⁶⁷

Дополнительную информацию по различным параметрам (шифрование, скорость работы, интенсивность трафика и т.д.) работающих поблизости WLAN можно получить, используя беспроводные анализаторы протоколов и снифферы.

В результатах анализа ЭМО должны быть определены:

- наиболее подходящие для развертывания беспроводной сети диапазоны частот;
- перечень источников помех в этих диапазонах, их характеристики (мощность, спектр излучения, КУ и ДН антенны, расстояние до передатчика и т.д.);
- перечень рецепторов, чувствительных к излучению в выбранных диапазонах, их характеристики (частота приема, чувствительность, минимальное отношение сигнал/помеха, параметры антенны (если есть), расположение, параметры источника сигнала и др.);
- описание характера местности, где будет развертываться беспроводная сеть, ее особенности с точки зрения распространения радиоволн.

Также нужно проанализировать принципиально возможные пути уменьшения взаимного влияния с соседними радиосистемами (уменьшение уровня мощности,

⁶⁷ Примеры спектров сигналов приведены из [24]

установка частотных фильтров, экранирование, перенос излучающего или приемного оборудования в другое место).

Этап 3: Выбор антенн точек доступа и схемы их размещения

При проектировании беспроводных локальных сетей в точках доступа могут применяться направленные или всенаправленные антенны. Типичная схема расположения соседних сот показана на рис. 3.4. Различные соотношения между размерами сот показаны на рис. 3.5.

Всенаправленные антенны размещаются в центрах сот, направленные - на границах сот. С позиций обеспечения ЭМС (как межсистемной, так и внутрисистемной) лучше использовать направленные антенны.

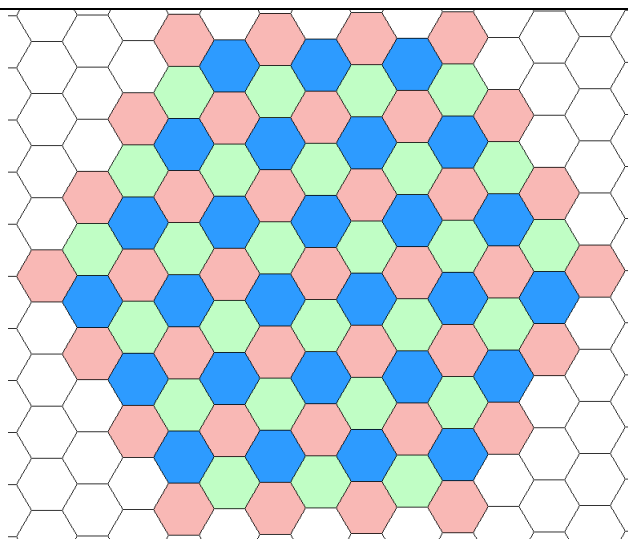


Рис. 3.4. Взаимное расположение сот

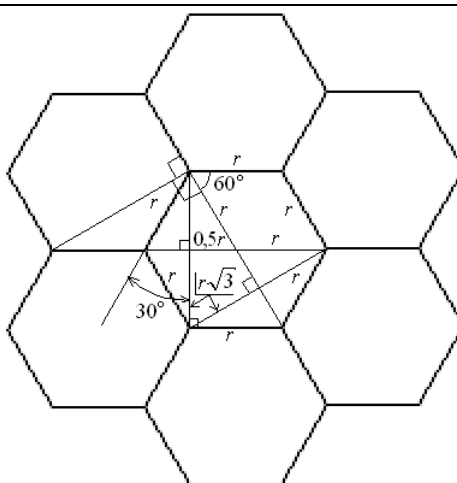


Рис. 3.5. Геометрия сот

Антенна АР должна обеспечивать прием от МС, находящейся в любом месте соты. МС, соответственно, должна принимать сигнал от АР, также находясь в любой части соты. Направленная антенна точки доступа имеет различные значения КУ антенны в зависимости от направления. Независимо от направления антенны АР и удаленности МС и антенны АР, суммарные потери в уровне сигнала на этих параметрах должны быть не больше, чем для пары МС-АР, наиболее удаленных друг от друга (расстояние между ними равно двум радиусам соты, см. рис. 3.6).

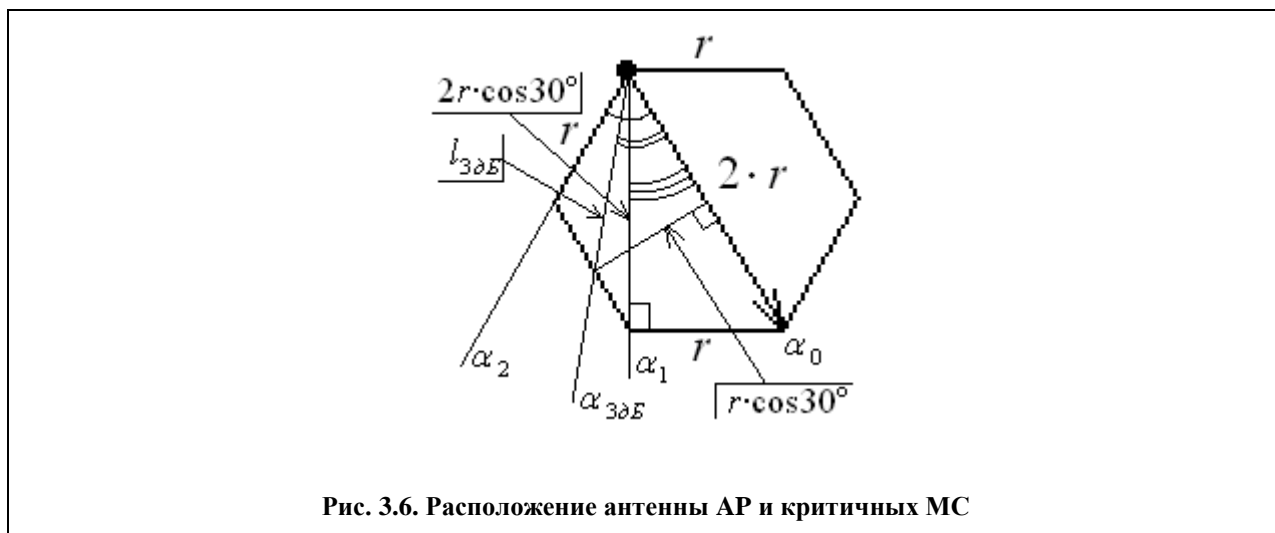


Рис. 3.6. Расположение антенны АР и критичных МС

Некоторые критичные точки местонахождения МС показаны на рис. 3.6. Расстояния между ними и АР, а также разница с направлением основного лепестка антенны АР приведены в табл. 3.1. Ниже выводятся формулы для расчета допустимого уменьшения КУ антенны АР в различных направлениях ($X_{\text{дБ}}$).

$$L(2r) = 40,2 + 20 \lg(2r); \quad L(l) = 40,2 + 20 \lg(l);$$

$$X_{\text{дБ}} = L(2r) - L(l) = 20 \lg(2r) - 20 \lg(l);$$

$$X_{\text{дБ}} = 20 \lg \left(\frac{2r}{l} \right); \quad (3.1)$$

где r - радиус соты, м;

$L(2r)$ - потери в уровне сигнала на трассе распространения между АР и МС, наиболее удаленной от точки доступа, вычисленные для случая прямой видимости⁶⁸ между источником и рецептором сигнала, дБ;

l - расстояние между АР и МС, м;

$L(l)$ - потери на трассе распространения между АР и МС, дБ;

$X_{\text{дБ}}$ - Допустимое уменьшение КУ антенны АР, относительно основного лепестка ДН, дБ.

⁶⁸ См. 2-ю главу «Анализ задач по оценке ЭМС в беспроводных локальных сетях стандарта 802.11»

Табл. 3.1. Требования к горизонтальной ДН антенны АР

Направление на МС, обозначенное углом α , градусов	Расстояние между антенной АР и МС, м	Допустимое уменьшение КУ антенны АР, относительно КУ основного лепестка ДН: $X_{\text{дБ}}$, дБ
$\alpha_0 = 0^\circ$	$2 \cdot r$	0
$\alpha_1 = \pm 30^\circ$	$2 \cdot r \cdot \cos 30^\circ = r \cdot \sqrt{3}$	1,25
$\alpha_2 = \pm 60^\circ$	r	6,02

Обычно для антенн задается такой параметр, как ширина ДН (в градусах) на уровне 3 дБ. Требуемую ширину ДН на уровне 3 дБ ($\alpha_{3\text{дБ}}$) можно вычислить следующим образом:

$$\sin(\alpha_{3\text{дБ}}) = \frac{r \cdot \cos 30^\circ}{l_{3\text{дБ}}};$$

$$20 \log l = 20 \log(2r) - X_{\text{дБ}} = 20 \log(2r) - 20 \cdot \frac{X_{\text{дБ}}}{20} \cdot \log(10);$$

$$\log l = \log(2r) - \log 10^{\frac{X_{\text{дБ}}}{20}} = \log \left(\frac{2r}{10^{\frac{X_{\text{дБ}}}{20}}} \right);$$

$$l = \frac{2r}{10^{\frac{X_{\text{дБ}}}{20}}};$$

$$\sin(\alpha_{3\text{дБ}}) = \frac{r \cdot \cos 30^\circ}{2r / (10^{\frac{3}{20}})} = \frac{10^{0,15} \cdot \cos 30^\circ}{2} = 0,61;$$

$$\alpha_{3\text{дБ}} = 37,7^\circ;$$

где $l_{3\text{дБ}}$ - расстояние между АР и МС, расположенной на границе 3 дБ, м;

$\alpha_{3\text{дБ}}$ - требуемая ширина горизонтальной ДН на уровне 3 дБ, градусов.

К вертикальной ДН антенны АР предъявляются следующие требования:

- максимум КУ основного лепестка должен быть в направлении наиболее удаленной МС (β_1);
- основной лепесток вертикальной ДН антенны (уменьшение КУ до 3 дБ) должен охватывать пространство, ограниченное углами $\beta_1 \dots \beta_2$;
- антенна должна обеспечить значительное уменьшение помехи по перекрывающемуся каналу в заднем лепестке (пространство, ограниченное углами $\beta_3 \dots \beta_4$).

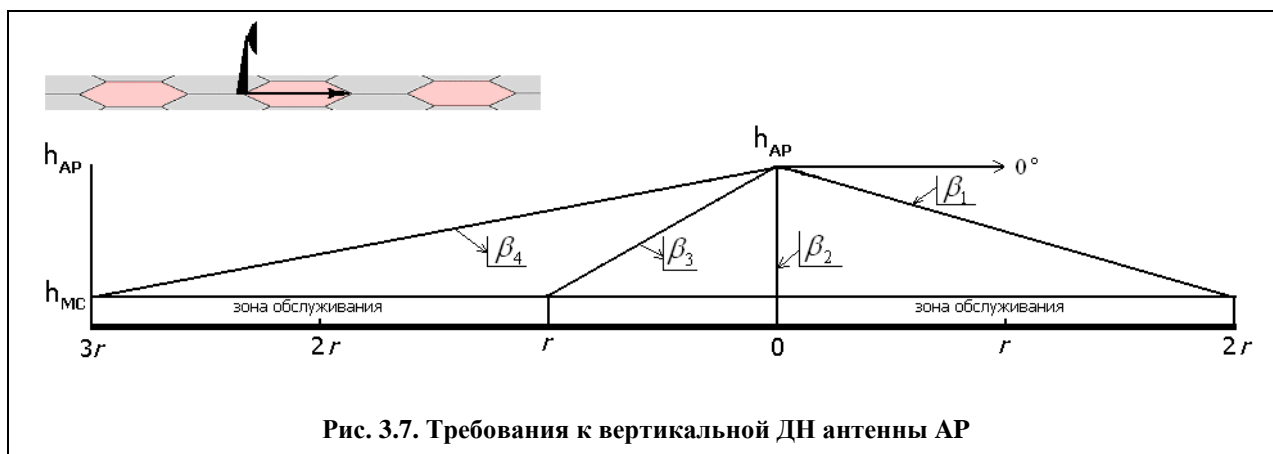


Рис. 3.7. Требования к вертикальной ДН антенны AP

Угол $\beta_2 = 90^\circ$. Значения углов β_1 , β_3 , β_4 зависят от разницы в высотах MC и антенны AP, а также от радиуса сот.

$$\operatorname{tg}(90 - \beta_1) = \frac{2r}{h_{AP} - h_{MC}} = \frac{2r}{k_{\Delta h/r} \cdot r} = \frac{2}{k_{\Delta h/r}}; \quad (3.2)$$

$$\operatorname{tg}(\beta_3 - 90) = \frac{r}{h_{AP} - h_{MC}} = \frac{r}{k_{\Delta h/r} \cdot r} = \frac{1}{k_{\Delta h/r}}; \quad (3.3)$$

$$\operatorname{tg}(\beta_4 - 90) = \frac{3r}{h_{AP} - h_{MC}} = \frac{3r}{k_{\Delta h/r} \cdot r} = \frac{3}{k_{\Delta h/r}}; \quad (3.4)$$

где $k_{\Delta h/r} = \frac{h_{AP} - h_{MC}}{r}$; $\Delta h_{AP-MC} = h_{AP} - h_{MC} = k_{\Delta h/r} \cdot r$.

Как правило, $k_{\Delta h/r} = 0,01 \dots 0,5$, тогда $\beta_1 = 3^\circ \dots 15^\circ$, а диапазон $\beta_3 \dots \beta_4 = 150^\circ \dots 180^\circ$.

Этап 4: Выбор размера сот

При выборе размера соты следует учитывать:

- размер помещений;
- плотность размещения пользователей;
- требования к полосе пропускания, доступной для каждого из пользователей, при средней и максимальной нагрузке беспроводной сети;
- запас на развитие сети: увеличение количества пользователей и требований к полосе пропускания;
- затраты на организацию (зависят от числа точек доступа);
- затухания на местности (определяют максимально возможный размер соты).

Желательно, чтобы пространство, охватываемое 1-й AP, было однородно (отсутствовали стены, перекрытия и другие препятствия, затрудняющие передачу радиосигнала). Т.е. границы сот совпадали со стенами помещений. Если пространство

неоднородно – на карте местности обозначаются потери, которые испытывает сигнал при их преодолении (определяется путем измерений или по различным моделям⁶⁹). Зона обслуживания одной АР должна выбираться таким образом, чтобы количество мобильных пользователей, принадлежащих этой соте, не превышало максимум, определяемый требованиями к сети. Если максимум пользователей превышен, то необходимо уменьшить пространство, обслуживаемое одной АР.

В нелицензируемых беспроводных локальных сетях максимально возможный радиус соты может быть до 300 метров, в зависимости от оборудования, требуемой скорости передачи данных, уровня помех и наличия препятствий между АР и МС.

Этап 5: Распределение частот между сотами

В России в диапазоне 2,4 ГГц для WLAN доступно три неперекрывающихся канала. Их возможные сочетания показаны в табл. 3.2.

Табл. 3.2. Комбинации совместно используемых частотных каналов

№ комбинации	Первая сота		Вторая сота		Третья сота	
	Номер Канала	Центральная частота	Номер канала	Центральная частота	Номер канала	Центральная Частота
1	1	2412 МГц	6	2437 МГц	11	2462 МГц
2	1	2412 МГц	6	2437 МГц	12	2467 МГц
3	1	2412 МГц	6	2437 МГц	13	2472 МГц
4	1	2412 МГц	7	2442 МГц	12	2467 МГц
5	1	2412 МГц	7	2442 МГц	13	2472 МГц
6	2	2417 МГц	7	2442 МГц	12	2467 МГц
7	2	2417 МГц	7	2442 МГц	13	2472 МГц
8	1	2412 МГц	8	2447 МГц	13	2472 МГц
9	2	2417 МГц	8	2447 МГц	13	2472 МГц
10	3	2422 МГц	8	2447 МГц	13	2472 МГц

Наибольший интерес представляют 3-я и 8-я комбинации, т.к. в этих случаях уменьшается уровень внутрисистемных помех между сотами. В случае использования 3-й комбинации частот, внутрисистемные помехи, согласно спектральным маскам, между второй и третьей сотой дополнительно уменьшатся на 20 дБ, если используются технологии DSSS, и на 16 дБ, если используются технологии OFDM. В случае применения 8-й комбинации частот, внутрисистемные помехи между второй и третьей сотой дополнительно уменьшатся на 20 дБ (DSSS) и на 16 дБ (OFDM).

⁶⁹ Измеренные значения приведены в приложениях

В диапазоне 5,8 ГГц (стандарт 802.11a) разница между соседними частотными каналами составляет 20 МГц. Исходя из этого, можно предположить, что, при использовании технологии OFDM в диапазоне 2,4 ГГц, соседние неперекрывающиеся каналы можно разносить на 20 МГц. В этом случае существует комбинация, в которой присутствуют 4 неперекрывающихся канала: 1-й (2412 МГц), 5-й (2432 МГц), 9-й (2452 МГц) и 13-й (2472 МГц).

Распределение частот должно, в первую очередь, обеспечить межсистемную ЭМС. Поэтому следует выбирать частотные каналы с учетом межсистемных помех, обеспечивая минимальное перекрытие с рабочими частотными диапазонами других систем, функционирующих на близлежащих территориях.

Этап 6: Определение уровней сигналов в рецепторах WLAN

Уровни сигналов в соте определяются (см. табл. 3.3) в точке доступа (сигнал от наиболее удаленной МС) и в граничной МС, наиболее удаленной от АР (сигнал от точки доступа).

Эффективная изотропно-излучаемая мощность в антенне АР в i -й соте ($EIRP_{AP(i)}$) вычисляется следующим образом [6]:

$$EIRP_{AP(i)} = P_{TX_AP(i)} + G_{TX_AP(i)} - \phi_{TX_AP(i)}, \text{ дБм}; \quad (3.5)$$

где $P_{TX_AP(i)}$ - мощность передатчика АР в i -й соте, дБм;

$G_{TX_AP(i)}$ - КУ передающей антенны АР в i -й соте, дБи;

$\phi_{TX_AP(i)}$ - потери в фидере передающей антенны АР в i -й соте, дБ.

Потери в антенном фидере определяются потерями непосредственно в самом кабеле и в соединительных разъемах. Потери в соединительных разъемах можно считать равными 0,5 дБ на одно соединение [19]. Удельные потери в кабеле зависят от частоты и должны указываться поставщиком в спецификации кабеля. Например, кабель типа LMR-400 длиной 30,48 м имеет потери 10,5 дБ на частоте 5,3 ГГц и 6,5 дБ на частоте 2,4 ГГц [19]. Уменьшить потери в фидере можно двумя путями: выбрать кабель с меньшим удельным затуханием и/или уменьшить его длину. Для внутриофисных сетей антенны, как правило, подключаются непосредственно к приемопередающему тракту. Таким образом, потери в антенных фидерах уменьшаются до потерь на соединительных разъемах.

Табл. 3.3. Определение уровня сигнала

Порядковый номер соты	<i>i</i>	
Источник сигнала	АР <i>i</i> -й соты	МС <i>i</i> -й соты
Рецептор соты	МС <i>i</i> -й соты	АР <i>i</i> -й соты
Трасса	Прямая трасса АР => МС	Обратная трасса МС => АР
Мощность передатчика, дБм	$P_{TX_AP(i)}$	$P_{TX_MC(i)}$
КУ антенны передатчика, дБи	$G_{TX_AP(i)}$	G_{MC}
Потери в фидере передатчика, дБ	$\phi_{TX_AP(i)}$	0
КУ приемной антенны, дБи	G_{MC}	$G_{RX_AP(i)}$
Потери в фидере приемной антенны, дБ	0	$\phi_{RX_AP(i)}$
Потери в передающей антенне в направлении рецептора, дБ	$\Delta G_{TX_AP(i) \rightarrow MC(i)}$	0
Потери в направлении рецептора в приемной антенне, дБ	0	$\Delta G_{RX_MC(i) \rightarrow AP(i)}$
Потери в пространстве, дБ	$L_{AP(i) \rightarrow MC(i)}$	$L_{MC(i) \rightarrow AP(i)}$
Дополнительные потери на трассе, дБ	$A_{don.AP(i) \rightarrow MC(i)}$	$A_{don.MC(i) \rightarrow AP(i)}$
Запас на замирания, дБ	σ	
Уровень сигнала в рецепторе, дБм	$P_{RX_MC(i)}$	$P_{RX_AP(i)}$

Среднеквадратическое отклонение медленных замираний (σ) обычно берется равным 3,5-17 дБ для радиотрасс на открытом пространстве и 6-20 дБ для радиотрасс в помещениях [10, 23]. Разработчики беспроводного оборудования при расчете максимальной дальности радиосвязи берут запас на замирания равным 10 дБ⁷⁰. В приложениях приведен пример расчета σ в зависимости от расстояния взятый из [23].

Эффективная изотропно-излучаемая мощность в антенне МС в *i*-й соте ($EIRP_{MC(i)}$) вычисляется следующим образом (потери в фидере нулевые):

$$EIRP_{MC(i)} = P_{TX_MC(i)} + G_{MC}, \text{ дБм;} \quad (3.6)$$

где $P_{TX_MC(i)}$ - мощность передатчика АР в *i*-й соте, дБм;

G_{MC} - КУ антенны МС, дБи.

Уровень сигнала в МС определяется следующим образом:

$$P_{RX_MC(i)} = EIRP_{AP(i)} - \Delta G_{TX_AP(i) \rightarrow MC(i)} + G_{MC} - L_{AP(i) \rightarrow MC(i)} - A_{don.AP(i) \rightarrow MC(i)} - \sigma, \text{ дБм.} \quad (3.7)$$

Уровень сигнала в АР определяется следующим образом:

⁷⁰ По материалам сайтов www.cisco.com, www.hp.ru, www.dlink.ru.

$$P_{RX-AP(i)} = EIRP_{MC(i)} + G_{RX_AP(i)} - \Delta G_{RX_AP(i) \rightarrow MC(i)} - L_{MC(i) \rightarrow AP(i)} - A_{\text{дон.MC(i)} \rightarrow AP(i)} - \sigma, \text{ дБм. (3.8)}$$

Уровень сигнала на границе соты можно регулировать, изменяя параметры антенн, уровни излучаемой мощности, параметров антенных фидеров и т.д.

При использовании всенаправленных антенн, точка доступа размещается в центре соты. Соответственно, расстояние между АР и граничной МС будет равно радиусу соты:

$$d(r) = \sqrt{r^2 + \Delta h_{AP-MC}^2} = r \cdot \sqrt{1 + k_{\Delta h/r}^2}, \text{ м. (3.9)}$$

Если в точках доступа применяются всенаправленные антенны, то выражения, по которым вычисляются уровни сигналов, несколько упрощаются.

$$\Delta G_{TX_AP(i) \rightarrow MC(i)} = 0 \text{ дБ}; \Delta G_{RX_AP(i) \rightarrow MC(i)} = 0 \text{ дБ};$$

$$L_{AP(i) \rightarrow MC(i)} = L_{MC(i) \rightarrow AP(i)} = 40,2 + 20 \log(r \cdot \sqrt{1 + k_{\Delta h/r}^2}) = 40,2 + 10 \log(1 + k_{\Delta h/r}^2) + 20 \log r;$$

$$P_{RX-MC(i)} = EIRP_{AP(i)} + G_{MC} - L_{AP(i) \rightarrow MC(i)} - A_{\text{дон.AP(i)} \rightarrow MC(i)} - \sigma, \text{ дБм; (3.10)}$$

$$P_{RX-AP(i)} = EIRP_{MC(i)} + G_{RX_AP(i)} - L_{MC(i) \rightarrow AP(i)} - A_{\text{дон.MC(i)} \rightarrow AP(i)} - \sigma, \text{ дБм. (3.11)}$$

При применении направленных антенн, точка доступа обычно размещается на границе соты, расстояние между граничной МС и АР в этом случае будет равным диаметру соты (или двум радиусам):

$$d(r) = \sqrt{(2r)^2 + \Delta h_{AP-MC}^2} = r \cdot \sqrt{4 + k_{\Delta h/r}^2}, \text{ м. (3.12)}$$

Следует заметить, что уровень сигнала в граничной МС при использовании такого размещения антенн уменьшается на 6 дБ (потери в открытом пространстве) по сравнению с размещением в центре соты.

Если в точках доступа планируется применять одну общую антенну и на прием и на передачу, то:

$$G_{TX_AP(i)} = G_{RX_AP(i)} = G_{AP(i)};$$

$$\varphi_{TX_AP(i)} = \varphi_{RX_AP(i)} = \varphi_{AP(i)};$$

$$\Delta G_{TX_AP(i) \rightarrow MC(i)} = \Delta G_{RX_AP(i) \rightarrow MC(i)} = \Delta G_{AP(i) \rightarrow MC(i)};$$

$$EIRP_{AP(i)} = P_{TX_AP(i)} + G_{AP(i)} - \phi_{AP(i)};$$

$$P_{RX-MC(i)} = EIRP_{AP(i)} - \Delta G_{AP(i) \rightarrow MC(i)} + G_{MC} - L_{AP(i) \rightarrow MC(i)} - A_{\text{дон.AP(i)} \rightarrow MC(i)} - \sigma, \text{ дБм. (3.13)}$$

$$P_{RX-AP(i)} = EIRP_{MC(i)} + G_{AP(i)} - \Delta G_{AP(i) \rightarrow MC(i)} - L_{MC(i) \rightarrow AP(i)} - A_{\text{дон.MC(i)} \rightarrow AP(i)} - \sigma, \text{ дБм. (3.14)}$$

При передаче информации непосредственно между МС, уровень сигнала (при небольших расстояниях между МС) несколько увеличивается из-за уменьшения потерь распространения.

Этап 7: Определение допустимых уровней помех в рецепторах WLAN

Допустимый уровень помехи $a_{\text{доп.}}$ в рецепторе вычисляется следующим образом [6]:

$$a_{\text{доп.}} = P_{RX}(i) - \rho, \text{ дБм}, \quad (3.15)$$

где $P_{RX}(i)$ - уровень сигнала в рецепторе, дБм;

ρ - допустимое отношение сигнал/помеха в рецепторе при требуемой скорости передачи данных, дБ.

Производители оборудования, как правило, не указывают допустимое отношение сигнал/помеха. Поэтому приходится пользоваться рассчитанными значениями⁷¹.

Допустимый уровень помехи для МС (прямая трасса) и АР (обратная трасса) будут отличаться.

3.2. Анализ внутрисистемных помех

Этап 1: Определение уровня собственных шумов приемника

Как уже указывалось ранее, производители оборудования обычно указывают только чувствительность приемника, не предоставляя информацию об уровне собственных шумов приемника и рекомендуемом отношении сигнал/помеха. Эти три величины связаны между собой следующим образом [6]:

$$K = F + \rho, \text{ дБм}; \quad (3.16)$$

где K - чувствительность приемника, дБм;

F - уровень собственных шумов приемника, дБм;

ρ - допустимое отношение сигнал/помеха в приемнике, дБ.

Если известны чувствительность и допустимое отношение сигнал/помеха, можно вычислить уровень собственных шумов приемника:

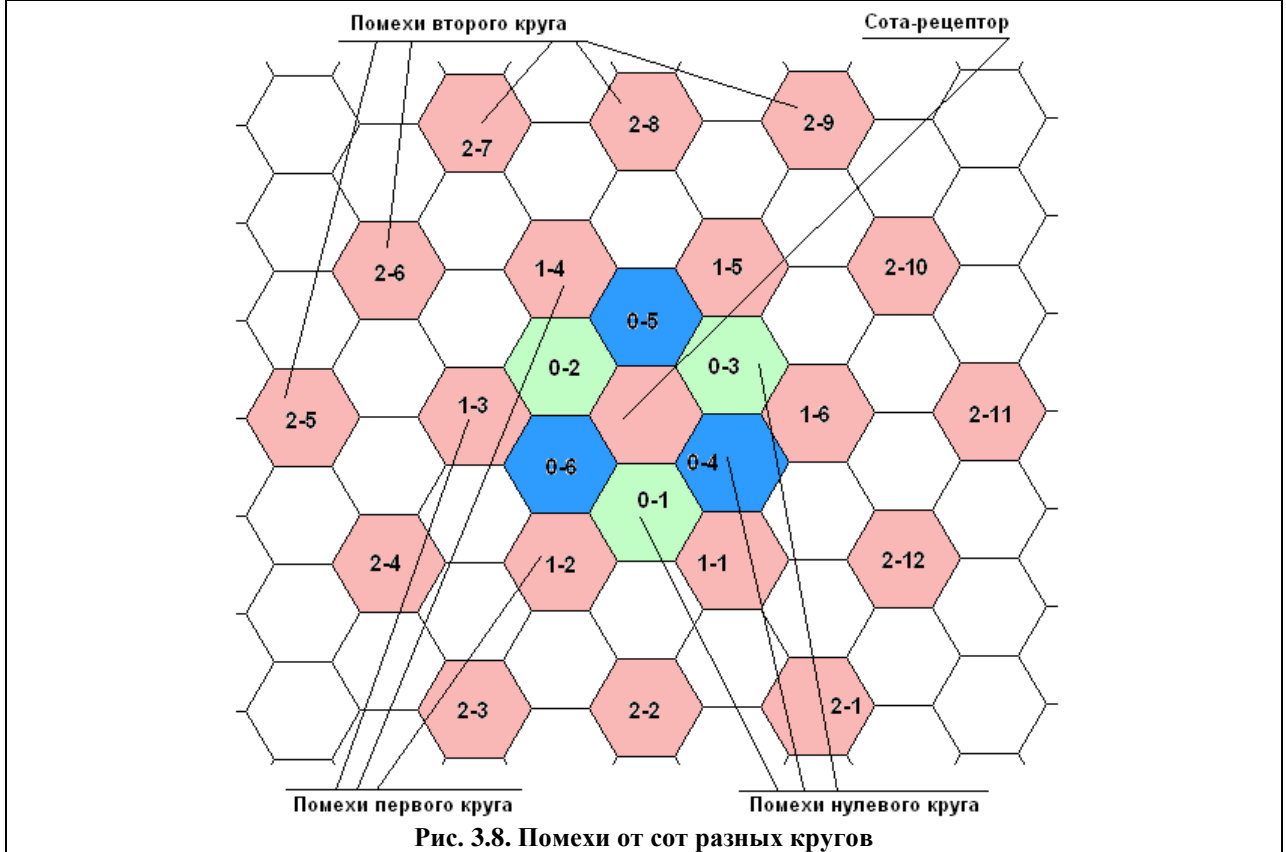
$$F = K - \rho, \text{ дБм}. \quad (3.17)$$

Уровень собственных шумов приемника определяется характеристиками оборудования. Для МС и точки доступа его величина может отличаться, поэтому при проектировании необходимо определять уровень шума приемника для МС и АР.

⁷¹ См. 1-ю главу, кодирование и модуляция

Этап 2: Оценка уровней помех от соседних сот

При анализе внутрисистемных помех необходимо получить зависимости, отображающие взаимосвязь различных параметров WLAN и уровнем помех между сотами (см. рис. 3.8).



Если выбран радиус сот, модели АР и МС, антенны АР и способ их размещения и ориентировки, комбинация используемых частотных каналов, то можно оценить уровни межсистемных помех в сотах. В работе рассмотрены помехи от 0-го и 1-го круга сот. Помехи 2, 3 и следующих кругов, еще больше увеличивают внутрисистемные помехи.

Уровни помех в МС вычисляются следующим образом (см. табл. 3.4):

$$a_{лев./np.RX_MC(j) \rightarrow MC(i)} = P_{TX_MC(j)} + 2 \cdot G_{MC} - L_{MC(j) \rightarrow MC(i)} - A_{дон.MC(j) \rightarrow MC(i)} - ch_{лев./np.}(f_j, f_i); \quad (3.18)$$

$$a_{лев./np.RX_AP(j) \rightarrow MC(i)} = P_{TX_AP(j)} + G_{TX_AP(j)} - \phi_{TX_AP(j)} + G_{MC} - \Delta G_{TX_AP(j) \rightarrow MC(i)} - L_{AP(j) \rightarrow MC(i)} - A_{дон.AP(j) \rightarrow MC(i)} - ch_{лев./np.}(f_j, f_i). \quad (3.19)$$

Уровни помех в АР вычисляются следующим образом (см. табл. 3.5):

$$a_{лев./np.RX_MC(j) \rightarrow AP(i)} = P_{TX_MC(j)} + G_{MC} + G_{RX_AP(i)} - \phi_{RX_AP(i)} - \Delta G_{RX_MC(j) \rightarrow AP(i)} - L_{MC(j) \rightarrow AP(i)} - A_{дон.MC(j) \rightarrow AP(i)} - ch_{лев./np.}(f_j, f_i); \quad (3.20)$$

$$a_{лев./np.RX_AP(j) \rightarrow AP(i)} = P_{TX_AP(j)} + G_{TX_AP(j)} - \phi_{TX_AP(j)} + G_{RX_AP(i)} - \phi_{RX_AP(i)} - \Delta G_{TX_AP(j) \rightarrow AP(i)} - \Delta G_{RX_AP(j) \rightarrow AP(i)} - L_{AP(j) \rightarrow AP(i)} - A_{дон.AP(j) \rightarrow AP(i)} - ch_{лев./np.}(f_j, f_i). \quad (3.21)$$

Табл. 3.4. Определение уровня помех в МС i-й соты от j-й соты

Порядковый номер соты источника/рецептора помехи		j / i	
Рецептор		граничная МС	
Источник помехи		граничная МС j-й соты	АР j-й соты
Трасса		МС => МС	АР => МС
Уменьшение помехи в левой или правой половине спектра частотного канала рецептора, дБ	лев	$ch_{лев.}(f_j, f_i)$	
	прав	$ch_{пр.}(f_j, f_i)$	
Мощность передатчика, дБм		$P_{TX_MC(j)}$	$P_{TX_AP(j)}$
КУ антенны передатчика, дБи		G_{MC}	$G_{TX_AP(j)}$
Потери в фидере передатчика, дБ		0	$\phi_{TX_AP(j)}$
КУ приемной антенны, дБи		G_{MC}	
Потери в фидере приемной антенны, дБ		0	
Потери в передающей антенне в направлении рецептора, дБ		0	$\Delta G_{TX_AP(j) \rightarrow MC(i)}$
Потери в направлении помехи в приемной антенне, дБ		0	0
Потери в свободном пространстве, дБ		$L_{MC(j) \rightarrow MC(i)}$	$L_{AP(j) \rightarrow MC(i)}$
Дополнительные потери на трассе, дБ		$A_{дон.MC(j) \rightarrow MC(i)}$	$A_{дон.AP(j) \rightarrow MC(i)}$
Уровень помехи в рецепторе, дБм	Лев	$a_{лев.RX_MC(j) \rightarrow MC(i)}$	$a_{лев.RX_AP(j) \rightarrow MC(i)}$
	прав	$a_{пр.RX_MC(j) \rightarrow MC(i)}$	$a_{пр.RX_AP(j) \rightarrow MC(i)}$

Составляющие, по которым вычисляется уровень межсистемной помехи можно разделить на две группы: одинаковые для всех сот и индивидуальные для каждой из сот.

Если принять значения мощности (P_{TX_AP}), величину потерь в фидерах (ϕ_{TX_AP}), КУ и ДН антенн АР (G_{TX_AP}) всех сот одинаковыми, то можно значительно упростить расчет внутрисистемных помех. Параметры МС ($P_{TX_MC}, G_{TX_MC}, \phi_{TX_MC}$) изначально берутся одинаковыми для всех сот, т.к. одни и те же МС могут перемещаться между сотами.

Значения КУ приемной антенны ($G_{RX_AP/MC}$) и потери в фидере приемной антенны ($\phi_{RX_AP/MC}$) зависят только от типа рецептора (АР или МС) и одинаковы для любой из помех.

Табл. 3.5. Определение уровней помех в AP i-й соты от j-й соты

Порядковый номер соты источника/рецептора помехи		j / i	
Рецептор		AP i-й соты	
Источник помехи		граничная MC j-й соты	AP j-й соты
Трасса		MC => AP	AP => AP
Уменьшение помехи в левой или правой половине спектра частотного канала рецептора, дБ	лев	$ch_{лев.}(f_j, f_i)$	
	прав	$ch_{np.}(f_j, f_i)$	
Мощность передатчика, дБм		$P_{TX_MC(j)}$	$P_{TX_AP(j)}$
КУ антенны передатчика, дБи		G_{MC}	$G_{TX_AP(j)}$
Потери в фидере передатчика, дБ		0	$\phi_{TX_AP(j)}$
КУ приемной антенны, дБи		$G_{RX_AP(i)}$	
Потери в фидере приемной антенны, дБ		$\phi_{RX_AP(i)}$	
Потери в передающей антенне в направлении рецептора, дБ		0	$\Delta G_{TX_AP(j) \rightarrow AP(i)}$
Потери в направлении помехи в приемной антенне, дБ		$\Delta G_{RX_MC(j) \rightarrow AP(i)}$	$\Delta G_{RX_AP(j) \rightarrow AP(i)}$
Потери в свободном пространстве, дБ		$L_{MC(j) \rightarrow AP(i)}$	$L_{AP(j) \rightarrow AP(i)}$
Дополнительные потери на трассе, дБ		$A_{доп.MC(j) \rightarrow AP(i)}$	$A_{доп.AP(j) \rightarrow AP(i)}$
Уровень помехи в рецепторе, дБм	лев	$a_{лев.RX_MC(j) \rightarrow AP(i)}$	$a_{лев.RX_AP(j) \rightarrow AP(i)}$
	прав	$a_{np.RX_MC(j) \rightarrow AP(i)}$	$a_{np.RX_AP(j) \rightarrow AP(i)}$

Потери в фидерах вычисляются так же, как при расчете уровня сигнала (см. 6-й этап 1-й стадии проектирования).

В группу индивидуальных параметров нужно включить следующие характеристики:

- потери в передающей антенне в направлении рецептора ΔG_{TX} ;
- потери в приемной антенне в направлении помехи ΔG_{RX} ;
- потери в свободном пространстве L ;
- дополнительные потери на трассе $A_{доп.}$.

Характеристики спектральной маски зависят от используемого оборудования (минимальные требования заданы стандартами⁷²). С другой стороны, уменьшение уровня внеполосного излучения (ch) зависит от разницы между рабочими частотами сот. Этот параметр нужно учитывать при сложении уровней помех от передатчиков соседних сот, работающих на разных частотных каналах.

На основе полученных формул (2.5), (3.18) ... (3.21) была составлена табл. 3.6, где $EIRP_{помехи} = P_{TX} + G_{TX} + \phi_{TX}$, а характеристики МС и АР определяют параметры соответствующих рецепторов и источников помехи.

Табл. 3.6. Составляющие помехи

Один частотный канал	
Суммирование однотипных помех (только от МС или только от АР)	$b = EIRP_{помехи} + G_{RX} - \phi_{RX}$ $c = \Delta G_{TX} + \Delta G_{RX} + L + A_{доп.}$
Суммирование разнотипных помех (суммирование помех от МС и от АР)	$b = EIRP_{АР} + G_{RX} - \phi_{RX}$ $c = (EIRP_{АР} - EIRP_{помехи}) + \Delta G_{TX} + \Delta G_{RX} + L + A_{доп.}$
Разные частотные каналы	
Суммирование однотипных помех (только от МС или только от АР)	$b = EIRP_{помехи} + G_{RX} - \phi_{RX}$ $c = \Delta G_{TX} + \Delta G_{RX} + L + A_{доп.} + ch$
Суммирование разнотипных помех (суммирование помех от МС и от АР)	$b = EIRP_{АР} + G_{RX} - \phi_{RX}$ $c = (EIRP_{АР} - EIRP_{помехи}) + \Delta G_{TX} + \Delta G_{RX} + L + A_{доп.} + ch$

Уменьшение уровней внеполосного излучения определено по спектральным маскам, приведенным в стандартах⁷³. Для реального оборудования полученные значения могут уточняться.

Из табл. 3.7 видно, что требования к уровню внеполосного излучения для технологии DSSS гораздо жестче, чем к технологии OFDM. Это означает, что уровень внутрисистемных помех при использовании DSSS ниже, чем при использовании OFDM.

Параметр d_{min} - минимальное расстояние между мешающими МС соседних сот, м. Его значение можно оценить по предлагаемому методу. Площадь соты равна $S_{соты} = \pi \cdot r^2$, м². Если разбить соту на участки одинаковой площади по

⁷² IEEE 802.11, IEEE 802.11 b/a/g [1-5]

⁷³ IEEE 802.11, IEEE 802.11 b/a/g [1-5]

числу МС в одной соте (n , шт.), то площадь, приходящаяся на каждую МС (S_{MC} , м²) будет равна:

$$S_{MC} = S_{соты} / n = \pi \cdot r^2 / n. \quad (3.22)$$

Табл. 3.7. Уменьшение уровня внеполосного излучения в соответствии со спектральными масками стандартов 802.11, 802.11b и 802.11g

Тип помехи		Помеха по перекр.каналу: $\Delta f < 25$ МГц	Помеха по сосед. каналу: $25 \leq \Delta f < 35$ МГц	Перекрестная помеха: $\Delta f \geq 35$ МГц
Уменьшение уровня помехи в соответствии со спектральной маской $ch(f_j, f_i)$, дБ	802.11 802.11b 802.11g PBCC	0 дБ	30 дБ	50 дБ
	802.11g OFDM	0 дБ	24 дБ	40 дБ

Рассчитаем радиус окружности, соответствующий площади, приходящейся на одну МС (r_{MC} , м):

$$r_{MC} = \sqrt{S_{MC} / \pi} = \sqrt{(\pi \cdot r^2 / n) / \pi} = \frac{r}{\sqrt{n}}. \quad (3.23)$$

Сделаем допущение, что МС находится в центре окружности, ограниченной площадью S_{MC} . Тогда расстояние между граничными МС разных сот, расположенными в непосредственной близости друг от друга, будет определяться расстоянием между центрами окружностей, ограниченных соответствующими S_{MC} . Расстояние между центрами касающихся окружностей равно сумме их радиусов:

$$d_{\min} = r_{1_MC} + r_{2_MC} = \frac{r_1}{\sqrt{n_1}} + \frac{r_2}{\sqrt{n_2}}; \quad (3.24)$$

где d_{\min} - минимальное расстояние между мешающими МС соседних сот, м;

r_1 и r_2 - радиусы соответствующих сот, м;

n_1 и n_2 - число МС в соответствующих сотах, м;

r_{1_MC} и r_{2_MC} - радиус окружности, соответствующий площади, приходящейся на одного пользователя для соответствующих сот, м.

Если радиусы и число пользователей соседних сот равны ($r_1 = r_2 = r$, $n_1 = n_2 = n$), минимальное расстояние между взаимодействующими МС соседних сот можно вычислить следующим образом:

$$d_{\min} = r_{MC} + r_{MC} = \frac{r}{\sqrt{n}} + \frac{r}{\sqrt{n}} = \frac{2 \cdot r}{\sqrt{n}}, \text{ м.} \quad (3.25)$$

WLAN, организованные с применением всенаправленных антенн

Для WLAN, использующих всенаправленные антенны, характерен высокий уровень взаимных помех между сотами. Поэтому всенаправленные антенны рекомендуется применять в случае, когда число сот не превышает трех.

Как и для сигнала, если в точках доступа применяются всенаправленные антенны, то выражения, по которым вычисляются уровни помех, несколько упрощаются:

$$\Delta G_{TX_AP(i) \rightarrow MC(i)} = 0 \text{ дБ}; \Delta G_{RX_AP(i) \rightarrow MC(i)} = 0 \text{ дБ};$$

Точки доступа размещаются в центрах сот. Расстояния между источниками и рецепторами помехи в этом случае показаны в приведенных далее таблицах.

В приведенных таблицах (табл. 3.8, 3.9, 3.10, 3.11) представлен расчет уровней помех в случае, если дополнительные потери в антенном фидере ϕ_{AP} и потери на трассе $A_{don.}$ нулевые, а $k_{\Delta h/r}^2 = 0,05 \dots 1$ (для худшего случая берем наименьшее значение).

Табл. 3.8. Помехи в граничной МС по соседнему каналу (0-й круг, всенаправленные антенны)

Номера сот ист. помех	Расстояние между источником помехи и рецептором: $d(r)$, м; Потери в пространстве: $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg(d)$, дБ.	Доп. потери на трассе, $A_{don.}$, дБ	Примечания
0-1 МС	$d(r) = d_{\min} = 1 \dots 3$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg d_{\min} = 40,2 + (0 \dots 9)$	$A_{don.MC(j) \rightarrow AP(i)}$	При выполнении неравенств $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \leq 20$ дБ и $r \geq 8,9$ м, то помеха будет определяться граничной МС соты
0-1 АР	$d(r) = \sqrt{0,75 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(0,75 + k_{\Delta h/r}^2)$	$A_{don.AP(j) \rightarrow AP(i)}$	
0-2 0-3 МС	$d(r) = \sqrt{3} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(3 + k_{\Delta h/r}^2)$	$A_{don.MC(j) \rightarrow AP(i)}$	Помехи от сот определяются по АР, если $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 3,68$ дБ, в противном случае по МС
0-2 0-3 АР	$d(r) = \sqrt{7 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(7 + k_{\Delta h/r}^2)$	$A_{don.AP(j) \rightarrow AP(i)}$	

Табл. 3.9. Помехи в АР по соседнему каналу (0-й круг, всенаправленные антенны)

Номера сот ист. помехи	Расстояние между источником помехи и рецептором: $d(r)$, м; Потери в пространстве: $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg(d)$, дБ.	Доп. потери на трассе, $A_{don.}$, дБ	Примечания
0-1...0-3 МС	$d(r) = \sqrt{0,75 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(0,75 + k_{\Delta h/r}^2)$	$A_{don.MC(j) \rightarrow AP(i)}$	Помехи от сот определяются по АР, если $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 6,02$ дБ, в противном случае по МС
0-1...0-3 АР	$d(r) = \sqrt{3} \cdot r$ $L(d(r)) = 44,97 + 20 \lg r$	$A_{don.AP(j) \rightarrow AP(i)}$	

Табл. 3.10. Помехи в граничной МС (1-й круг, всенаправленные антенны)

Номера сот ист. помех	Расстояние между источником помехи и рецептором: $d(r)$, м; Потери в пространстве: $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg(d)$, дБ.	Доп. потери на трассе, $A_{\text{дон}}$, дБ	Примечания
1-1 МС	$d(r) = r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r$	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$	Помехи от сот определяются по АР, если $EIRP_{\text{АР}} - EIRP_{\text{МС}} \geq 6,02$ дБ, в противном случае по МС
1-1 АР	$d(r) = \sqrt{4 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(4 + k_{\Delta h/r}^2)$	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$	
1-2, 1-6 МС	$d(r) = \sqrt{3} \cdot r$ $L(d(r)) = 44,97 + 20\lg r$	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$	Помехи от сот определяются по АР, если $EIRP_{\text{АР}} - EIRP_{\text{МС}} \geq 3,68$ дБ, в противном случае по МС
1-2, 1-6 АР	$d(r) = \sqrt{7 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(7 + k_{\Delta h/r}^2)$	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$	
1-3, 1-5 МС	$d(r) = \sqrt{7} \cdot r$ $L(d(r)) = 48,65 + 20\lg r$	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$	Помехи от сот определяются по АР, если $EIRP_{\text{АР}} - EIRP_{\text{МС}} \geq 2,69$ дБ, в противном случае по МС
1-3, 1-5 АР	$d(r) = \sqrt{13 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(13 + k_{\Delta h/r}^2)$	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$	
1-4 МС	$d(r) = 3r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20\lg r$	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$	Помехи от сот определяются по АР, если $EIRP_{\text{АР}} - EIRP_{\text{МС}} \geq 2,5$ дБ, в противном случае по МС
1-4 АР	$d(r) = \sqrt{16 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(16 + k_{\Delta h/r}^2)$	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$	

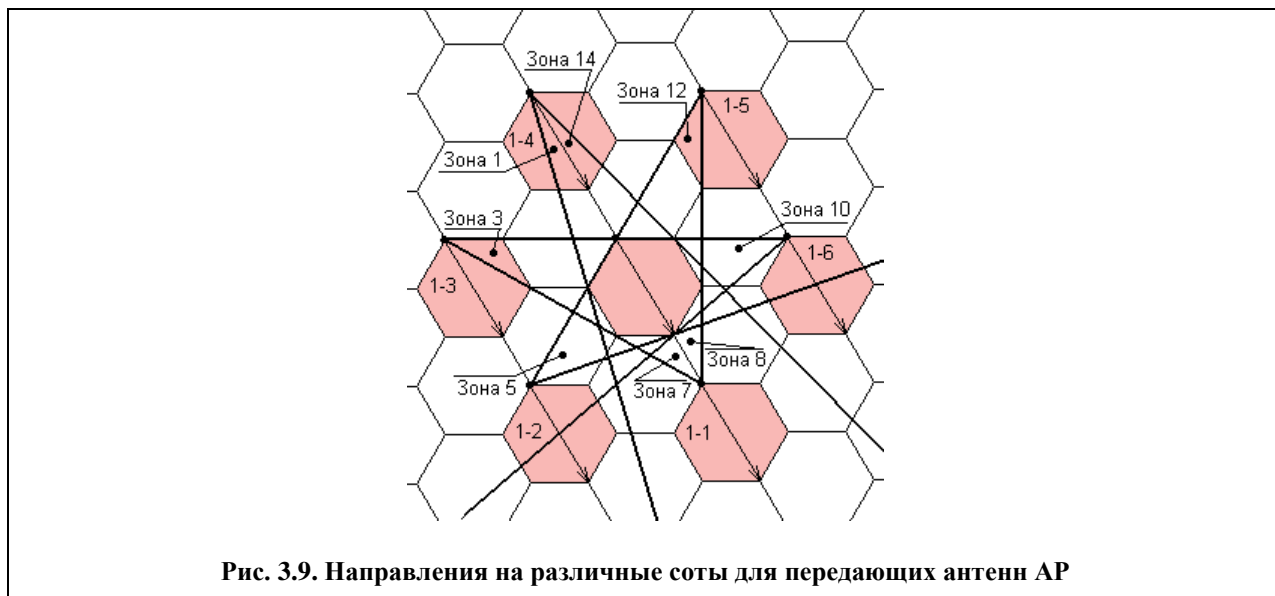
Табл. 3.11. Помехи в АР по перекрывающемуся каналу (1-й круг, всенаправленные антенны)

Номера сот ист. помехи	Расстояние между источником помехи и рецептором: $d(r)$, м; Потери в пространстве: $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg(d)$, дБ.	Доп. потери на трассе, $A_{\text{дон}}$, дБ	Примечания
1-1 ... 1-6 МС	$d(r) = \sqrt{4 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(4 + k_{\Delta h/r}^2)$	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{АР}(i)}$	Помехи от сот определяются по АР, если $EIRP_{\text{АР}} - EIRP_{\text{МС}} \geq 3,51$ дБ, в противном случае по МС
1-1 ... 1-6 АР	$d(r) = 3 \cdot r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20\lg r$	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{АР}(i)}$	

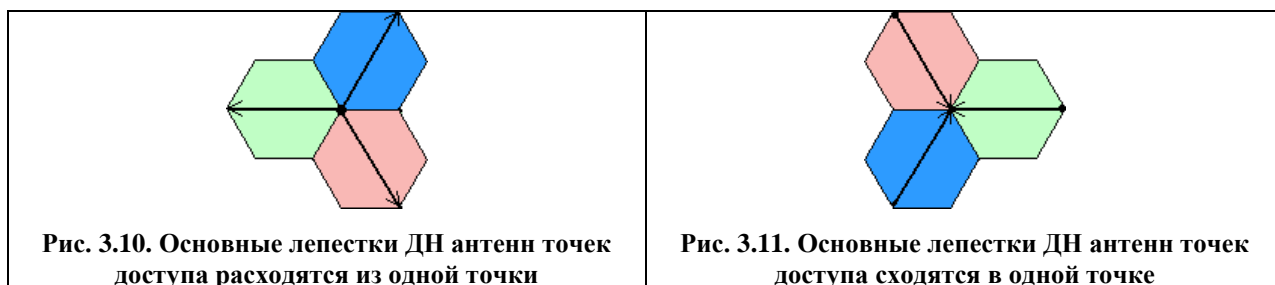
WLAN, организованные с применением направленных антенн

Для WLAN, использующих направленные антенны, характерен как меньший уровень помех между сотами, так и межсистемных помех, по сравнению со всенаправленными антеннами. Недостатком такого размещения антенн является то, что уровень сигнала (в граничной МС и в АР) снижается на 6 дБ за счет увеличения максимального расстояния между ними в 2 раза. Некоторый выигрыш в отношении сигнал/помеха может дать возможность регулирования мощности излучения МС.

На рис. 3.9 показан один из способов размещения и ориентировки антенн АР, работающих на одном частотном канале. Преимуществом предложенной схемы является возможность достаточно простого расширения сети.



Размещать точки доступа, работающие на неперекрывающихся каналах, сохраняя способность беспроводной сети к масштабированию, можно используя одну из предложенных ниже схем размещения и ориентировки антенн АР (см. рис. 3.10, 3.11).



В работе рассмотрены только эти варианты размещения антенн АР (см. табл. 3.12 ... 3.18). При проектировании можно выбрать другие варианты размещения и ориентировки антенн АР и провести анализ по предложенной методике.

Табл. 3.12. Помехи в граничной МС по соседнему каналу (0-й круг, направленные антенны, ДН расходятся из одной точки)

Номера сот ист. помехи	Расстояние между источником помехи и рецептором: $d(r)$, м; Потери в пространстве: $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg(d)$, дБ.	Отклонение от основного лепестка в антеннах		Доп. потери на трассе, $A_{\text{дон.}}$, дБ
		Пер. антенна	Пр. антенна	
0-1 0-4 МС	$d(r) = d_{\min} = 1 \dots 3$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg d_{\min} = 40,2 + (0 \dots 9)$	0	0	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
0-1 0-4 АР	$d(r) = \sqrt{1 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(1 + k_{\Delta h/r}^2)$	30°...90° 270°...330°	0	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
0-2 0-5 МС	$d(r) = \sqrt{3} \cdot r$ $L(d(r)) = 44,97 + 20\lg r$	0	0	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
0-2 0-5 АР	$d(r) = \sqrt{4 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(4 + k_{\Delta h/r}^2)$	180°...300° 60°...180°	0	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
0-3 0-6 МС	$d(r) = r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r$	0	0	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
0-3 0-6 АР	$d(r) = \sqrt{7 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(7 + k_{\Delta h/r}^2)$	319,11°...0° 0°...40,89°	0	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$

Табл. 3.13. Помехи в граничной МС по соседнему каналу (0-й круг, направленные антенны, ДН сходятся в одной точке)

Номера сот ист. помехи	Расстояние между источником помехи и рецептором: $d(r)$, м; Потери в пространстве: $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg(d)$, дБ.	Отклонение от основного лепестка в антеннах		Доп. потери на трассе, $A_{\text{дон.}}$, дБ
		Пер. антенна	Пр. антенна	
0-1 0-4 МС	$d(r) = d_{\min} = 1 \dots 3$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg d_{\min} = 40,2 + (0 \dots 9)$	0	0	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
0-1 0-4 АР	$d(r) = \sqrt{4 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(2 + k_{\Delta h/r}^2)$	319,11°...0° 0°...40,89°	0	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
0-2 0-5 МС	$d(r) = \sqrt{3} \cdot r$ $L(d(r)) = 44,97 + 20\lg r$	0	0	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
0-2 0-5 АР	$d(r) = \sqrt{7 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(7 + k_{\Delta h/r}^2)$	30°...90° 270°...330°	0	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
0-3 0-6 МС	$d(r) = r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r$	0	0	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
0-3 0-6 АР	$d(r) = \sqrt{1 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(1 + k_{\Delta h/r}^2)$	180°...300° 60°...180°	0	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$

Табл. 3.14. Помехи в АР по соседнему каналу (0-й круг, направленные антенны, ДН расходятся из одной точки)

Номера сот, ист. Помехи	Расстояние между источником помехи и рецептором: $d(r)$, м; Потери в пространстве: $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg(d)$, дБ.	Отклонение от основного лепестка в антеннах		Доп. потери на трассе, $A_{\text{дон}}$, дБ
		Пер. антенна	Пр. антенна	
0-1 0-4 MC	$d(r) = \sqrt{3 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(3 + k_{\Delta h/r}^2)$	0	$0^\circ \dots 40,89^\circ$ $319,11^\circ \dots 0^\circ$	$A_{\text{дон.MC}(j) \rightarrow \text{MC}(i)}$
0-1 0-4 AP	$d(r) = \sqrt{9} \cdot r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20 \lg r$	300° 0	0° 60°	$A_{\text{дон.AP}(j) \rightarrow \text{MC}(i)}$
0-2 0-5 MC	$d(r) = \sqrt{k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 20 \lg k_{\Delta h/r}$	0	$60^\circ \dots 180^\circ$ $180^\circ \dots 300^\circ$	$A_{\text{дон.MC}(j) \rightarrow \text{MC}(i)}$
0-2 0-5 AP	$d(r) = d_{\min} = 1 \dots 3$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg d_{\min} = 40,2 + (0 \dots 9)$	210° 150°	150° 210°	$A_{\text{дон.AP}(j) \rightarrow \text{MC}(i)}$
0-3 0-6 MC	$d(r) = \sqrt{1 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(1 + k_{\Delta h/r}^2)$	0	$270^\circ \dots 330^\circ$ $30^\circ \dots 90^\circ$	$A_{\text{дон.MC}(j) \rightarrow \text{MC}(i)}$
0-3 0-6 AP	$d(r) = \sqrt{9} \cdot r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20 \lg r$	0° 300°	60° 0°	$A_{\text{дон.AP}(j) \rightarrow \text{MC}(i)}$

Табл. 3.15. Помехи в АР по соседнему каналу (0-й круг, направленные антенны, ДН сходятся в одной точке)

Номера сот, ист. Помехи	Расстояние между источником помехи и рецептором: $d(r)$, м; Потери в пространстве: $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg(d)$, дБ.	Отклонение от основного лепестка в антеннах		Доп. потери на трассе, $A_{\text{дон}}$, дБ
		Пер. антенна	Пр. антенна	
0-1 0-4 MC	$d(r) = \sqrt{3 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(3 + k_{\Delta h/r}^2)$	0	$0^\circ \dots 40,89^\circ$ $319,11^\circ \dots 0^\circ$	$A_{\text{дон.MC}(j) \rightarrow \text{MC}(i)}$
0-1 0-4 AP	$d(r) = \sqrt{12} \cdot r$ $L(d(r)) = 50,99 + 20 \lg r$	330° 30°	30° 330°	$A_{\text{дон.AP}(j) \rightarrow \text{MC}(i)}$
0-2 0-5 MC	$d(r) = \sqrt{k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 20 \lg k_{\Delta h/r}$	0	$60^\circ \dots 180^\circ$ $180^\circ \dots 300^\circ$	$A_{\text{дон.MC}(j) \rightarrow \text{MC}(i)}$
0-2 0-5 AP	$d(r) = \sqrt{3} \cdot r$ $L(d(r)) = 44,97 + 20 \lg r$	30° 330°	90° 270°	$A_{\text{дон.AP}(j) \rightarrow \text{MC}(i)}$
0-3 0-6 MC	$d(r) = \sqrt{1 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(1 + k_{\Delta h/r}^2)$	0	$270^\circ \dots 330^\circ$ $30^\circ \dots 90^\circ$	$A_{\text{дон.MC}(j) \rightarrow \text{MC}(i)}$
0-3 0-6 AP	$d(r) = \sqrt{3} \cdot r$ $L(d(r)) = 44,97 + 20 \lg r$	270° 90°	330° 30°	$A_{\text{дон.AP}(j) \rightarrow \text{MC}(i)}$

Табл. 3.16. Помехи в граничной МС (1-й круг, направленные антенны)

Номера сот ист. помехи	Расстояние между источником помехи и рецептором: $d(r)$, м; Потери в пространстве: $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg(d)$, дБ.	Отклонение от основного лепестка в антеннах		Доп. потери на трассе, $A_{\text{дон}}$, дБ
		Пер. антенна	Пр. антенна	
1-1 МС	$d(r) = r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r$	0	0	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
1-1 АР	$d(r) = \sqrt{1 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(1 + k_{\Delta h/r}^2)$	150°...210°	0	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
1-2, 1-6 МС	$d(r) = \sqrt{3} \cdot r$ $L(d(r)) = 44,97 + 20 \lg r$	0	0	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
1-2, 1-6 АР	$d(r) = \sqrt{7 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(7 + k_{\Delta h/r}^2)$	240°...280,9° 79,1°...120°	0	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
1-3, 1-5 МС	$d(r) = \sqrt{7} \cdot r$ $L(d(r)) = 48,65 + 20 \lg r$	0	0	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
1-3, 1-5 АР	$d(r) = \sqrt{19 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(19 + k_{\Delta h/r}^2)$	300°...330° 30°...60°	0	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
1-4 МС	$d(r) = 3r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20 \lg r$	0	0	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$
1-4 АР	$d(r) = \sqrt{25 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(25 + k_{\Delta h/r}^2)$	346,1°...13,9°	0	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$

Табл. 3.17. Помехи в АР (1-й круг, направленные антенны)⁷⁴

Номера сот ист. помех	Расстояние между источником помехи и рецептором: $d(r)$, м; Потери в пространстве: $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg(d)$, дБ.	Отклонение от основного лепестка в антеннах		Доп. потери на трассе, $A_{\text{дон}}$, дБ
		Пер. антенна	Пр. антенна	
1-1 МС	$d(r) = \sqrt{1 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(1 + k_{\Delta h/r}^2)$	0	346,1°...13,9°	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{АР}(i)}$
1-1 АР	$d(r) = \sqrt{9} \cdot r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20 \lg r$	180°	0	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{АР}(i)}$
1-2, 1-6 МС	$d(r) = \sqrt{3 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(3 + k_{\Delta h/r}^2)$	0	30°...60° 300°...330°	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{АР}(i)}$
1-2, 1-6 АР	$d(r) = \sqrt{9} \cdot r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20 \lg r$	240° 120°	60° 300°	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{АР}(i)}$
1-3, 1-5 МС	$d(r) = \sqrt{7 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(7 + k_{\Delta h/r}^2)$	0	79,1°...120° 240°...280,1°	$A_{\text{дон.МС}(j) \rightarrow \text{АР}(i)}$
1-3, 1-5 АР	$d(r) = \sqrt{9} \cdot r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20 \lg r$	300° 60°	120° 240°	$A_{\text{дон.АР}(j) \rightarrow \text{АР}(i)}$

⁷⁴ См. продолжение таблицы на следующей странице

Номера сот ист. помех	Расстояние между источником помехи и рецептором: $d(r)$, м; Потери в пространстве: $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg(d)$, дБ.	Отклонение от основного лепестка в антеннах		Доп. потери на трассе, $A_{доп.}$, дБ
		Пер. антенна	Пр. антенна	
1-4 MC	$d(r) = \sqrt{9 + k_{\Delta h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(9 + k_{\Delta h/r}^2)$	0	150°...210°	$A_{доп. MC(j) \rightarrow AP(i)}$
1-4 AP	$d(r) = \sqrt{9} \cdot r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20 \lg r$	0	180°	$A_{доп. AP(j) \rightarrow AP(i)}$

3.3. Анализ взаимного влияния параметров и выбор режимов работы беспроводной сети

На этой стадии проектирования на основании полученных зависимостей уровней сигналов и помех в сотах необходимо окончательно выбрать режимы работы WLAN:

- скорость работы;
- рабочие частотные каналы;
- оборудование с требуемыми характеристиками (модели точек доступа, антенны AP и антенные фидеры, модели MC);
- уровни мощностей передатчиков AP и MC;
- радиус сот;
- расположение, ориентиры и высоту установки антенн AP в сотах.

Параметры WLAN необходимо выбирать таким образом, что бы обеспечить максимальное отношение сигнал/помеха в рецепторах WLAN. Для оценки отношения сигнал/помеха необходимо вычислить суммарную внутрисистемную помеху (a_{AP_INT} и a_{MC_INT}), которая складывается из помех от соседних сот (a_{AP} и a_{MC}) и уровня собственных шумов приемника (F_{AP} и F_{MC}). Помехой от соседней соты считается наибольшая помеха от AP или MC соты. В табл. 3.18 показаны различные методы, позволяющие добиться наибольшего отношения сигнал/помеха в рецепторах WLAN.

При использовании разработанных алгоритмов механизма резервирования среды передачи исключаются внутрисистемные помехи между сотами, работающими на одном частотном канале. Поэтому, при расчете суммарного уровня помех, будут действовать только помехи от соседних сот, работающих на неперекрывающихся частотных каналах (0-й круг). Для уменьшения падения пропускной способности из-за распределения ее между соседними сотами, необходимо добиваться минимальной мощности излучения мобильных станций и точек доступа.

Табл. 3.18. Методы увеличения отношения сигнал/помеха в рецепторах

Метод	Применение	Возможности
Подбор сочетания максимально возможной EIRP МС и точек доступа. Регулируется с помощью изменения: <ul style="list-style-type: none"> • мощности передатчиков МС и АР; • КУ антенн АР; • потерь в антенном фидере АР. 	Рекомендуется к обязательному использованию при проектировании.	Позволяет подобрать сочетание EIRP МС и АР, при котором обеспечивается максимальное отношение сигнал/помеха в рецепторах.
Уменьшить радиус сот	Если собственный шум приемника сопоставим с чувствительностью приемника или уровнем помех в нем; если в рецепторе необходимо увеличить допустимый уровень межсистемных помех.	Позволяет увеличить уровни сигналов в рецепторах WLAN.
Использовать точки доступа с меньшим уровнем собственных шумов приемника.	Если собственный шум приемника выше или сопоставим с уровнем помех от мешающих передатчиков.	Позволяет снизить уровень помех в рецепторе. Следует применять, если требуется увеличить радиус сот.
Использовать режим передачи с меньшими требованиями к отношению сигнал/помеха (уменьшая скорость передачи).	Если уровень помех превышает допустимый.	Позволяет увеличить допустимый уровень помех в рецепторах WLAN.
Использовать точки доступа с меньшими требованиями к отношению сигнал/помеха.	Если уровень помех превышает допустимый.	Позволяет увеличить допустимый уровень помех в рецепторах WLAN.
Использовать точки доступа с меньшим уровнем внеполосного излучения.	Для уменьшения помех от сот нулевого круга.	Позволяет снизить уровень помех от соседних сот, работающих на неперекрывающихся частотных каналах.
Использовать режим передачи с меньшим уровнем внеполосного излучения (например режим работы в стандарте IEEE 802.11b вместо IEEE 802.11g);	Для уменьшения помех от сот нулевого круга.	Позволяет снизить уровень помех от соседних сот, работающих на неперекрывающихся частотных каналах.
Использовать несколько приемных антенн в точке доступа.	Используется, если необходимо увеличить уровень сигнала в АР.	При приеме точкой доступа автоматически выбирается антенна, уровень сигнала в которой выше. Позволяет уменьшить запас на замирания сигнала в точке доступа.
Использовать оборудование, реализующее функцию регулирования мощности передатчика ⁷⁵ .	Используется, если антенны АР установлены на границе сот (направленные антенны).	Позволяет уменьшить уровни помех от соседних сот.
Заменить антенны, используемые в АР.	-//-	Необходимо производить повторную оценку внутрисистемных помех.
Использовать другое размещение и ориентировку антенн АР.	-//-	Необходимо производить повторную оценку внутрисистемных помех.

⁷⁵ Например оборудование фирмы Cisco

В МС и АР уровни помех могут отличаться, также различными будут и допустимые уровни помех ($P_{AP_доп.ур.помех}$ и $P_{МС_доп.ур.помех}$). Если уровень суммарной внутрисистемной помехи (в АР или МС) превышает допустимый, то связи с приемлемым качеством между АР и граничной МС не будет. В этом случае необходимо оценить уменьшение радиуса зоны обслуживания.

Следующим шагом будет вычисление дефицита в уровне сигнала в МС и АР:

$$\partial P_{МС} = a_{МС_INT} - P_{МС_доп.ур.помех}; \quad \partial P_{АР} = a_{АР_INT} - P_{АР_доп.ур.помех}; \quad (3.26)$$

где $\partial P_{МС}$ - дефицит уровня сигнала в МС, дБ;

$\partial P_{АР}$ - дефицит уровня сигнала в АР, дБ;

$a_{МС_INT}$ и $a_{АР_INT}$ - суммарные уровни внутрисистемных помех в МС и АР, дБм;

$P_{МС_доп.ур.помех}$ и $P_{АР_доп.ур.помех}$ - допустимые уровни помех в МС и АР, дБм.

Далее по дефициту в уровне сигнала вычисляется уменьшение зоны обслуживания. При этом также необходимо учесть уменьшение дополнительных потерь на трассе распространения между МС и АР:

$$\partial P - \Delta A_{доп.}(n) = 20 \log(n); \quad (3.27)$$

где ∂P - дефицит уровня сигнала, дБ;

n - уменьшение радиуса сот, раз;

$\Delta A_{доп.}(n)$ - уменьшение дополнительных потерь на трассе распространения сигнала в зависимости от уменьшения радиуса сот, дБ.

Если $\Delta A_{доп.}(n) = 0$, то можно вычислить уменьшение радиуса сот:

$$\begin{aligned} \partial P &= 20 \log(n); \\ 20 \cdot \log 10^{\partial P/20} &= 20 \log(n); \\ n &= 10^{\partial P/20}. \end{aligned} \quad (3.28)$$

В качестве примеров можно привести соответствия: при $\partial P=6$ дБ, $n=2$ или 50%, при $\partial P=12$ дБ, $n=4$ или 75%, $\partial P=0,8$ дБ, $n=1,1$ или 9%. Зону, ограниченную параметром n , можно назвать зоной гарантированной связи.

Если суммарная внутрисистемная помеха определяется помехами от соседних сот, то уменьшение радиуса сот означает, что соседние соты образуют единый коллизийный домен, разделяя полосу пропускания между собой. В незагруженной беспроводной сети – это, как минимум, может привести к некоторому уменьшению реальной пропускной способности. В загруженной WLAN высокие внутрисистемные

помехи, скорее всего, приведут к полной неработоспособности сети вне зоны гарантированной связи.

В табл. 3.19 ... 3.24 приведен расчет суммарного уровня помех от соседних сот для WLAN, в которых к точкам доступа подключены всенаправленные антенны⁷⁶.

Табл. 3.19. Суммарная внутрисистемная помеха по соседнему каналу в граничной МС (0-й круг, всенаправленные антенны)

Тип помехи	Потери в уровне суммарной помехи на трассе, препятствиях, направлении, дБ	Выводы, замечания
Помехи от МС	$40,2 + 20 \lg d_{\min}$	Если $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 3,68$ дБ и $r \geq 8,9$ м
Помехи от AP	$40,2 + 20 \lg r + 10 \lg(7 + k_{\Delta h/r}^2) - 10 \lg 2 =$ $= 45,64 + 20 \lg r$	

Табл. 3.20. Суммарная внутрисистемная помеха по перекрывающемуся каналу в граничной МС (1-й круг, всенаправленные антенны)

Тип помехи	Потери в уровне суммарной помехи на трассе, препятствиях, направлении, дБ	Выводы, замечания
Помехи от AP	$52,24 + 20 \lg r - 10 \lg \left(10^{\frac{6,02}{10}} + 2 \cdot 10^{\frac{3,59}{10}} + 2 \cdot 10^{\frac{0,9}{10}} + 10^0 \right) =$ $= 52,24 + 20 \lg r - 10 \lg(12,03) = 41,44 + 20 \lg r$	Если $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 6,02$ дБ

Поскольку потери в уровне помехи (рецептор – МС) от AP по соседнему каналу значительно больше, чем потери в уровне помехи от AP по перекрывающемуся каналу (при $ch = 24$ дБ, разница составит $45,64 - 41,44 + 24 = 28,2$ дБ), то помехами от AP, работающих на соседних каналах можно пренебречь (см. суммирование уровней помех).

Табл. 3.21. Суммарная внутрисистемная помеха в граничной МС (всенаправленные антенны)

Тип помехи	Потери в уровне суммарной помехи на трассе, препятствиях, направлении, разнице в рабочих частотах, дБ	Выводы, замечания
Помехи от МС	$40,2 + ch + 20 \lg d_{\min}$	Если $r \geq 8,9$ м
Помехи от AP	$41,44 + 20 \lg r$	Если $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 6,02$ дБ

Исходя из полученных значений (см. табл. 3.19 ... 3.21), можно рассчитать зависимость суммарного уровня помех в граничной МС от размера прямой трассы, значений $EIRP_{AP}$ и $EIRP_{MC}$:

$$a_{RX_MC} = G_{MC} + 10 \lg \left(10^{\frac{(EIRP_{MC} - 40,2 - ch - 20 \lg d_{\min})}{10}} + 10^{\frac{(EIRP_{AP} - 41,44 - 20 \lg r)}{10}} \right);$$

⁷⁶ Начало расчета см. в табл. 3-8 ... 3-11

$$a_{RX_MC} = G_{MC} + 10 \lg \left(10^{\frac{(EIRP_{MC} - 40,2 - ch - 20 \lg(2 \cdot r / \sqrt{n}))}{10}} + 10^{\frac{(EIRP_{AP} - 41,44 - 20 \lg r)}{10}} \right);$$

$$a_{RX_MC} = G_{MC} + 10 \lg \left(10^{\frac{(EIRP_{MC} - 40,2 - ch - 20 \lg r - 20 \lg(2) + 20 \lg \sqrt{n})}{10}} + 10^{\frac{(EIRP_{AP} - 41,44 - 20 \lg r)}{10}} \right);$$

$$a_{RX_MC} = G_{MC} - 40,2 - 20 \lg r + 10 \lg \left(10^{\frac{(EIRP_{MC} - ch - 6,02 + 10 \lg n)}{10}} + 10^{\frac{(EIRP_{AP} - 1,24)}{10}} \right), \text{ дБм. (3.29)}$$

Расчет суммарного уровня помех в АР (см. табл. 3.22 ... 3.24) проводится аналогично. Поскольку потери в уровне помехи от АР по соседнему каналу значительно больше, чем потери в уровне помехи от АР по перекрывающемуся каналу (при $ch = 24$ дБ, разница составит $40,2 - 41,96 + 24 = 22,24$ дБ), то помехами от АР, работающих на соседних каналах можно пренебречь (см. суммирование уровней помех).

Табл. 3.22. Суммарная внутрисистемная помеха в АР (0-й круг, всенаправленные антенны)

Тип помехи	Потери в уровне суммарной помехи на трассе, препятствиях, направлении, дБ	Выводы, замечания
Помехи от АР	$44,97 + 20 \lg r - 10 \lg(3 \cdot 10^0) =$ $= 40,2 + 20 \lg r$	Если $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 6,02$ дБ

Табл. 3.23. Суммарная внутрисистемная помеха в АР (1-й круг, всенаправленные антенны)

Тип помехи	Потери в уровне суммарной помехи на трассе, препятствиях, направлении, дБ	Выводы, замечания
Помехи от АР	$49,74 + 20 \lg r - 10 \lg(6 \cdot 10^0) =$ $= 41,96 + 20 \lg r$	Если $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 3,51$ дБ

Табл. 3.24. Суммарная внутрисистемная помеха в АР (всенаправленные антенны)

Тип помехи	Потери в уровне суммарной помехи на трассе, препятствиях, направлении, разнице в рабочих частотах, дБ	Выводы, замечания
Помехи от АР	$41,96 + 20 \lg r$	Если $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 6,02$ дБ

Уровень внутрисистемной помехи в АР вычисляется следующим образом:

$$a_{RX_AP} = EIRP_{AP} + G_{AP} - 41,96 - 20 \lg r, \text{ дБм. (3.30)}$$

Если сеть состоит из 2-х или 3-х сот, работающих на неперекрывающихся частотных каналах, то уровень внутрисистемных помех вычисляется по 0-му кругу с учетом уменьшения уровня внеполосного излучения:

$$a_{RX_MC} = EIRP_{MC} + G_{MC} - 40,2 - 20 \lg d_{\min} - ch;$$

$$a_{RX_MC} = EIRP_{MC} + G_{MC} - 40,2 - 20 \lg(2 \cdot r / \sqrt{n}) - ch;$$

$$a_{RX_MC} = EIRP_{MC} + G_{MC} - 40,2 - 20\log(2) - 20\log r + 20\log \sqrt{n} - ch;$$

$$a_{RX_MC} = EIRP_{MC} + G_{MC} - 46,22 - 20\log r + 10\log n - ch, \text{ дБм}; \quad (3.31)$$

$$a_{RX_AP} = EIRP_{AP} + G_{AP} - 40,2 - 20\log r - ch, \text{ дБм}. \quad (3.32)$$

Если в рецепторах WLAN уровни собственных шумов приемников и уровни межсистемных помех значительно меньше суммарного уровня помех от соседних сот, то отношения сигнал/помеха можно оценить по формулам, полученным из (2.3), (2.5), (2.6), (3.10), (3.11), (3.13), (3.14), (3.25), (3.29) ... (3.32).

Отношения сигнал/помеха в MC (с учетом помех 0-го и 1-го круга):

$$P_{RX-MC} - a_{RX_MC} = EIRP_{AP} - \sigma - G_{MC} - 10\lg \left(10^{\frac{EIRP_{MC} - ch - 6,02 + 10\log n}{10}} + 10^{\frac{EIRP_{AP} - 1,24}{10}} \right);$$

$$P_{RX-MC} - a_{RX_MC} = -\sigma - G_{MC} - 10\lg \left(10^{\frac{EIRP_{MC} - EIRP_{AP} - ch - 6,02 + 10\log n}{10}} + 0,75 \right), \text{ дБ}; \quad (3.33)$$

$$P_{RX-AP} - a_{RX_AP} = EIRP_{MC} - EIRP_{AP} - \sigma + 1,76, \text{ дБ}; \quad (3.34)$$

Для сети состоящей из 2-х или 3-х сот, работающих на неперекрывающихся частотных каналах получаем следующие зависимости:

$$P_{RX-MC} - a_{RX_MC} = EIRP_{AP} - EIRP_{MC} - 20\log r - \sigma + 20\log d_{\min} + ch;$$

$$P_{RX-MC} - a_{RX_MC} = EIRP_{AP} - EIRP_{MC} - \sigma + 6,02 - 10\log n + ch, \text{ дБ}; \quad (3.35)$$

$$P_{RX-AP} - a_{RX_AP} = EIRP_{MC} - EIRP_{AP} - \sigma + ch, \text{ дБ}. \quad (3.36)$$

Необходимо отметить, что приведенные формулы (3.29) ... (3.36) получены для случаев, заданным соотношением⁷⁷:

$$EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 6,02 \text{ дБ}. \quad (3.37)$$

Подробный анализ уровней внутрисистемных помех в беспроводных сетях, использующих направленные антенны, не приведен из-за громоздкости вычислений. Однако с помощью разработанной программы для расчета WLAN можно получить различные зависимости, помогающие рационально выбрать параметры и режимы работы WLAN.

⁷⁷ См. табл. 3-8 ... 3-11, 3-19 ... 3-24

3.4. Анализ межсистемной ЭМС

Этап 1: Определение допустимого уровня межсистемных помех

Допустимый уровень межсистемной помехи можно вычислить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 a_{\text{дон.}} &= 10 \lg P_{\text{дон.}}; & a_{\text{INT}} &= 10 \lg P_{\text{INT}}; & a_{\text{EXT}} &= 10 \lg P_{\text{EXT}}; \\
 P_{\text{дон.}} &= 10^{\frac{a_{\text{дон.}}}{10}}; & P_{\text{INT}} &= 10^{\frac{a_{\text{INT}}}{10}}; & P_{\text{EXT}} &= 10^{\frac{a_{\text{EXT}}}{10}}; \\
 P_{\text{INT}} + P_{\text{EXT}} + F_{\text{мВт}} &\leq P_{\text{дон.}}; & 10^{\frac{a_{\text{INT}}}{10}} + 10^{\frac{a_{\text{EXT}}}{10}} + 10^{\frac{F}{10}} &\leq 10^{\frac{a_{\text{дон.}}}{10}}; \\
 10^{\frac{a_{\text{EXT}}}{10}} &\leq 10^{\frac{a_{\text{дон.}}}{10}} - 10^{\frac{a_{\text{INT}}}{10}} - 10^{\frac{F}{10}}; & \lg \left(10^{\frac{a_{\text{EXT}}}{10}} \right) &\leq \lg \left(10^{\frac{a_{\text{дон.}}}{10}} - 10^{\frac{a_{\text{INT}}}{10}} - 10^{\frac{F}{10}} \right); \\
 10^{\frac{a_{\text{дон.}}}{10}} - 10^{\frac{a_{\text{INT}}}{10}} - 10^{\frac{F}{10}} &> 0; \\
 a_{\text{EXT}} &\leq 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{a_{\text{дон.}}}{10}} - 10^{\frac{a_{\text{INT}}}{10}} - 10^{\frac{F}{10}} \right); \tag{3.38}
 \end{aligned}$$

где $a_{\text{дон.}}$ - допустимый уровень помех в рецепторе, дБм;

a_{INT} - уровень внутрисистемных помех от соседних сот, дБм;

F - уровень собственных шумов приемника, дБм;

a_{EXT} - допустимый уровень межсистемных помех в рецепторе, дБм;

$P_{\text{дон.}}$ - допустимый уровень помех в рецепторе, мВт;

P_{INT} - уровень внутрисистемных помех от соседних сот, мВт;

$F_{\text{мВт}}$ - уровень собственных шумов приемника, мВт;

P_{EXT} - допустимый уровень межсистемных помех в рецепторе, мВт.

С использованием полученных ранее зависимостей⁷⁸ выведены формулы для расчета допустимых уровней межсистемных помех в рецепторах WLAN.

$$a_{\text{EXT-MC}} \leq 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{EIRP_{AP} + G_{MC} - 40,2 - 20 \lg r - \sigma - \rho_{MC}}{10}} - 10^{\frac{EIRP_{MC} + G_{MC} - 46,22 - 20 \lg r + 10 \lg n - ch}{10}} - 10^{\frac{EIRP_{AP} + G_{MC} - 41,44 - 20 \lg r}{10}} - 10^{\frac{F_{MC}}{10}} \right); \tag{3.39}$$

$$a_{\text{EXT-AP}} \leq 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{EIRP_{MC} + G_{RX-AP} - 40,2 - 20 \lg r - \sigma - \rho_{AP}}{10}} - 10^{\frac{EIRP_{AP} + G_{AP} - 41,96 - 20 \lg r}{10}} - 10^{\frac{F_{AP}}{10}} \right); \tag{3.40}$$

⁷⁸ Для конфигурации сот с использованием всенаправленных антенн, размещенных в центрах сот. Начало расчета см. в табл. 3-8 ... 3-11, 3-19 ... 3-24, использованные для получения формул зависимости (2.3), (2.5), (2.6), (3.10), (3.11), (3.13), (3.14), (3.15), (3.17), (3.25), (3.29), (3.30), (3.37), (3.38)

Для трех сот, использующих в AP всенаправленные антенны и работающих на неперекрывающихся частотных каналах, на основании формул (2.3), (2.5), (2.6), (3.10), (3.11), (3.13), (3.14), (3.15), (3.17), (3.25), (3.31), (3.32), (3.37), (3.38) получены следующие зависимости:

$$a_{EXT-MC} \leq 10 \cdot \lg \left(\frac{10^{\frac{EIRP_{AP} + G_{MC} - 40,2 - 20 \lg r - \sigma - \rho_{MC}}{10}}}{-10^{\frac{EIRP_{MC} + G_{MC} - 46,22 - 20 \lg r + 10 \lg n - ch}{10}}} - 10^{\frac{F_{MC}}{10}} \right), \text{ дБм}; \quad (3.41)$$

$$a_{EXT-AP} \leq 10 \cdot \lg \left(\frac{10^{\frac{EIRP_{MC} + G_{RX-AP} - 40,2 - 20 \lg r - \sigma - \rho_{AP}}{10}}}{-10^{\frac{EIRP_{AP} + G_{AP} - 40,2 - 20 \lg r - ch}{10}}} - 10^{\frac{F_{AP}}{10}} \right), \text{ дБм}. \quad (3.42)$$

Этап 2: Определение уровней межсистемных помех в рецепторах WLAN

Определение уровня помехи в рецепторе проводится на основе данных, полученных при анализе ЭМО. Лучше, если анализ ЭМО проводился спектральным анализатором с антеннами, которые потом были использованы при организации сети. Тогда определение уровня межсистемных помех в рецепторе (AP или MC) сводится к тому, что из измеренного уровня помехи вычитаются потери в антенном фидере рецептора (для MC равны нулю) и потери в приемной антенне в направлении источника помехи (для MC также равны нулю).

Если измерения проводились с другой антенной, то их можно повторить, подсоединив анализатор спектра к антенне AP (более предпочтительный вариант), либо учесть разницу в КУ антенны AP и антенны, с помощью которой проводились измерения. Во втором случае дополнительно необходимо учесть потери из-за отличий в поляризации антенн.

Если измерения по каким-либо причинам не проводились, но известны параметры мешающего передатчика, то можно оценить ожидаемый уровень помехи в приемнике, заполнив табл. 3.25.

Уровень помехи в AP будет равен:

$$\begin{aligned} a_{RX_помеха \rightarrow AP(i)} = & P_{TX_помеха} - ch(f_i, f_{помеха}) - \phi_{TX_помеха} + G_{TX_помеха} - \\ & - \Delta G_{TX_помеха \rightarrow AP(i)} - L_{помеха \rightarrow AP(i)} - A_{доп._помеха \rightarrow AP(i)} + G_{RX_AP(i)} - \\ & - \Delta G_{RX_помеха \rightarrow AP(i)} - \partial G_{RX_помеха \rightarrow AP(i)} - \phi_{RX_AP(i)} \end{aligned} \quad (3.43)$$

Уровень помехи в MC будет равен:

$$\begin{aligned} a_{RX_помеха \rightarrow MC(i)} = & P_{TX_помеха} - ch(f_i, f_{помеха}) - \phi_{TX_помеха} + G_{TX_помеха} - \\ & - \Delta G_{TX_помеха \rightarrow MC(i)} - L_{помеха \rightarrow MC(i)} - A_{доп._помеха \rightarrow MC(i)} + G_{MC} - \partial G_{RX_помеха \rightarrow MC(i)} \end{aligned} \quad (3.44)$$

Табл. 3.25. Определение уровня межсистемной помехи в рецепторе

Рецептор	АР	МС
Источник помехи	Межсистемная помеха	
Трасса	Помеха => АР	Помеха => МС
Мощность передатчика, дБм	$P_{TX_помеха}$	
Уменьшение уровня помехи из-за несовпадения полосы частот, дБ	$ch(f_i, f_{помеха})$	
Потери в фидере передатчика, дБ	$\phi_{TX_помеха}$	
КУ антенны передатчика, дБи	$G_{TX_помеха}$	
Потери в передающей антенне в направлении рецептора, дБ	$\Delta G_{TX_помеха \rightarrow AP(i)}$	$\Delta G_{TX_помеха \rightarrow MC(i)}$
Потери в пространстве, дБ	$L_{помеха \rightarrow AP(i)}$	$L_{помеха \rightarrow MC(i)}$
Дополнительные потери на трассе, дБ	$A_{доп._помеха \rightarrow AP(i)}$	$A_{доп._помеха \rightarrow MC(i)}$
КУ приемной антенны, дБи	$G_{RX_AP(i)}$	G_{MC}
Потери в направлении помехи в приемной антенне, дБ	$\Delta G_{RX_помеха \rightarrow AP(i)}$	0
Потери из-за разницы в поляризации антенн источника и рецептора помехи, дБ	$\partial G_{RX_помеха \rightarrow AP(i)}$	$\partial G_{RX_помеха \rightarrow MC(i)}$
Потери в фидере приемной антенны, дБ	$\phi_{RX_AP(i)}$	0
Уровень помехи в рецепторе, дБм	$a_{RX_помеха \rightarrow AP(i)}$	$a_{RX_помеха \rightarrow MC(i)}$

Уменьшение уровня помехи из-за несовпадения полосы частот (ch) зависит от того, что попадает в полосу приемника: основное или внеполосное излучение мешающего передатчика. Соответственно, уровень помехи в приемнике необходимо скорректировать с учетом спектральной маски воздействующей помехи, применяемой в приемнике модуляции и метода кодирования.

Потери из-за разницы в поляризации антенн источника и рецептора помехи можно оценить с помощью табл. 3.26.

Табл. 3.26. Потери из-за разницы в поляризации антенн источника и рецептора помехи [57]

Поляризация антенны приемника	Поляризация антенны передатчика				
	Горизонтальная		Вертикальная		Круговая
	G<10 дБи	G≥10 дБи	G<10 дБи	G≥10 дБи	
Горизонтальная, G<10 дБи	0	0	-16	-16	-3
Горизонтальная, G≥10 дБи	0	0	-16	-20	-3
Вертикальная, G<10 дБи	-16	-16	0	0	-3
Вертикальная, G≥10 дБи	-16	-20	0	0	-3
Круговая	-3	-3	-3	-3	0

В целом, методы оценки межсистемных и внутрисистемных помех практически идентичны. Если на рецептор действует несколько внешних помех, то необходимо либо измерить их суммарный уровень, либо просуммировать с учетом их спектральных масок аналогично внутрисистемным помехам.

Если уровень межсистемных помех в рецепторе превышает допустимый, то необходимо либо уменьшить уровень межсистемных помех (экранирование, территориальный, частотный разнос, использование частотных фильтров и т.д.), либо увеличить допустимый уровень помех (уменьшая радиус сот, увеличивая мощность передатчиков МС и/или АР, уменьшая скорость передачи данных, выбрав другую антенну АР или оборудование с меньшим требованием к отношению сигнал/помеха и т.д.).

3.5.Реализация беспроводной сети

Реализация беспроводной сети состоит из двух основных этапов: установка и настройка оборудования; тестирование.

Этап 1: Установка и настройка оборудования WLAN

Процесс установки и настройки оборудования можно разделить соотносительно с уровнями модели OSI:

- 1) Физический уровень – установка, подключение и настройка оборудования сети:
 - а) установка беспроводного оборудования (точек доступа, мостов и т.д.);
 - б) установка антенн, антенных кабелей, и креплений;
 - с) установка усилителей мощности (если используются).
- 2) Логический уровень – управление ip-адресацией, настройка VLAN, систем безопасности, администрирования и т.д.

Размещение точек доступа в помещениях осуществляется в местах, определенных как оптимальные в результате исследования, предшествующего установке. При монтаже вне помещений важно обеспечить надежную герметизацию разъемов. Кроме того, все монтируемое на улице оборудование должно работать при температурах от -50 до +50 градусов. В случае значительного удаления места крепления антенны от помещений на улице приходится размещать и активное оборудование. В этом случае либо выбирается модель всепогодного исполнения, либо оборудование помещается в термостатированный контейнер, который обеспечивает рабочий диапазон температур.

Важным фактором также является организация бесперебойного питания в необслуживаемых точках, заземление, громоотводы.

II. Тестирование WLAN

Тестирование (испытания) - необходимый шаг при введении в эксплуатацию беспроводной сети. Испытания должны гарантировать надежное беспроводное соединение.

После установки оборудования беспроводной сети необходимо произвести “обход” территории, проверить уровни сигналов и помех в различных точках зоны покрытия, отношение числа испорченных пакетов к успешно принятым и т.д. В качестве инструмента для тестирования можно использовать различные анализаторы спектра и/или обычный ноутбук с беспроводной картой и установленным соответствующим программным обеспечением. Существует множество различных программ, платных и бесплатных, позволяющих проверить работу беспроводной сети. В данной работе использовались программы «NetStumbler»⁷⁹ и «WirelessMon»⁸⁰. Интерфейсы этих программ представлены на рис. 3.12 и 3.13.

Для диагностики WLAN также можно пользоваться стандартным программным обеспечением, поставляемым производителем беспроводного оборудования. Его возможности, как правило, ограничены и обеспечивают минимальный набор информации о работе WLAN.

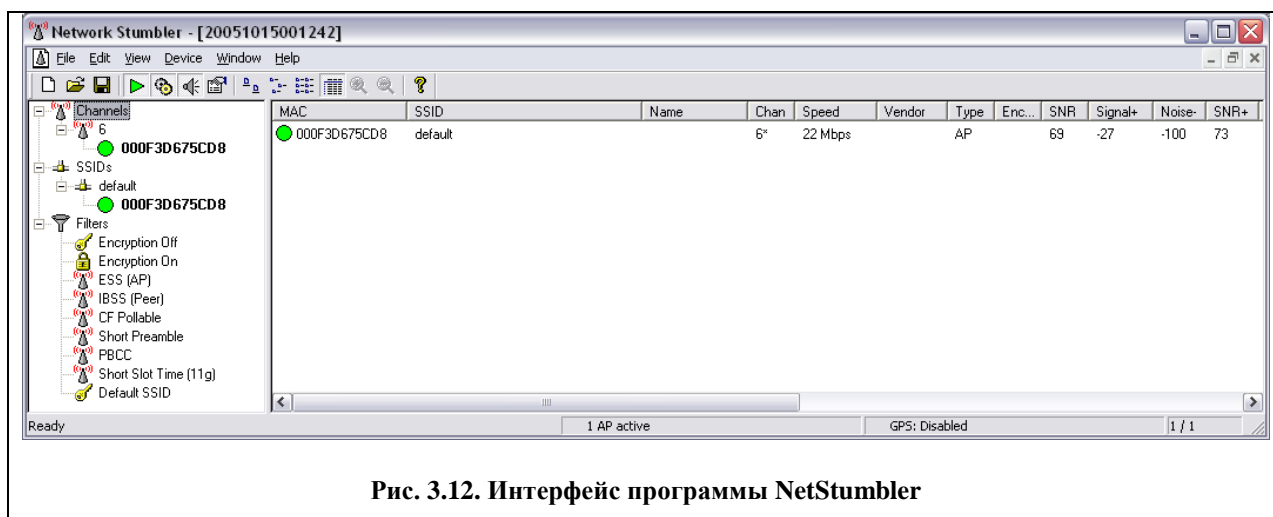


Рис. 3.12. Интерфейс программы NetStumbler

⁷⁹ Сайт разработчиков: <http://stumbler.net>

⁸⁰ Сайт разработчиков: <http://www.passmark.com>

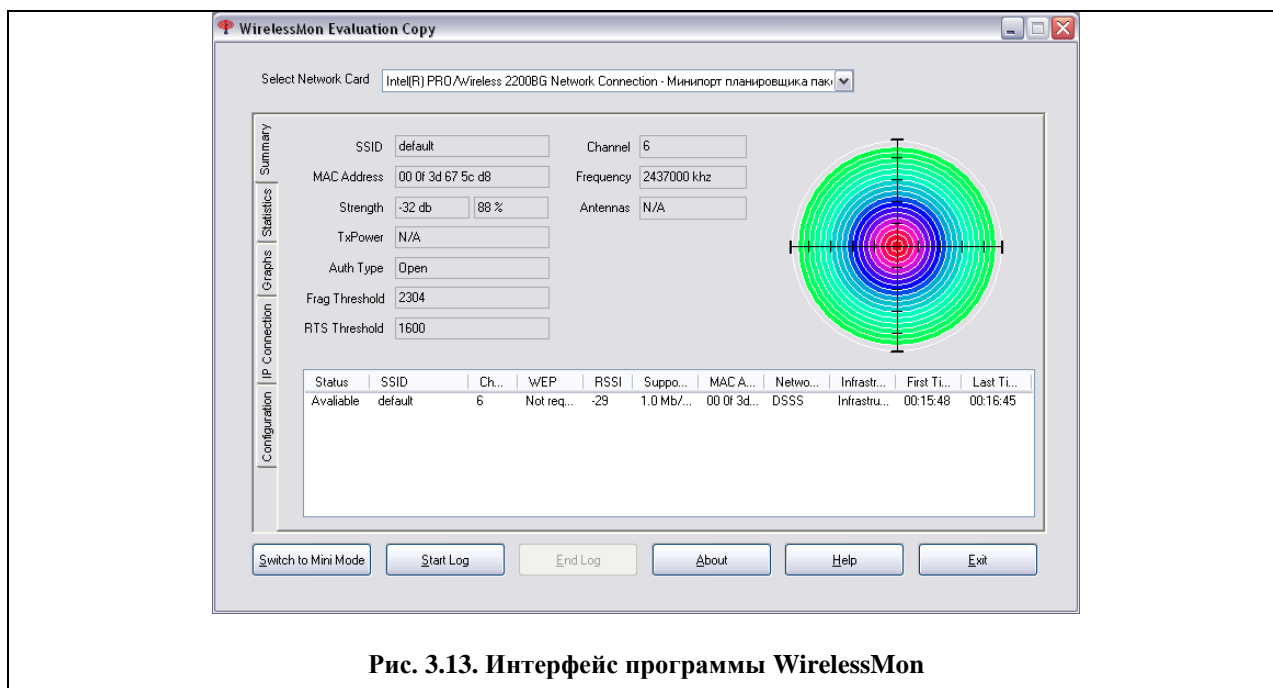


Рис. 3.13. Интерфейс программы WirelessMon

На рис. 3.14 показаны примеры интерфейсного окна программы «AirMagnet Surveyor»⁸¹ предназначенной для облегчения процедуры создания карт покрытия, и представляющей результат в наглядной графической форме. Стоимость этой программы находится ниже среднего уровня стоимости подобных программ и составляет около 2000 долларов.

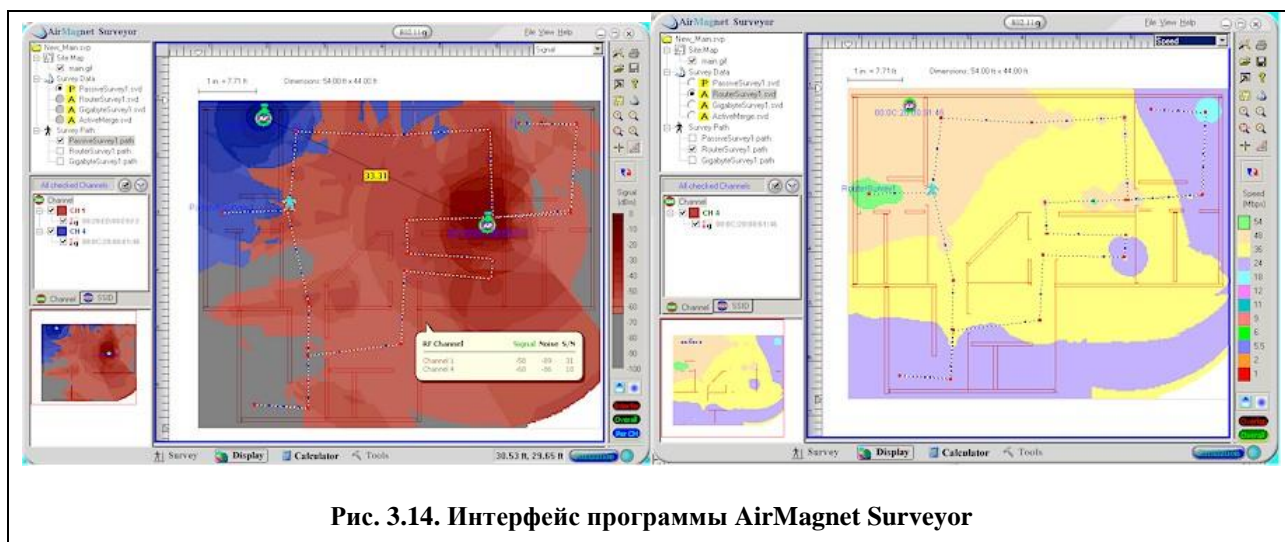


Рис. 3.14. Интерфейс программы AirMagnet Surveyor

Для получения более полной информации о сетевом трафике можно дополнительно использовать sniffеры и анализаторы протоколов, которые позволят получить информацию о передаваемых в сети данных.

⁸¹ По материалам статьи «AirMagnet Surveyor: средство создания карт покрытия WLAN», <http://www.thg.ru/network/20040730/>

Выводы по третьей главе

1. Выполненный анализ показывает, что предоставляемые производителями оборудования данные, недостаточны для эффективного проектирования. Это заставляет пользоваться экспериментальными и рассчитанными значениями параметров.
2. Разработана методика проектирования WLAN, учитывающая влияние межсистемных и внутрисистемных помех. Предложенные методы и алгоритмы расчетов позволяют моделировать зависимости, существующие между параметрами WLAN и значениями уровней сигналов и помех в рецепторах WLAN. В рамках разработанной методики получены следующие результаты:
 - для схем с использованием направленных антенн в точках доступа сформулированы требования к ДН;
 - рассмотрены возможные комбинации частотных каналов и предложены варианты с минимальным уровнем внутрисистемных помех;
 - получены формулы для расчета уровней сигналов и помех в рецепторах WLAN; с помощью предложенного метода проведена оценка суммарного уровня внутрисистемных помех от соседних сот в рецепторах WLAN;
 - рассмотрены различные организационные меры и способы их применения, позволяющие регулировать отношение сигнал/помеха в рецепторах WLAN;
 - предложен метод расчета допустимых уровней межсистемных помех в рецепторах WLAN, учитывающий уровень сигнала, уровень собственных шумов приемника и уровень внутрисистемных помех; с помощью предложенного метода проведена оценка допустимого уровня межсистемных помех в рецепторах WLAN.
3. Проведена оценка максимального уровня внутрисистемных помех в точке доступа и в граничной МС для конфигурации сот, в которой используются всенаправленные антенны AP, размещенные в центрах сот.

Глава 4: Разработка и экспериментальная проверка алгоритмов расчетов параметров WLAN, результаты внедрения

Эта глава посвящена внедрению результатов работы. На основе предлагаемой методики проектирования WLAN были разработаны алгоритмы расчетов, позволяющие моделировать различные зависимости, существующие между параметрами WLAN и значениями уровней сигналов и помех в рецепторах WLAN. Разработанные алгоритмы расчетов реализованы в программе «Расчет беспроводных локальных сетей Wi-Fi: W-plane». Анализ характеристик WLAN в разработанной программе производится следующим образом:

- задаются исходные данные для расчета (радиус сот, скорость передачи, характеристики антенн AP и т.д.);
- выбираются рассчитываемые зависимости (например отношение сигнал/помеха в MC или AP в зависимости от радиуса сот);
- задаются количество точек и диапазоны значений анализируемых зависимостей;
- производится расчет выбранных зависимостей по разработанным алгоритмам;
- результаты расчетов выводятся на экран в виде графиков.

Использование разработанной программы при проектировании WLAN позволит сократить время и материальные затраты на проектирование за счет автоматизации вычислений, проводимых при проектировании.

В разработанной программе «Расчет беспроводных локальных сетей Wi-Fi (W-plane)» реализован расчет различных конфигураций WLAN, отличающихся используемым оборудованием, типом и расположением антенн точек доступа. Интерфейс программы позволяет задавать значения различных параметров WLAN: скорость работы, радиус сот, характеристики приемников и передатчиков WLAN, КУ и ДН антенн, и т.д. По результатам расчетов строятся графики, демонстрирующие различные зависимости между параметрами беспроводной локальной сети и позволяющие рационально выбрать режимы работы WLAN.

Результаты диссертационной работы были использованы при проектировании беспроводных локальных сетей компаний ЗАО «Компания СФТ» и ОАО «РосДорБанк».

Отдельные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс МИЭМ. Так, на основе предложенной методики оценки межсистемной ЭМС, разработано учебное пособие. Методические материалы используются в лекционных курсах и на практических занятиях по дисциплине "ЭМС и защита информации" для групп Р-101 и

РС-101, а также при выполнении курсовых и дипломных проектов. Всего по дисциплине "ЭМС и защита информации" на тему «Межсистемная ЭМС» выполнено более 60 курсовых проектов.

Акты внедрения представлены в приложениях.

В первом разделе показаны разработанные алгоритмы расчета, использованные в программе. Во втором разделе анализируются результаты экспериментов и расчетов в разработанной программе.

4.1. Разработка алгоритмов расчетов параметров WLAN

При расчете различных параметров беспроводной сети в разработанной программе используются различные алгоритмы расчетов. Принципы, заложенные в них, подробно проанализированы в третьей главе. В этом разделе показаны только некоторые детали и особенности расчета параметров WLAN в разработанной программе.

При расчете любых параметров в первую очередь формируется матрица параметров ParamMartix. В табл. 4.1 приведены соответствия элементов матрицы ParamMartix и их реальных значений.

Табл. 4.1. Матрица параметров ParamMartix

Элемент матрицы ParamMartix	Физическое значение и размерность элемента матрицы
ParamMartix[1]	Номер скоростного режима
ParamMartix[2]	Радиус сот, м
ParamMartix[3]	Мощность передатчика AP, дБм
ParamMartix[4]	Мощность передатчика МС, дБм
ParamMartix[5]	КУ антенны AP, дБи
ParamMartix[6]	КУ антенны МС, дБи
ParamMartix[7]	Высота установки антенны AP, м
ParamMartix[8]	Рабочая высота МС, м
ParamMartix[9]	Потери в фидере AP, дБ
ParamMartix[10]	Минимальное расстояние между антеннами AP, м
ParamMartix[11]	Минимальное расстояние между МС, м
ParamMartix[12]	Дополнительные потери внутри соты, дБ
ParamMartix[13]	Дополнительные потери между сотами 0-й круг, дБ
ParamMartix[14]	Запас в уровне сигнала, дБ
ParamMartix[15]	Минимальный уровень мощности МС, дБм
ParamMartix[16]	Дополнительные потери между сотами 1-й круг, дБ
ParamMartix[21]	Чувствительность приемника AP, Мбит/с
ParamMartix[22]	Уровень шума приемника AP, м
ParamMartix[23]	Минимальное отношение сигнал/помеха в AP, дБм
ParamMartix[24]	Уменьшение уровня помехи (AP) при разнице в рабочих частотах не менее 25 МГц, дБ
ParamMartix[25]	Уменьшение уровня помехи (AP) при разнице в рабочих частотах не менее 35 МГц, дБ
ParamMartix[26]	Направление в антенне AP, градусов
ParamMartix[31]	Чувствительность приемника МС, Мбит/с
ParamMartix[32]	Уровень шума приемника МС, м
ParamMartix[33]	Минимальное отношение сигнал/помеха в МС, дБм
ParamMartix[34]	Уменьшение уровня помехи (МС) при разнице в рабочих частотах не менее 25 МГц, дБ
ParamMartix[35]	Уменьшение уровня помехи (МС) при разнице в рабочих частотах не менее 35 МГц, дБ

Номера скоростных режимов для первого элемента матрицы имеют следующие значения: 0 – 1 Мбит/с, 1 – 2 Мбит/с, 2 – 5,5 Мбит/с, 3 – 11 Мбит/с, 4 – 22 Мбит/с, 5 – 33 Мбит/с, 6 – 6 Мбит/с, 7 – 9 Мбит/с, 8 – 12 Мбит/с, 9 – 18 Мбит/с, 10 – 24 Мбит/с, 11 – 36 Мбит/с, 12 – 48 Мбит/с, 13 – 54 Мбит/с.

На рис. 4.1 и 4.2 показаны алгоритмы расчетов уровней сигналов в точке доступа и в граничной МС. Для антенн АР, размещенных в центрах сот, расстояние между АР и граничной МС равно радиусу соты. Для направленных антенн АР, расположенных на границе соты расстояние между наиболее удаленной МС и АР равно диаметру.



На рис. 4.3 показан алгоритм расчета суммарных уровней помех в рецепторах WLAN. Расчет производится с помощью методов, описанных во второй главе. Конфигурации сот, реализованные в программе показаны в табл. 4.2.

Показанные на рис. 4.4 и 4.5 алгоритмы разработаны для расчета уровней межсистемных помех от сот 0-го и 1-го круга. Соты 0-го круга работают на неперекрывающихся каналах, соты 1-го круга работают на том же частотном канале, что и сота-рецептор. Число сот первого круга – шесть. Число сот 0-го круга также шесть, но три из них работают на одном частотном канале, три на другом. Каждая тройка сот оказывает влияние на разные части спектра сигнала. Поэтому при расчете помех от 0-го круга учитывается только помеха по одному из частотных каналов, уровень которой больше. Уровни помех в рецепторах от сот 0-го круга вычисляются следующим образом:

$$a_{AP \rightarrow MC} = ParamMatrix[3] + ParamMatrix[9] + ParamMatrix[5] - ParamMatrix[13] + ParamMatrix[6] - 20 \cdot \log(d) - 20 \log(f) + 27.558 - d_AP ; \quad (4.1)$$

$$a_{MC \rightarrow MC} = ParamMatrix[4] + 2 \cdot ParamMatrix[6] + ParamMatrix[5] - ; \quad (4.2)$$

$$- ParamMatrix[13] - 20 \cdot \log(d) - 20 \log(f) + 27.558 - d_{MS}$$

$$a_{AP \rightarrow AP} = ParamMatrix[3] + 2 \cdot ParamMatrix[5] - 2 \cdot ParamMatrix[9] - ; \quad (4.3)$$

$$- ParamMatrix[13] - 20 \cdot \log(d) - 20 \log(f) + 27.558 - d_{AP}$$

$$a_{MC \rightarrow AP} = ParamMatrix[4] + ParamMatrix[5] + ParamMatrix[6] - ParamMatrix[13] - ; \quad (4.4)$$

$$- ParamMatrix[9] - 20 \cdot \log(d) - 20 \log(f) + 27.558 - d_{MS}$$

где $a_{AP \rightarrow MC}$ - уровень помехи в МС от АР соты 0-го круга, дБм;

$a_{MC \rightarrow MC}$ - уровень помехи в МС от ближайшей МС соты 0-го круга, дБм;

$a_{AP \rightarrow AP}$ - уровень помехи в АР от АР соты 0-го круга, дБм;

$a_{MC \rightarrow AP}$ - уровень помехи в АР от ближайшей МС соты 0-го круга, дБм;

$ParamMatrix[N]$ - соответствующие элементы матрицы параметров;

d - расстояние между помехой и рецептором, м;

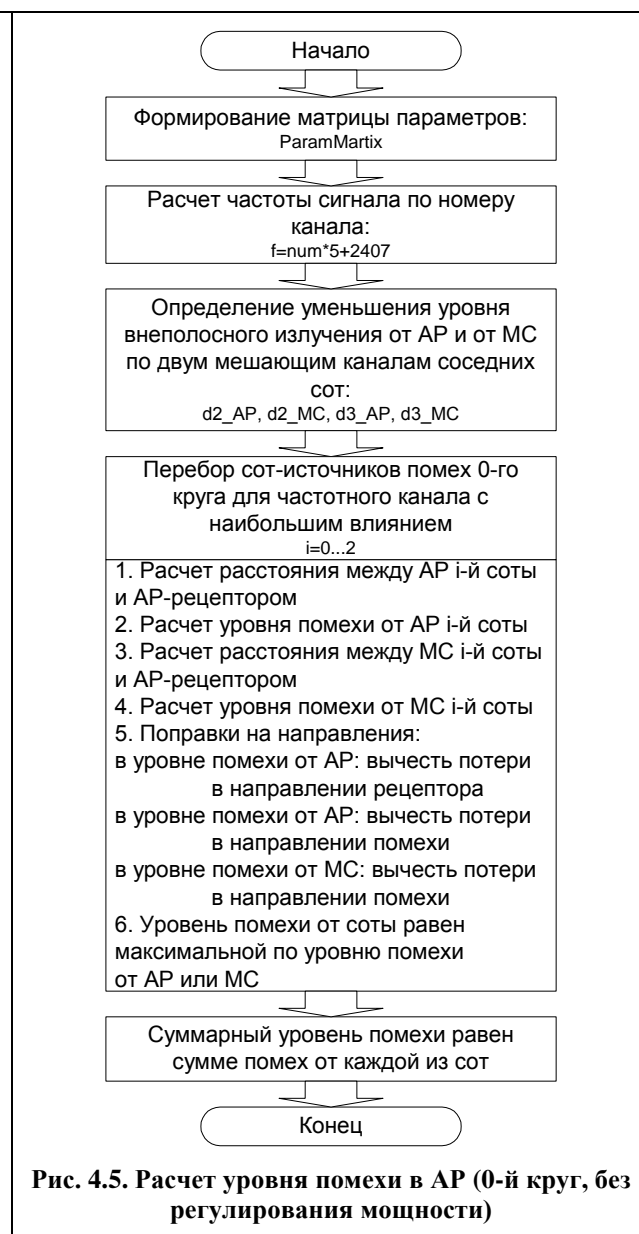
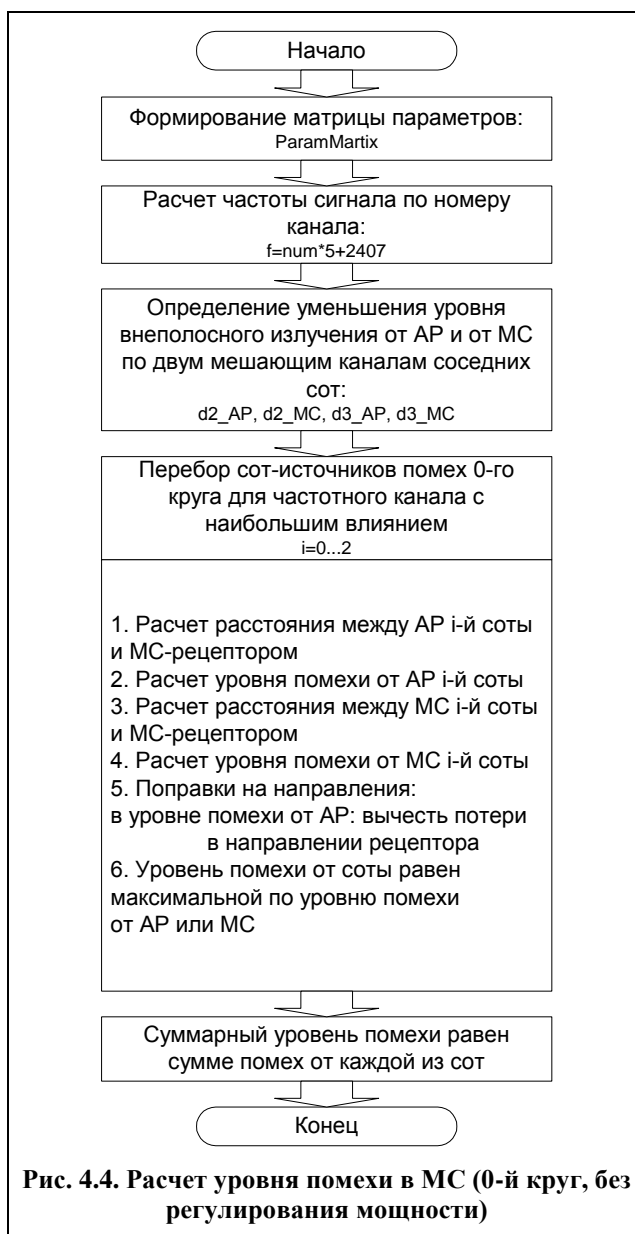
f - частота сигнала, МГц;

d_{AP} - подавление уровня внеполосного излучения в АР, дБ;

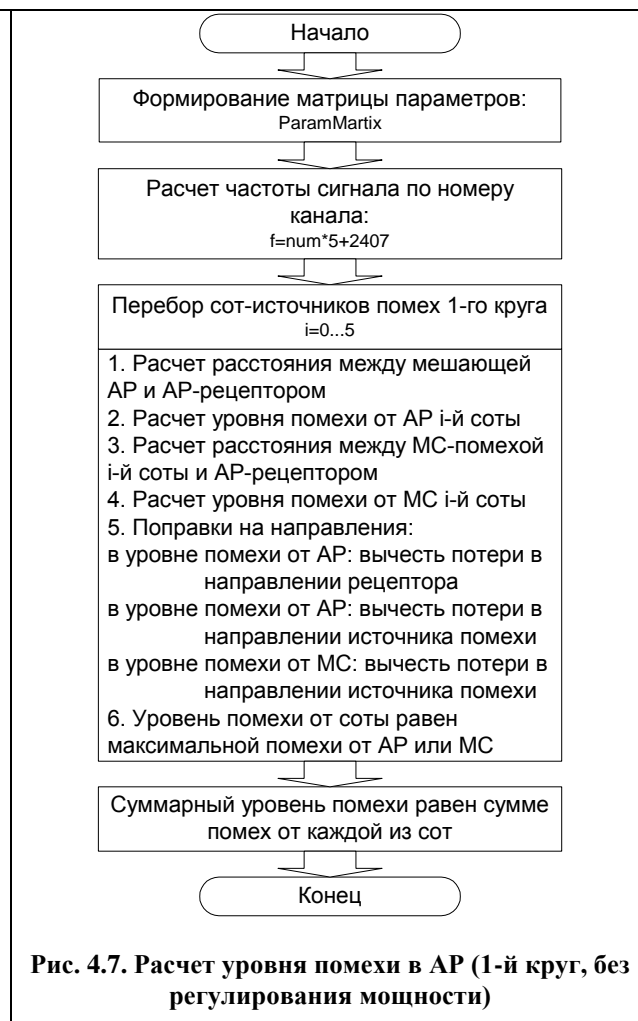
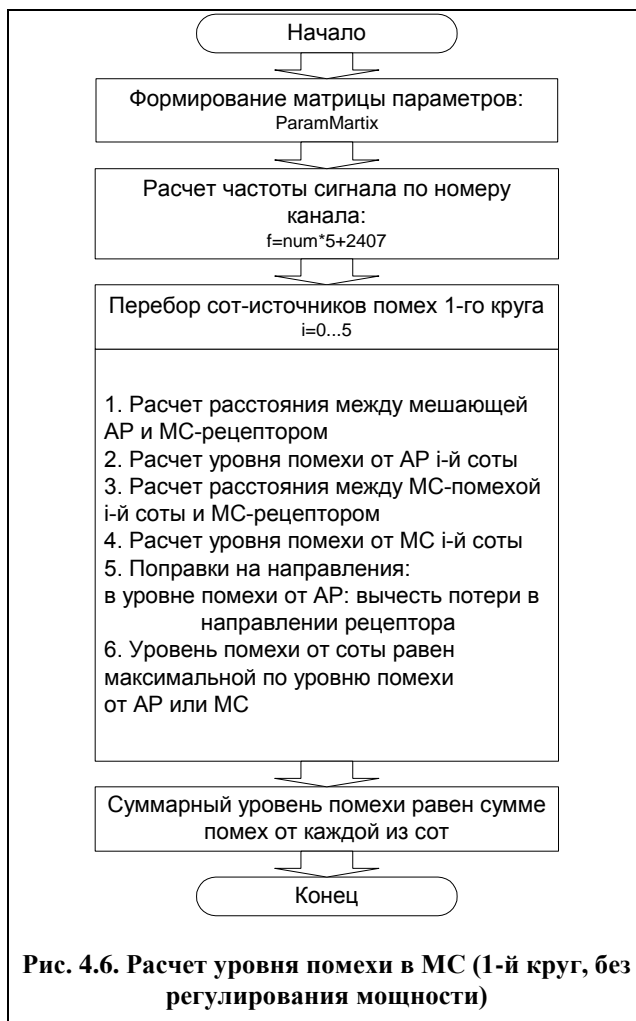
d_{MS} - подавление уровня внеполосного излучения в МС, дБ.

Табл. 4.2. Поддерживаемые конфигурации сот

ID конфигурации	Конфигурация сот
1	Всенаправленные антенны, расположенные в центрах сот, помеха считается в центральной соте
2	Направленные антенны, основные лепестки расходятся из одной точки, регулирование мощности отсутствует, помеха считается в центральной соте
3	Направленные антенны, основные лепестки сходятся в одной точке, регулирование мощности отсутствует, помеха считается в центральной соте
4	Направленные антенны, основные лепестки расходятся из одной точки, используется регулирование мощности МС, помеха считается в центральной соте
5	Направленные антенны, основные лепестки сходятся в одной точке, используется регулирование мощности МС, помеха считается в центральной соте
6	Одна сота, всенаправленные антенны, расположенные в центрах сот
7	Три соты, всенаправленные антенны, расположенные в центрах сот
8	Три соты, направленные антенны, основные лепестки расходятся из одной точки, регулирование мощности отсутствует
9	Три соты, направленные антенны, основные лепестки сходятся в одной точке, регулирование мощности отсутствует
10	Три соты, направленные антенны, основные лепестки расходятся из одной точки, используется регулирование мощности МС
11	Три соты, направленные антенны, основные лепестки сходятся в одной точке, используется регулирование мощности МС



Алгоритмы показанные на рис. 4.6, 4.7 разработаны для расчета уровней помех от сот 1-го круга, работающих на перекрывающихся частотных каналах. Основные их отличия от расчета помех 0-го круга состоит в том, что число сот 6, а d_{AP} и d_{MS} равны нулю.



Для конфигураций сот, использующих направленные антенны, в уровне помехи учитываются поправки на уменьшение КУ антенны помехи в направлении приемника и уменьшение КУ антенны приемника в направлении помехи.

Если в конфигурации сот указано применение регулирования мощности в МС, то это означает, что расположение МС мешающей соты берется не ближайшей к приемнику, а то, в котором МС оказывает наибольшее влияние. Если расчет ведется только для трех сот, то на соту-рецептор воздействуют помехи только от двух соседних сот, работающих на разных неперекрывающихся каналах.

4.2. Экспериментальная проверка алгоритмов расчетов

Для проверки расчетов было использовано следующее оборудование: точка доступа Cisco Aironet 1100, 2 точки доступа D-Link DWL-900AP+, ноутбук RoverBook Navigator W570 с картой Intel 2200BG.

Табл. 4.3. Характеристики точки доступа D-Link DWL-900AP+⁸²

Скорость передачи данных	Чувствительность	Мощность излучения	Антенна
1 Мбит/с	89	15±2 дБм или 32мВт	Всенаправленная 2 дБи потери в фидере 0 дБ
2 Мбит/с	89		
5,5 Мбит/с	83		
11 Мбит/с	79		
22 Мбит/с	80		

Табл. 4.4. Характеристики точки доступа Cisco Aironet 1100⁸³

Скорость передачи данных	Чувствительность	Мощность излучения	Антенна
1 Мбит/с	-95 дБм	100 mW (20 дБм)	2 всенаправленные антенны с 2-мя поляризациями: горизонтальной и вертикальной потери в фидере 0 дБ
2 Мбит/с	-91 дБм	50 mW (17 дБм)	
5,5 Мбит/с	-89 дБм	30 mW (15 дБм)	
11 Мбит/с	-88 дБм	20 mW (13 дБм)	
		10 mW (10 дБм)	
		5 mW (7 дБм)	
		1 mW (0 дБм)	
6 Мбит/с	-90 дБм	30 mW (15 дБм) 20 mW (13 дБм) 10 mW (10 дБм) 5 mW (7 дБм) 1 mW (0 дБм)	
9 Мбит/с	-84 дБм		
12 Мбит/с	-82 дБм		
18 Мбит/с	-80 дБм		
24 Мбит/с	-77 дБм		
36 Мбит/с	-73 дБм		
48 Мбит/с	-72 дБм		
54 Мбит/с	-72 дБм		

Табл. 4.5. Характеристики беспроводного адаптера Intel 2200BG⁸⁴

Скорость передачи данных	Чувствительность	Мощность излучения	Антенна
1 Мбит/с	-80	1 мВт 5 мВт 20 мВт 31,6 мВт 50,1 мВт	Всенаправленная 2 дБи потери в фидере 0 дБ
2 Мбит/с	-80		
5,5 Мбит/с	-76		
11 Мбит/с	-76		
6 Мбит/с	-82	1 мВт 5 мВт 20 мВт 31,6 мВт 50,1 мВт	
9 Мбит/с	-81		
12 Мбит/с	-79		
18 Мбит/с	-77		
24 Мбит/с	-74		
36 Мбит/с	-70		
48 Мбит/с	-66		
54 Мбит/с	-65		

⁸² По данным с сайта производителя www.dlink.ru

⁸³ По данным с сайта производителя www.cisco.com

⁸⁴ Приведены данные стандартов IEEE 802.11b и 802.11g

Измерение уровня сигнала (помехи) в приемнике в зависимости от расстояния между рецептором и источником излучения

При проверке использовались MC RoverBook Navigator W570 с картой Intel 2200BG и точка доступа D-Link DWL-900AP+. Измерения проводились в MC с помощью программы NetStumbler⁸⁵. Точка доступа и MC находились в одном помещении, размером 4x5 метров. Точка доступа D-Link работала на 6-м частотном канале, на котором и производились все измерения и расчет. Исходные данные, используемые для расчета, показаны на рис. 4.8.

Исходные данные для расчета	
Скорость работы, [Мбит/с]	9 Мбит/с 6 Мбит/с 33 Мбит/с 22 Мбит/с 11 Мбит/с
Радиус сот, [м]	2
Мощность пер-ка AP, [дБм]	15
Мощность пер-ка MC, [дБм]	0
КУ антенны AP, [дБ]	2
КУ антенны MC, [дБ]	2
Высота установки антенны AP, [м]	1
Высота расположения антенны MC, [м]	1
Потери в фидере AP, [дБ]	0
Минимальное расстояние между антеннами AP соседних сот, [м]	1
Минимальное расстояние между MC соседних сот, [м]	1
Доп. потери между MC и AP внутри соты, [дБ]	0
Доп. потери между перекрывающимися сотами, [дБ]	0
Доп. потери с сотами 1-го круга, [дБ]	0
Запас на замирания, [дБ]	0...6
Минимальная мощность MC, [дБ]	0
OK Cancel	

Рис. 4.8. Исходные данные для расчета уровня сигнала в MC от AP D-Link

Результат расчетов зависимости уровня сигнала от расстояния между рецептором и приемником, выдаваемый разработанной программой «W-Plane», показан на рис. 4.9. По результатам расчетов видно, что при расстоянии между MC и AP, равным 2-м метрам, уровень сигнала должен варьироваться между значениями -27...-33 дБм. При расстоянии между MC и AP, равным 4-м метрам, уровень сигнала должен варьироваться между значениями -33...-39 дБм.

⁸⁵ Сайт разработчиков программы: <http://stumbler.net>

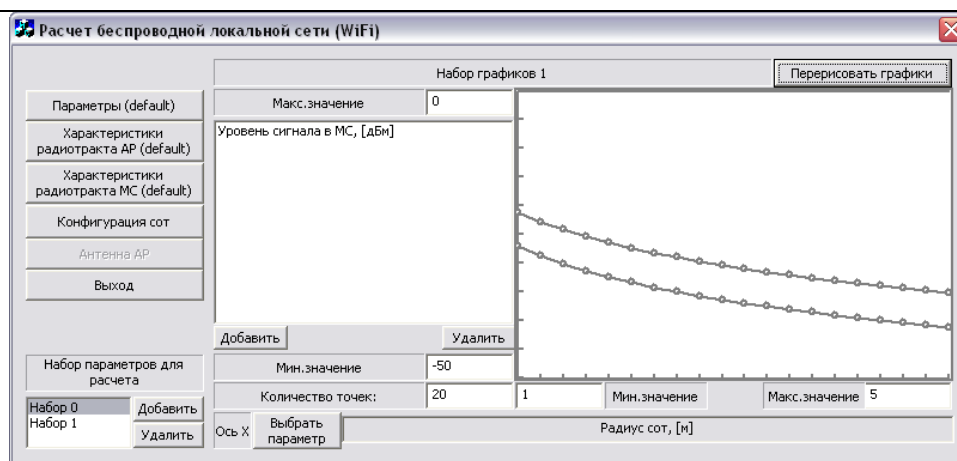


Рис. 4.9. Результаты расчетов уровня сигнала в МС от AP D-Link (запас на замирания 6 дБ)

По результатам измерений видно (см. рис. 4.10), что уровень сигнала колеблется между значениями -27...-36 дБм (за исключением нескольких пиков, на которых наблюдалось значительное уменьшение уровня сигнала). Колебания объясняются многолучевым распространением сигнала.

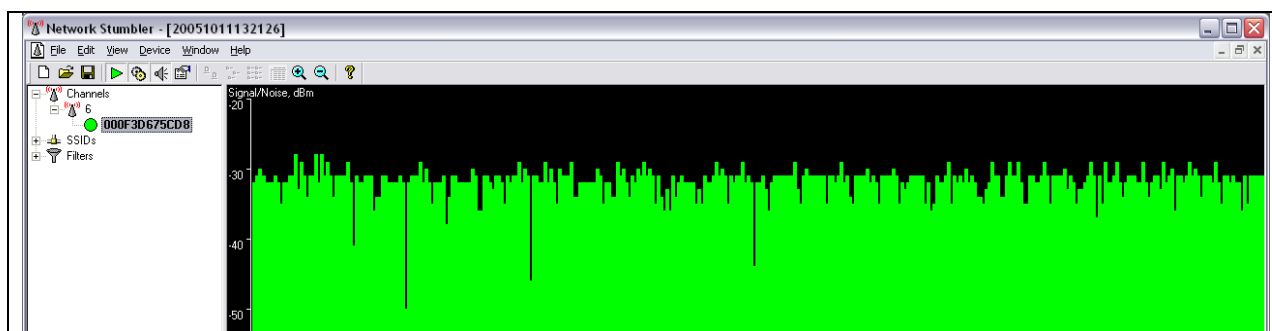


Рис. 4.10. Результаты измерений уровня сигнала в МС от AP D-Link (расстояние 2 метра)

При расстоянии между МС и AP равном 4 метра, уровень сигнала колебался в диапазоне -33...-41 дБм (см. рис. 4.11). При повороте МС уровень сигнала несколько менялся. Например, для расстояния 4 метра, при повороте МС вокруг своей оси диапазон колебаний уровня сигнала составлял -31...-43 дБм. Такой результат объяснить как неравномерностью КУ ДН антенны МС, так и многолучевым распространением сигнала.

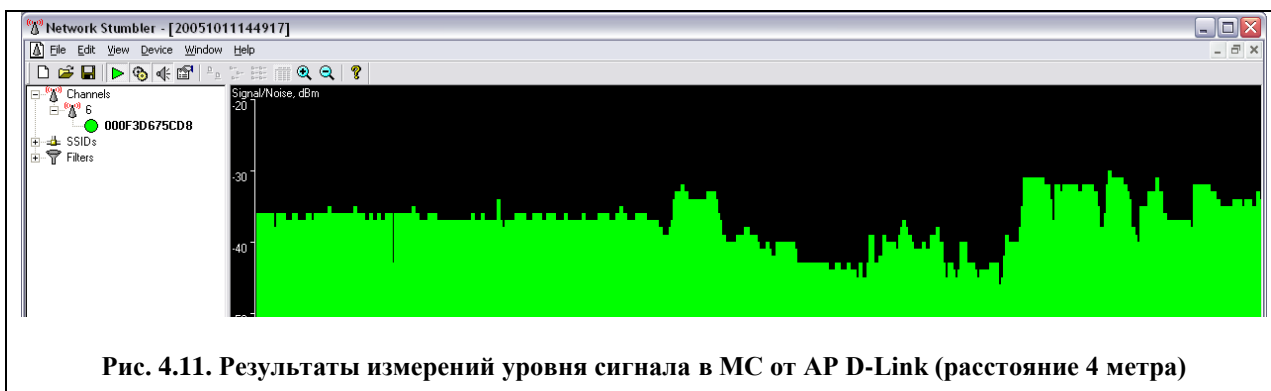


Рис. 4.11. Результаты измерений уровня сигнала в МС от AP D-Link (расстояние 4 метра)

Если при расчете брать запас на замирания 8-11 дБ, наблюдается практически полное совпадение результатов расчета и эксперимента (см. рис. 4.12).

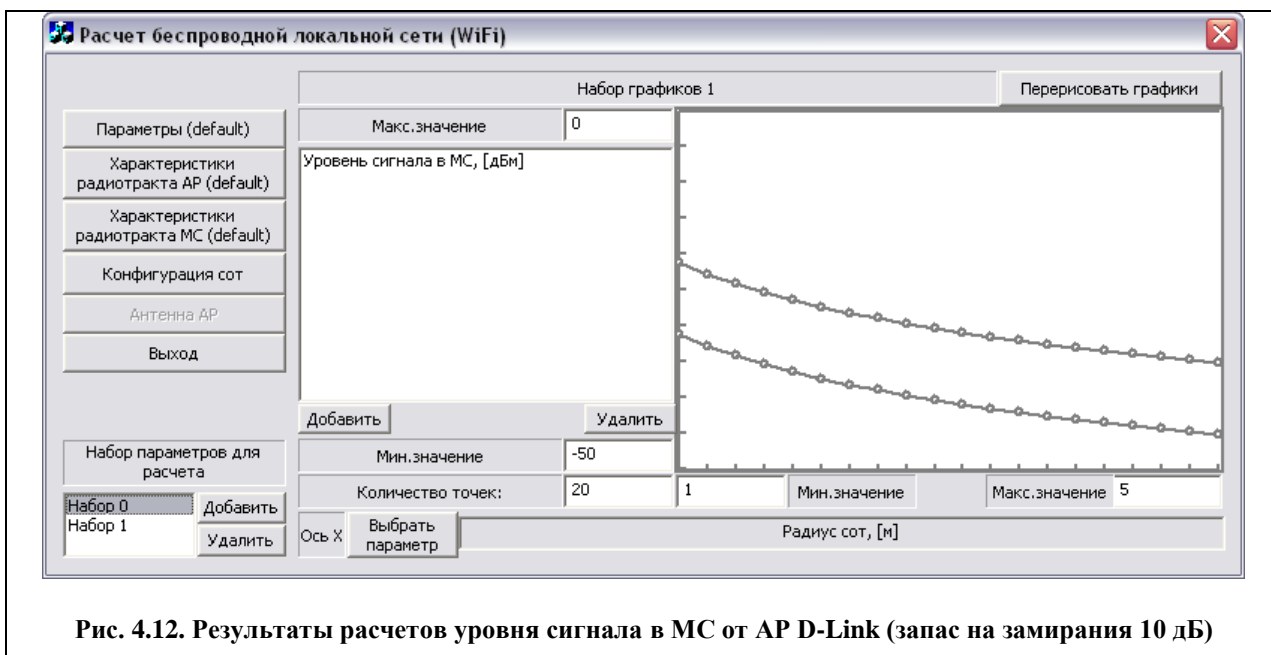
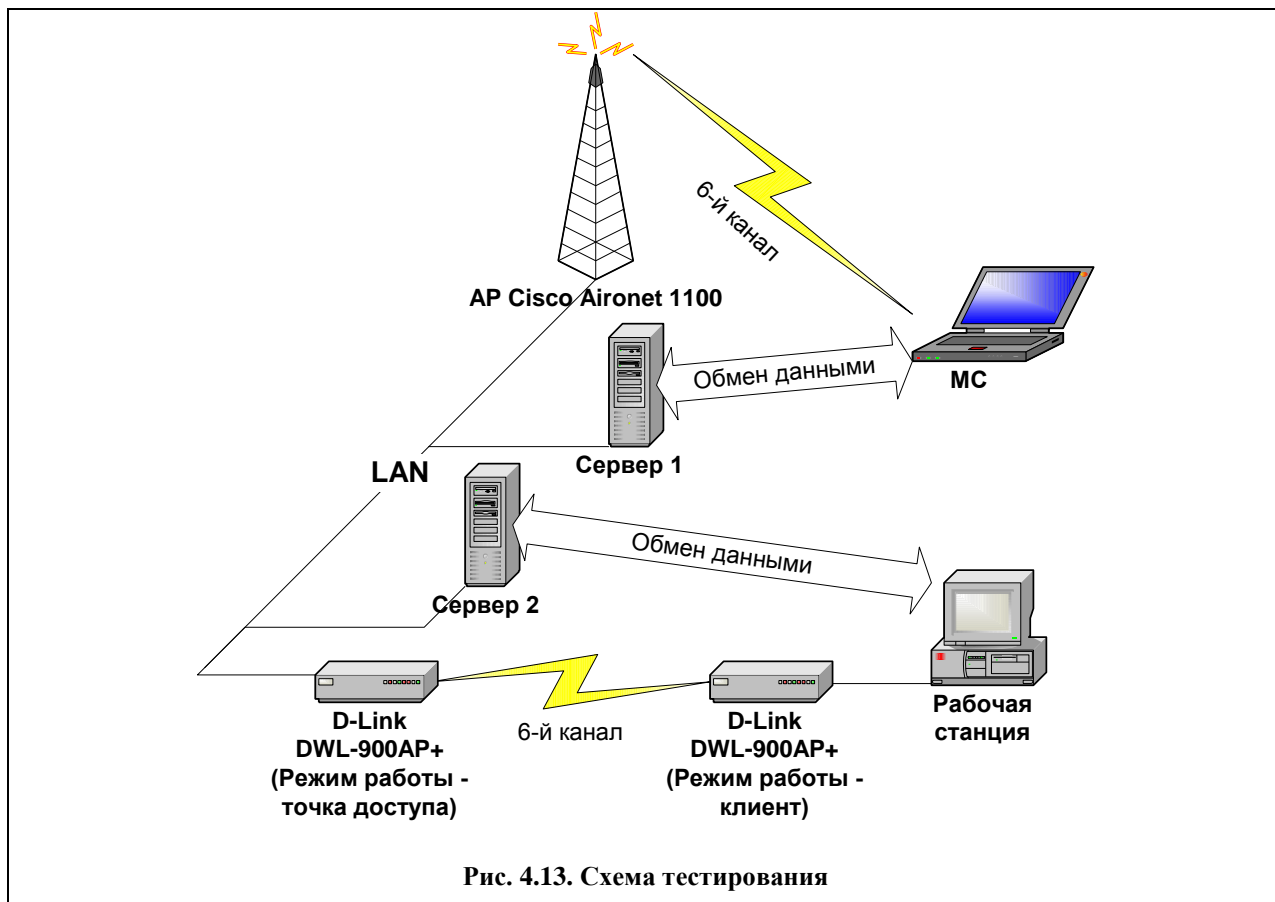


Рис. 4.12. Результаты расчетов уровня сигнала в МС от AP D-Link (запас на замирания 10 дБ)

Дальнейшие измерения проводились при скорости передачи данных 24 Мбит/с, определенной стандартом как обязательная. Схема тестирования показана на рис. 4.13. При измерении в соте-рецепторе в качестве точки доступа использовалась AP - Cisco Aironet 1100, в качестве МС - ноутбук RoverBook Navigator W570 с беспроводной картой Intel 2200BG. Трафик в соте-рецепторе создавался копированием файлов с сервера 1 на МС. Измерения проводились на МС с помощью программы «WirelessMon»⁸⁶. Одна точка доступа D-Link работала в обычном режиме, другая в режиме беспроводного клиента. Рабочая станция, подключенная к локальной сети через беспроводного клиента, создавала трафик в беспроводном канале связи между устройствами D-Link (копирование данных с сервера 2). Точка доступа D-Link также работала на 6-м частотном канале (2437 МГц). Передача данных между МС и точкой

⁸⁶ Сайт разработчиков: <http://www.passmark.com>

доступа Cisco Aironet производилась на скорости 24 Мбит/с (OFDM), определенной стандартом как обязательная. Все остальные режимы передачи были отключены. Скорость передачи данных между устройствами D-Link составляла 22 Мбит/с (PBCC).



Измерение чувствительности приемника MC

В этом эксперименте оборудование D-Link отключено. В табл. 4.6 приведены результаты измерений по определению чувствительности приемника MC. MC перемещается в пространстве, фиксируются уровни сигналов, количество принятых поврежденных и неповрежденных пакетов. Далее вычисляется соответствующее процентное отношение числа поврежденных пакетов к общему числу принятых пакетов.

Табл. 4.6. Определение чувствительности приемника MC при скорости работы 24 Мбит/с

Средний уровень сигнала, дБм	Принято неповрежденных пакетов, шт.	Принято поврежденных пакетов, шт.	Процент поврежденных пакетов, %
-55...-65	145158	2372	1,6
-65...-71	31888	2239	6,6
-67...-77	28237	3798	11,8
-70...-78	28222	6093	17,8
-72...-80	18669	8193	30,5

По требованиям стандарта IEEE 802.11g допускается 10% ошибок при приеме. Уровень сигнала, при котором число принятых поврежденных пакетов 10%, составляет

примерно -71...-77 дБм. Такой результат косвенно подтверждается тем, что даже при уровнях сигнала -72...-80 дБм прием пакетов все еще возможен (хотя и со значительным количеством ошибок). Таким образом, чувствительность приемника Intel 2200BG на скорости 24 Мбит/с равна -72...-77 дБм.

Определение отношения сигнал/помеха и количества потерянных при приеме пакетов (на скорости 24 Мбит/с)

В следующих экспериментах включается оборудование D-Link, эмулирующее помеху. МС перемещается в пространстве, фиксируются уровни сигнала и помехи, количество принятых поврежденных и неповрежденных пакетов. Далее вычисляется отношение сигнал/помеха и соответствующее процентное отношение числа поврежденных пакетов к общему числу принятых пакетов.

Из табл. 4.7 видно, что число поврежденных пакетов обратно пропорционально отношению уровня сигнала к уровню помехи. При отношении сигнал/помеха менее 12 дБ, количество ошибочно принятых пакетов колебалось в диапазоне 40-80%. Также, при больших процентах ошибок, суммарное количество пакетов, передаваемых и принимаемых в минуту, сокращалось в несколько раз. Допустимое количество принятых поврежденных пакетов (10%) обеспечивалось при отношении сигнал/помеха не менее 17 дБ. Из этого следует, что требование к отношению сигнал/помеха в МС составляет не более 17 дБ. Уровни сигналов и помех в МС изменяются во времени. Поэтому в измерениях часть пакетов принимаются при отношении сигнал/помеха ниже допустимого уровня. Следовательно, можно утверждать, что реальные требования к отношению сигнал/помеха несколько ниже и составляют 15-17 дБ. Требования к отношению сигнал/помеха ранее были оценены в работе (1-я глава) и для скорости 24 Мбит/с равны 16 дБ.

Табл. 4.7. Определение отношения сигнал/помеха и количества потерянных при приеме пакетов

Средний уровень сигнала, дБм	Уровень помехи, дБм	Отношение сигнал/помеха, дБ	Принято неповрежденных пакетов	Принято поврежденных пакетов	Процент поврежденных пакетов, %
-61...-64	-60...-64	-1...3	1294	1501	53,8
-46...-51	-49...-58	-2...12	378	298	44,1
-46...-51	-49...-58	-2...12	493	1239	71,5
-42...-44	-56...-59	8...17	7798	3538	31,1
-38...-42	-50...-55	8...17	4312	1953	31,1
-38...-42	-53...-55	11...17	6329	2368	27,2
-42...-44	-56...-59	12...17	10053	1632	14
-38...-41	-58...-60	17...22	10699	1489	8,18
-35...-40	-58...-60	18...25	9231	713	7,2

Далее приводятся результаты моделирования с применением разработанной программы «W-Plane». Показанный на рис. 4.14 график показывает зависимость

допустимого уровня помехи от уровня сигнала (на скорости 24 Мбит/с).

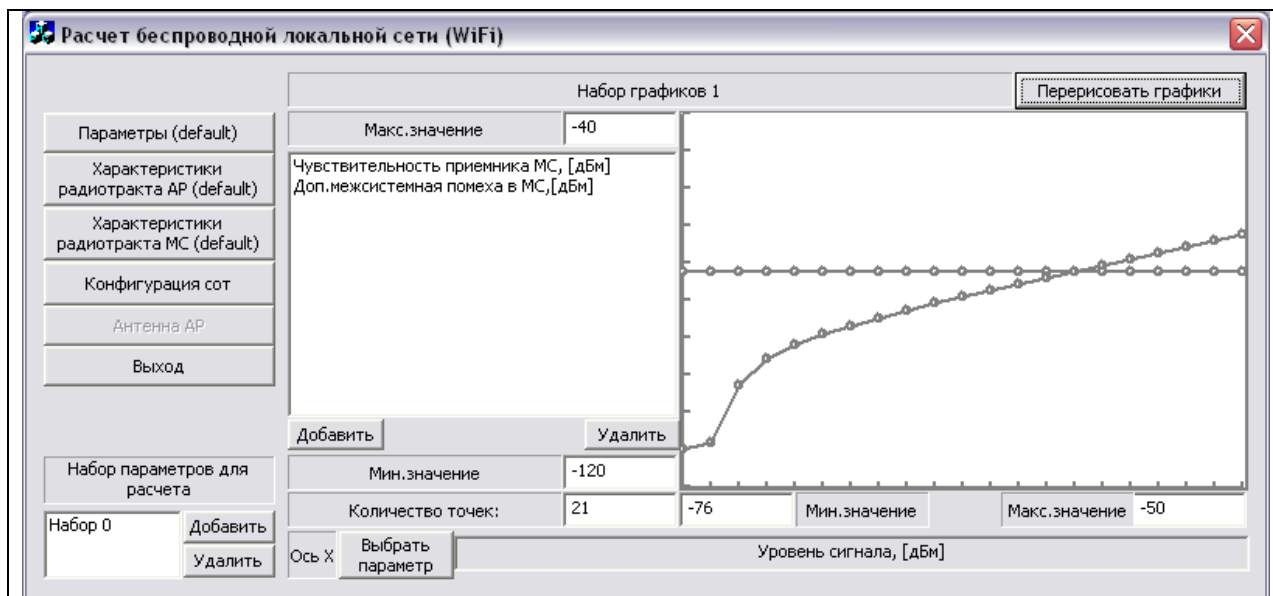


Рис. 4.14. Расчет допустимого уровня помех

Значение чувствительности приемника МС при расчете было взято равным -74 дБм, допустимое отношение сигнал/помеха в приемнике МС равно 16 дБ. Горизонтальная линия показывает значение чувствительности приемника МС, наклонный график показывает зависимость допустимого уровня помех от уровня сигнала в МС. Для анализа удобно составить таблицу, в которую будут сведены вместе результаты измерений и расчетов (см. табл. 4.8).

Табл. 4.8. Сравнение уровня помех с допустимым значением

Измерения			Расчет	Выводы
Средний уровень сигнала, дБм	Уровень помехи, дБм	Процент поврежденных пакетов, %	Уровень допустимой помехи, дБм	
-61...-64	-60...-64	53,8	-75...-80	Уровень помех значительно превышает допустимый
-46...-51	-49...-58	44,1	-67...-62	Уровень помех значительно превышает допустимый
-46...-51	-49...-58	71,5	-67...-62	Уровень помех значительно превышает допустимый
-42...-44	-56...-59	31,1	-60...-57	Диапазон изменения уровней помех частично удовлетворяет требованиям
-38...-42	-50...-55	31,1	-58...-54	Диапазон изменения уровней помех частично удовлетворяет требованиям
-38...-42	-53...-55	27,2	-58...-54	Диапазон изменения уровней помех частично удовлетворяет требованиям
-42...-44	-56...-59	14	-60...-57	Диапазон изменения уровней помех по большей части соответствует требованиям
-38...-41	-58...-60	8,18	-57...-54	Уровень помех соответствует требованиям
-35...-40	-58...-60	7,2	-56...-51	Уровень помех соответствует требованиям

В левой части таблицы показаны результаты измерений, в правой результаты расчета и выводы. Допустимое количество принятых поврежденных пакетов, определенное в стандарте 802.11g, равно 10%. Как видно из таблицы, результаты измерений соответствуют результатам расчетов, выполненных с применением разработанной программы.

Выводы по четвертой главе

1. На основе предлагаемой методики проектирования WLAN были разработаны алгоритмы расчетов, позволяющие моделировать различные зависимости, необходимые для проектирования беспроводной локальной сети. Разработанные алгоритмы расчетов внедрены в программу «Расчет беспроводных локальных сетей Wi-Fi (W-plane)». Ее использование позволит упростить расчет и сократить время проектирования WLAN.
2. Выполнены экспериментальные исследования по проверке разработанных методов и алгоритмов расчетов, подтверждена правомерность их применения в практике проектирования беспроводных локальных сетей.

Заключение

В работе сформулированы и решены следующие задачи.

1. Выполнен анализ характеристик и принципов работы беспроводных локальных сетей, проблем ЭМС и методов их решения, существующих в беспроводных локальных сетях, проанализирована эффективность их применения. Показано, что учет внутрисистемных и межсистемных помех необходимо проводить на ранних стадиях проектирования беспроводных локальных сетей. Рассмотрены основные принципы оценки ЭМС радиосистем и сформулированы задачи по оценке ЭМС, которые необходимо решать при проектировании беспроводных локальных сетей.
2. Разработаны алгоритмы работы механизма резервирования среды передачи, позволяющие обеспечить бесконфликтную работу на одной территории нескольких сот, использующих один частотный канал.
3. Разработана методика проектирования беспроводных локальных сетей, позволяющая оценить уровни внутрисистемных и межсистемных помех, а также снизить их влияние.
4. На основе предлагаемой методики проектирования WLAN были разработаны алгоритмы расчетов, позволяющие моделировать различные зависимости, существующие между параметрами WLAN и значениями уровней сигналов и помех в рецепторах WLAN.
5. Разработанные алгоритмы расчетов реализованы в программе «Расчет беспроводных локальных сетей Wi-Fi (W-plane)». Выполнены экспериментальные исследования по проверке разработанных методов и алгоритмов расчетов, подтверждена правомерность их применения в практике проектирования беспроводных локальных сетей. Результаты диссертационной работы были использованы при проектировании беспроводных локальных сетей различных компаний, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Практическая полезность работы состоит в том, что использование разработанной методики проектирования беспроводных локальных сетей с учетом ЭМС позволит снизить уровень внутрисистемных помех между приемопередатчиками соседних сот за счет рационального выбора параметров беспроводной локальной сети; повысить помехоустойчивость проектируемых беспроводных локальных сетей за счет учета межсистемных помех на ранних стадиях проектирования; снизить материальные и временные затраты на повторное проектирование за счет учета влияния радиопомех на ранних стадиях проектирования. Реализация разработанных алгоритмов расчетов в программе позволит сократить время и материальные затраты на проектирование WLAN за счет автоматизации вычислений, проводимых при проектировании. Использование в

WLAN разработанных алгоритмов работы *механизма резервирования среды передачи* позволит организовать безконфликтную работу на одной территории нескольких сот, использующих один частотный канал за счет разделения пропускной способности между взаимодействующими приемопередающими устройствами этих сот.

В разработанной программе «Расчет беспроводных локальных сетей Wi-Fi (W-plane)» реализован расчет различных конфигураций WLAN, отличающихся используемым оборудованием, типом и расположением антенн точек доступа. Интерфейс программы позволяет задавать значения различных параметров WLAN: скорость работы, радиус сот, характеристики приемников и передатчиков WLAN, КУ и ДН антенн, и т.д. По результатам расчетов строятся графики, демонстрирующие различные зависимости между параметрами беспроводной локальной сети и позволяющие рационально выбрать режимы работы WLAN.

Результаты диссертационной работы были использованы при проектировании беспроводных локальных сетей компаний ЗАО «Компания СФТ» и ОАО «РосДорБанк». Акты внедрения представлены в приложениях.

Отдельные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс МИЭМ. Так, на основе предложенной методики оценки межсистемной ЭМС, разработано учебное пособие. Методические материалы используются в лекционных курсах и на практических занятиях по дисциплине "ЭМС и защита информации" для студентов 9 - 10 семестров групп Р и РС, а также при выполнении курсовых и дипломных проектов по специальностям 200800 и 220500. Всего по дисциплине "ЭМС и защита информации" на тему «Межсистемная ЭМС» выполнено более 60 курсовых проектов.

Библиографический список

1. IEEE 802.11, «Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications», 1997.
2. IEEE 802.11b, «Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band», 1999.
3. IEEE 802.11b, «Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band», Corrigendum 1, 2001.
4. IEEE 802.11a, «Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band», 1999.
5. IEEE 802.11g, «Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band», 2003.
6. Князев А.Д., «Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств», М., Радио и связь, 1984.
7. «802.11 Wireless LAN Fundamentals», Pejman Roshan, Jonathan Leary, Cisco Press December 23, 2003.
8. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. - М.: Радио и связь, 1989. - 224 с.
9. В.А.Григорьев, О.И.Лагутенко, Ю.А.Распаев, «Сети и системы радиодоступа», М., Эко-Трендз, 2005.
10. В.Г.Гавриленко, В.А.Яшнов, «Распространение радиоволн в современных системах мобильной связи», Нижний Новгород, 2003.
11. Дружественное разделение спектра, Майкл Си, Сети, #12/2004.
12. Единство в многообразии символов, Павел Иванов, Сети, #14/2004.
13. IEEE 802.11 Handbook: A Designer's Companion, Second Edition, Softcover, 2005.
14. IEEE Wireless Communication Standards: A Study of 802.11, 802.15, and 802.16, Todor Cooklev, Softcover, 2004.
15. Krishna Sankar, Sri Sundaralingam, Andrew Balinsky, Darrin Miller, «Cisco Wireless LAN Security», Cisco Press, 2004.
16. Jim Geier, «Wireless Networks first-step», Cisco Press, 2004.
17. Jack Unger, «Deploying License-Free Wireless Wide-Area Networks», Cisco Press,

- 2003.
18. Devin Akin, Jim Geier, «CWAP Certified Wireless Analysis Professional Official Study Guide (Exam PW0-300)», McGraw-Hill/Osborne, 2004.
 19. Frank Ohrtman, Konrad Roeder, «Wi-Fi Handbook: Building 802.11b Wireless Networks», McGraw-Hill/Osborne, 2003.
 20. Thomas Maufer, «Field Guide to Wireless LANs for Administrators and Power Users», Prentice Hall PTR, 2003.
 21. Eric Ouellet, Robert Padjen, Arthur Pfund, Ron Fuller, Tim Blankenship, «Building a Cisco Wireless LAN», Syngress Publishing, Inc., 2002.
 22. Christian Barnes, Tony Bautts, Donald Lloyd, Eric Ouellet, Jeffrey Posluns, David M. Zendzian, Neal O'Farrell, «Hack Proofing Your Wireless Network», Syngress Publishing, Inc., 2002.
 23. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services // IEEE Trans. Veh. Technol. - 1980. - V. 29. - № 3. - P. 317 325.
 24. Jeffrey Wheat, Randy Hiser, Jackie Tucker, Alicia Neely, Andy McCullough «Designing a Wireless Network», Syngress Publishing, Inc., 2001
 25. Брэдли Дансмор, Тоби Скандьер, «Справочник по телекоммуникационным технологиям», М., Издательский дом «Вильямс», 2004.
 26. «Руководство по технологиям объединенных сетей», 3-е издание, М., Издательский дом «Вильямс», 2002.
 27. И.Шахнович, «Современные технологии беспроводной связи», М., Техносфера, 2004.
 28. В.Д.Челышев, «Приемные радиоцентры», М., Связь, 1975.
 29. Йоган Шиллер, «Мобильные телекоммуникации», М., Издательский дом «Вильямс», 2002.
 30. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Антенны и устройства СВЧ. – М. Издательство МАИ, 1999. – 528 с.: ил.
 31. Перфилов О.Ю., Тележный Б.Г., Модель оценки вероятностно-временных показателей ЭМС систем подвижной радиосвязи. Электросвязь. - 2001. №9. – М.: Радио и связь.
 32. Смирнов Н.И., Сивов В.А., Караваев Ю.А. Методика оценки ЭМС сотовых систем связи с кодовым и временным разделением каналов. Электросвязь. - 2001. №4. – М.: Радио и связь.
 33. Шинаков Ю.С. Управление мощностью в сотовых системах связи с кодовым разделением каналов. Электросвязь. - 2001. №2 – М.: Радио и связь.

34. Аповорич А.Ф., Березка М.В. Непреднамеренные радиопомехи и размеры ячеек сотовой связи. Электросвязь. - 2000. №10 – М.: Радио и связь.
35. Никитин А.Н. Повышение эффективности систем CDMA методом адаптации шага регулирования мощности передатчиков подвижных станций. Электросвязь. - 2000. №7 – М.: Радио и связь.
36. Ларин Е.А. Метод расчета функций распределения ослабления радиоволн при замираниях на интервалах радиорелейных линий. Электросвязь. - 1998. №8 – М.: Радио и связь.
37. Бадалов А. Л., Михайлов А. С. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС. Справочник. - - М.: Радио и связь, 1990. - 272 с.
38. Ларин Е.А. Расчет дифракционного ослабления на приземных трассах над пересеченной и горной местностью. Электросвязь. - 1997. №1 – М.: Радио и связь.
39. Yasoub M.D. Foundations of mobile radio engineering. CRC Press.: Boca Raton, 1993. – 481 p.
40. Lee W.C.Y. Mobile communications engineering. McGraw-Hill.:N.Y., 1982.
41. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. Пер. с англ./ Под ред. В.И.Журавлева – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.
42. Связь с подвижными объектами в диапазоне СВЧ / Под ред. У.К. Джейкса. М.: Связь. 1979. – 520с.
43. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1114 с.
44. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 640 с.
45. Дымович Н.Д., Красюк Н.П. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1974. – 536 с.
46. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: Сов. Радио, 1972. – 464 с.
47. Черенкова Е.Л., Чернышев О.В. Распространение радиоволн.–М.: Радио и связь, 1984.–272 с.
48. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1967. – с.
49. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: АН СССР. 1961. – 546 с.
50. Введенский Б.А., Аренберг А.Г. Вопросы распространения ультракоротких волн. М.: Сов. Радио, 1948.
51. White, Donald R. J. «A Handbook on Electromagnetic Interference and Compatibility», Volume 3. Gainesville, Va: Don White Consultants.

52. Уайт Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи: Пер. с англ., вып. 3/ Под ред. А.Д. Князева. – М.: Сов. радио, 1979. – 464 с.
53. Кечиев Л.Н., Степанов П.В. ЭМС: стандартизация и функциональная безопасность. – М.: МИЭМ, 2001. – 82 с.
54. Вайштейн Л.Л. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
55. Письменный Д.Т., Конспект лекций по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Айрис-пресс, 2004. – 256 с.
56. Олифер В. Г., Олифер Н. А., Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы, С.-П.: ИД Питер, 2001;
57. Кечиев Л.Н., Тряпицын А.В. Межсистемная электромагнитная совместимость. Методические указания и задание к курсовой работе по дисциплине "ЭМС и защита информации". - М. МИЭМ, 2002. -48с.
58. Тряпицын А.В. Методы управления влиянием межсистемных ЭМП//Тез докл. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. – М.: МИЭМ, 2002.
59. Тряпицын А.В. Анализ стандартов управления доступом к среде передачи в беспроводных локальных сетях стандарта 802.11 //Тез докл. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. – М.: МИЭМ, 2003.
60. Тряпицын А.В. Особенности построения беспроводных локальных сетей //Тез докл. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. – М.: МИЭМ, 2004.
61. Тряпицын А.В. Анализ АЧХ оборудования беспроводных сетей //Тез докл. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. – М.: МИЭМ, 2005.
62. Тряпицын А.В. Беспроводные радиосети. Тестирование существующей аппаратуры стандартов 802.11a/b/g. //ЭМС и проектирование электронных средств: Сб. науч. трудов кафедры РТУиС МИЭМ под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2004, с. 207.
63. Тряпицын А.В. Помехоустойчивость технологий Wi-Fi. //ЭМС, проектирование и технология электронных средств: Сб. науч. трудов кафедры РТУиС МИЭМ под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2004, с. 174 – 178.
64. Тряпицын А.В., программа «Расчет беспроводных локальных сетей Wi-Fi (W-plane)», заявлена 15.11.2005, зарегистрирована 10.01.2006, регистрационный номер в Реестре программ для ЭВМ 200610206.

Приложения