

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра Телекоммуникационных систем

«ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ»

Зав.кафедрой
к.т.н., профессор
Байкенов А. С.

« ____ » _____ 2015 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
пояснительная записка

на тему: Оценка производительности гибридной беспроводной сенсорной сети

Специальность 5В071900 Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Выполнил магистрант гр. ИТСП-13-1



(подпись)

Сарыбаева С.И.
(Ф.И.О.)

Научный руководитель доктор PhD

(ученая степень, звание)



(подпись)

Чайко Е.В.
(Ф.И.О.)

Консультант по ВТ к.т.н, старший преподаватель

(ученая степень, звание)



(подпись)

Ефремова Ю.И.
(Ф.И.О.)

Нормоконтролер к.т.н, старший преподаватель

(ученая степень, звание)



(подпись)

Елизарова Е.Ю.
(Ф.И.О.)

Рецензент к.т.н, МОИТ

(ученая степень, звание)

(подпись)

Хасенова Г.И.
(Ф.И.О.)

Алматы, 2015

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Факультет «Радиотехники, электроники и связи»

Кафедра «Телекоммуникационных систем»

Специальность 6М071900 «Радиотехники, электроники и телекоммуникации»

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Сарыбаевой Саиде Исматиллаевне

Тема диссертации Оценка производительности гибридной беспроводной сенсорной сети

Утверждена приказом по университету № от « » сентября 2013 г.

Срок сдачи законченной диссертации « ____ » _____ 2015 г.

Перечень вопросов, подлежащих разработке в магистерской диссертации, или краткое содержание магистерской диссертации: проведена оценка производительности гибридной беспроводной сенсорной сети с учетом влияния помех с использованием технологии ZigBee.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

- 1 Графики влияния шумовых помех с FHSS и ЧМ на устройства ZigBee;
- 2 Графики влияния шумовых помех FHSS и М-ичной ЧМ на ZigBee;
- 3 Графики влияния гармонических помех на ZigBee с FHSS и ЧМ;
- 4 Графики влияния гармонических помех с FHSS и М-ичной ЧМ на ZigBee;
- 5 График влияния комбинированной (шумовой и гармонической) помехи на ZigBee с FHSS и ЧМ;
- 6 Программа для расчета влияния шумовой помехи на ZigBee.

Основная рекомендуемая литература:

- 1 Рoшан Педжман, Лиэри Джонатан. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.15.4.: Пер. с англ. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. - 304 с.

2 Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты./Под ред. В.И. Борисова. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: РадиоСофт, 2008. - 512 с.

График
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1 Беспроводные сенсорные сети	11.11.13 г.	
2 Технология ZigBee	09.12.13 г.	
3 Исследование различных помех, влияющих на производительность сенсорной сети	20.03.14 г.	
4 Оценка влияния помех радиоэлектронных средств на беспроводные устройства ZigBee	17.06.14 г.	
5 Проведение эксперимента по определению влияния условий распространения при воздействии помех на скорость обмена информацией	08.12.14 г.	

Дата выдачи задания «__» _____ 201__ г.

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

Байкенов А. С.

(Ф.И.О.)

Руководитель диссертации _____

(подпись)

Чайко Е.В.

(Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению магистрант _____

(подпись)

Сарыбаева С.И.

(Ф.И.О.)

Содержание

	Введение	8
1	Теоретическая часть	11
1.1	Беспроводные сенсорные сети	11
1.2	Сущность и понятие технологии ZigBee	13
1.2.1	Описательная характеристика стандарта IEEE 802.15.4	13
1.2.2	Применение протокола ZigBee	14
1.2.3	Типы устройств ZigBee	15
1.2.4	Режимы работы ZigBee	16
1.2.5	Адресация XBee Series 2	18
1.2.6	Поиск устройств	19
1.2.7	Индикаторы присоединения	19
1.3	Заключение по первой главе	21
2	Исследование различных помех, влияющих на производительность сенсорной сети	22
2.1	Помехи в диапазоне 2,4 ГГц	22
2.2	Структура совместимости ZigBee с другими устройствами, работающими в диапазоне 2.4 ГГц	24
2.2.1	Факторы, действующие на помехи	26
2.3	Распространение радиосигнала в реальных условиях	26
2.3.1	Затухание радиосигналов при распространении	27
2.4	Анализ особенностей распространения радиоволн в пикосетях	28
2.4.1	Существующие подходы для расчета зоны обслуживания в пикосетях	31
2.4.2	Постановка задачи исследования	35
2.5	Заключение по второй главе	36
3	Оценка влияния помех радиоэлектронных средств на беспроводные устройства ZigBee	37
3.1	Влияние шумовых помех с FHSS и ЧМ на устройства ZigBee	37
3.2	Влияние шумовых помех FHSS и М-ичной ЧМ на ZigBee	40
3.3	Влияние гармонических помех на ZigBee с FHSS и ЧМ	43
3.4	Влияние гармонических помех с FHSS и М-ичной ЧМ на ZigBee	48
3.5	Влияние комбинированной (шумовой и гармонической) помехи на ZigBee с FHSS и ЧМ	50
3.6	Заключение по третьей главе	51
4	Экспериментальная часть	53
4.1	Параметры исследуемых помех, влияющих на скорость обмена информацией	53
4.2	Определение влияния условий распространения при воздействии помех на скорость обмена информацией	59

4.3	Влияние отражающих препятствий и расстояния между ними на уровень мощности принимаемого сигнала	64
4.4	Определение совместимости и влияния воздействия помех на скорость обмена информацией идентичных устройств ZigBee при передаче данных на одном канале на частоте 2.4 ГГц	65
4.5	Заключение по экспериментальной части	68
	Заключение	69
	Список литературы	72
	Приложение А	76

Бұл магистрлік диссертацияда ZigBee технологиясын қолданып бөгеуілдердің әсерін есепке алғандағы, гибридтік сымсыз сенсорлік желінің өнімділігіне баға берілген. Жұмыстың техникалық бөлімінде осы технологияның сипаттамасы келтіріген, сонымен қатар сыртқы бөгеуілдердің интенсивті әсері жағдайындағы кіші радиустағы сымсыз құрылғылардың бөгеуілге тұрақтылығын арттыру әдістері өңделген. Жұмыстың эксперименталдық бөлімінде биттік қатенің критикалық ықтималдығы және мәлімет таратудағы қателер болатын кездегі сигналдың бөгеуілмен жабылуының критикалық коэффициентін анықтайтын эксперименталдық зерттеулер жүргізілген. Жұмыстың аналитикалық бөлімінде ZigBee құрылғыларына шулық, гармоникалық және біріктірілген бөгеуілдердің әяері бағанланған.

Аннотация

В данной магистерской диссертации проведена оценка производительности гибридной беспроводной сенсорной сети с учетом влияния помех с использованием технологии ZigBee. В технической части работы приведено описание данной технологии, а также разработаны методы повышения помехоустойчивости беспроводных устройств малого радиуса действия в условиях интенсивного воздействия внешних помех. В экспериментальной части работы проведены экспериментальные исследования определения критического коэффициента перекрытия сигнала помехой, при котором возникают ошибки при передаче данных и критической вероятности битовой ошибки. В аналитической части работы произведена оценка влияния шумовых, гармонических и комбинированных помех на устройства ZigBee.

Abstract

In this master's degree dissertation the estimation of roductivity of hybrid off-wire sensory network isconducted taking into account influence of hindrances witht he use of technology of ZigBee. To technical part of work description of this techn ology isdriven, and also the methods of increase of antijammingness of off-wire devices of short-range-legged are worked out in the conditions of intensive influence of external noises legged are worked out inthe conditions of intensive influence of external noises. Experimental studies of determination of critical coeff icient ofceiling of signal a hindrance are undertaken in experimentalpart of work, at that there are errors at comunication of dataand critical probability of bit error. In analytical part of work the estimation of influence of noise,harmonic and combined hindrances is produced on devices of ZigBee.

Введение

В ближайшем будущем в соответствии с прогнозами развития телекоммуникаций в мире [1, 2] будет насчитываться несколько триллионов беспроводных телекоммуникационных устройств. Можно предположить, что значительная часть этих устройств будет работать в беспроводных сенсорных сетях (БСС), осуществляющих мониторинг различных характеристик окружающей среды и расположенных в ней объектов. В связи с этим все большую актуальность приобретают исследования как сенсорных сетей в целом, так и факторов, влияющих на производительность сенсорных сетей.

Сегодня технология беспроводных сенсорных сетей на основе стандартов 802.15.4. ZigBee является единственной беспроводной технологией, с помощью которой можно решить задачи мониторинга и контроля, которые критичны к времени автономной работы датчиков.

Объединенные в беспроводную сенсорную сеть, датчики образуют распределенную, самоорганизующуюся систему сбора, обработки и передачи информации. Основной областью применения является контроль и мониторинг измеряемых параметров различных физических полей, сред и объектов.

Достоинства систем на основе сенсорных сетей:

- возможность расположения в труднодоступных местах, куда сложно и дорого тянуть обыкновенные проводные решения;
- оперативность и удобство развертывания и обслуживания системы;
- надежность сети в целом — в случае выхода из строя одного из них, информация передается через соседние элементы;
- возможность добавления или исключения любого количества устройств из сети;
- длительное время работы без замены элементов питания.

Использование беспроводных устройств позволяет создать диспетчерскую систему, обеспечивающую оператору непрерывный доступ к информации о состоянии обслуживаемых объектов. Сегодня задача построения распределенных систем сбора данных, управления и мониторинга как никогда актуальна в самых различных прикладных областях. Однако использование для этого традиционных проводных соединений не всегда эффективно из-за высокой стоимости монтажных и пуско-наладочных работ, а также технического обслуживания. Кроме того, в некоторых ситуациях вообще невозможна прокладка кабелей по технологическим или организационным причинам, поэтому все большее применение находят беспроводные сети.

По сравнению с проводными системами беспроводные сети имеют целый ряд преимуществ: отсутствие кабелей электропитания и передачи данных; низкая стоимость монтажа, пуско-наладки и технического обслуживания системы; внедрение и модификация сети на эксплуатируемом объекте без вмешательства в процесс функционирования; надежность и

отказоустойчивость всей системы при нарушении отдельных соединений между узлами. Уникальные особенности и отличия беспроводных сетей от традиционных проводных систем передачи данных делают их применение эффективным в самых различных областях. Например, в области безопасности, мониторинга окружающей среды, здравоохранения, в различных приложениях автоматизации зданий, где использование традиционных проводных систем передачи данных часто нецелесообразно по экономическим причинам. Например, если требуется внедрить новую или расширить существующую систему в эксплуатируемом здании, то в этом случае применение беспроводных решений не требует проведения дополнительных монтажных работ с нарушением внутренней отделки помещений, практически не причиняются неудобства сотрудникам или жильцам здания и т.д. В итоге значительно снижается стоимость внедрения системы.

Очень важной характеристикой беспроводной сети является ее производительность. К основным факторам, от которых идет зависимость производительности беспроводной сети являются скорость передачи данных, задержка передачи данных и время отклика (реакции). Все перечисленные факторы напрямую зависят от ряда проблем, связанных с моделированием препятствий на пути распространения сигналов, а также в связи с многолучевым распространением сигналов и большим количеством переотражений.

Во-первых, на распространении сказываются стены и массивные предметы обстановки. Стены и перекрытия из дерева, синтетических материалов, стекла оказывают небольшое влияние на распространение радиоволн, препятствия из кирпича, бетона - среднее, железобетона и стен с фольговыми утеплителями высокое. Металлические стены и перекрытия существенно влияют на дальность вплоть до полной невозможности связи.

Во-вторых, интерференционный характер электромагнитного поля внутри помещений (за счет многократных отражений от предметов) выражен более резко. Проявляется это в уменьшении напряженности поля и изменении исходной плоскости поляризации волн. В большей части помещений можно столкнуться и с так называемыми замираниями (мертвыми зонами), в которых прием сигнала сильно затруднен. Такая ситуация возможна, даже если передатчик и приемник находятся в прямой видимости.

Мертвая зона появляется, если длины путей распространения эффективно расходятся на нечетное количество полуволн. Но абсолютно мертвые зоны обычно заметно локальны и могут быть устранены небольшим перемещением антенн приемника и или передатчика. Это очень важно при планировании размещения устройств беспроводной связи в помещениях.

В третьих, существуют также помехи излучаемые от различных генераторов, передатчиков, работающих в частоте 2,4 ГГц. Важное значение передачи информации ставится под угрозу.

Исследование распространения радиоволн и разработка модели затухания для помещений сложной формы для устройств ZigBee были подробно рассмотрены [1]. В литературе [2,3,4,5] рассмотрены вопросы влияния различных помех на системы связи. Однако вопросы о критическом положении помехи относительно сигнала, при котором возникает искаженная передача информации, освещены в литературе недостаточно. В технической документации [6,7,8] говорится о высокой помехозащищенности устройств ZigBee, но численные значения не приводятся.

Актуальность темы. Решения на основе беспроводных сетей в полной мере отвечают требованиям, предъявляемым и со стороны промышленности: отказоустойчивость; масштабируемость; адаптируемость к условиям эксплуатации; энергетическая эффективность; учет специфики прикладной задачи; экономическая рентабельность и т.д. Технологии беспроводных сетей находят свое применение в таких задачах промышленной автоматизации как: контроль и диагностика промышленного оборудования; техническое обслуживание оборудования по текущему состоянию; мониторинг производственных процессов; телеметрия для исследований и испытаний и многих других задачах. Одними из ключевых технологий в современной концепции построения гибридных беспроводных сенсорных сетей являются технологии беспроводного доступа с использованием устройств малого радиуса действия ZigBee. Наиболее перспективными являются те области, где требуется сбор и обработка большого количества одновременно измеряемых параметров. Внедрение технологий ZigBee в эти области позволяет не только упростить взаимодействие между различным оборудованием и периферийными устройствами, но и заменить традиционные проводные соединения на беспроводные каналы.

Целью данной магистерской диссертации является оценка производительности сенсорной сети с учетом влияния различных помех на передачу данных оборудования ZigBee.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 1 Провести оценку влияния помех радиоэлектронных устройств на устройства ZigBee расчетным путем;
- 2 Написать программу по расчету вероятностей ошибок влияния на устройства ZigBee;
- 3 Провести эксперимент с помощью генератора и выяснить при каких условиях при передаче данных возникают ошибки;
- 4 Рассмотреть влияние смодулированного сигнала на передачу данных;
- 5 Провести и проанализировать эксперимент совместимости идентичных устройств ZigBee, где один комплект будет передавать сигнал, а второй выступать как помеха.

1 Теоретическая часть

1.1 Беспроводные сенсорные сети

Беспроводные сенсорные сети (wireless sensor networks) состоят из миниатюрных вычислительно-коммуникационных устройств — мотов (от англ. motes — пылинки), или сенсоров. Мот представляет собой плату размером обычно не более одного кубического дюйма. На плате размещаются процессор, память — флэш и оперативная, цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи, радиочастотный приемопередатчик, источник питания и датчики.

Датчики могут быть самыми разнообразными; они подключаются через цифровые и аналоговые коннекторы. Чаще других используются датчики температуры, давления, влажности, освещенности, вибрации, реже — магнитоэлектрические, химические (например, измеряющие содержание CO, CO₂), звуковые и некоторые другие.

Набор применяемых датчиков зависит от функций, выполняемых беспроводными сенсорными сетями. Питание мота осуществляется от небольшой батареи. Моты используются только для сбора, первичной обработки и передачи сенсорных данных. Внешний вид мотов, выпускаемых различными производителями, приведен на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 - Внешний вид мотов

Основная функциональная обработка данных, собираемых мотами, осуществляется на узле, или шлюзе, который представляет собой достаточно мощный компьютер. Но для того, чтобы обработать данные, их нужно сначала получить.

Для этой цели узел обязательно оснащается антенной. Но в любом случае доступными для узла оказываются только моты, находящиеся достаточно близко от него; другими словами, узел не получает информацию непосредственно от каждого мота. Проблема получения сенсорной информации, собираемой мотами, решается следующим образом. Моты могут обмениваться между собой информацией с помощью приемопередатчиков, работающих в радиодиапазоне.

Это, во-первых, сенсорная информация, считываемая с датчиков, а во-вторых, информация о состоянии устройств и результатах процесса передачи данных. Информация передается от одних мотов другим по цепочке, и в итоге ближайшие к шлюзу моты сбрасывают ему всю аккумулированную информацию. Если часть мотов выходит из строя, работа сенсорной сети после реконфигурации должна продолжаться. Но в этом случае, естественно, уменьшается число источников информации.

Для выполнения функций на каждый мот устанавливается специализированная операционная система. В настоящее время в большинстве беспроводных сенсорных сетей используется TinyOS - ОС, разработанная в Университете Беркли. TinyOS относится к программному обеспечению с открытым кодом. TinyOS - это управляемая событиями операционная система реального времени, рассчитанная на работу в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Эта ОС позволяет мотам автоматически устанавливать связи с соседями и формировать сенсорную сеть заданной топологии. Последний релиз TinyOS 2.0 появился в 2006 году.

Важнейшим фактором при работе беспроводных сенсорных сетей является ограниченная емкость батарей, устанавливаемых на моты. Следует учитывать, что заменить батареи чаще всего невозможно. В связи с этим необходимо выполнять на мотах только простейшую первичную обработку, ориентированную на уменьшение объема передаваемой информации, и, что самое главное, минимизировать число циклов приема и передачи данных. Для решения этой задачи разработаны специальные коммуникационные протоколы, наиболее известными из которых являются протоколы альянса ZigBee. Данный альянс был создан в 2002 году именно для координации работ в области беспроводных сенсорных сетей. В него вошли крупнейшие разработчики аппаратных и программных средств: Philips, Ember, Samsung, IBM, Motorola, Freescale Semiconductor, Texas Instruments, NEC, LG, OKI и многие другие (всего более 200 членов). Корпорация Intel в альянс не входит, хотя и поддерживает его деятельность.

В принципе, для выработки стандарта, в том числе стека протоколов для беспроводных сенсорных сетей, ZigBee использовал разработанный ранее стандарт IEEE 802.15.4, который описывает физический уровень и уровень доступа к среде для беспроводных сетей передачи данных на небольшие расстояния (до 75 м) с низким энергопотреблением, но с высокой степенью надежности.

1.2 Сущность и понятие технологии ZigBee

1.2.1 Описательная характеристика стандарта IEEE 802.15.4

Протокол передачи данных ZigBee основанный на стандарте IEEE 802.15.4. ZigBee — название набора протоколов высокого сетевого уровня, использующих маленькие, маломощные радиопередатчики, основанные на стандарте IEEE 802.15.4. Этот стандарт описывает беспроводные персональные вычислительные сети (WPAN). ZigBee нацелена на приложения, которым требуется большее время автономной работы от батарей и большая безопасность, при меньших скоростях передачи данных.

Сети на основе протокола ZigBee начали развиваться с 1998 г., когда стало понятно, что протоколы WiFi и Bluetooth стали неподходящими для многих приложений. В частности, многие инженеры увидели необходимость в самоорганизуемых ad-hoc сетях.

Основные технические характеристики. Стандарт ZigBee описывает все уровни, через которые проходит поток передаваемой информации, начиная с физического уровня и заканчивая уровнем поддержки профилей устройств. Нижние два уровня описываются стандартом IEEE 802.15.4 [6] и определяют физические параметры приемопередатчика, структуру радиочастотной посылки, число адресуемых устройств, механизмы проверки и подтверждения целостности принятых данных, процедуры оценки качества канала связи и алгоритмы предотвращения коллизий.

Приемопередающие устройства, предназначенные для работы в стандарте IEEE 802.15.4, обладают следующими основными характеристиками:

- трансивер работает на частоте 2,4 ГГц по 16-ти каналам с шагом 5 МГц между каналами (разрешено для использования во всех странах мира);
- максимальная скорость передачи данных по радиоканалу составляет 250 Кбит/с;
- максимальное расстояние связи на открытой территории не меньше 100 м.

Уровни с третьего по шестой описываются непосредственно спецификацией стека ZigBee. На этих уровнях определяется, какими свойствами должны обладать устройства, входящие в сеть, каким образом пакет информации передается от одного узла сети к другому, как обеспечивается безопасность передачи информации, как новое устройство подключается к сети и ее топология, какой узел в сети является главным, какой подчиненным. Так как ZigBee может активироваться (то есть переходить от спящего режима к активному) за 15 миллисекунд или меньше, скрытое состояние может быть очень низким, особенно по сравнению с Bluetooth, для которого задержка, образующаяся при переходе от спящего режима к активному обычно достигает трёх секунд. Так как

ZigBee большую часть времени находится в спящем режиме уровень потребления энергии очень низкий, благодаря чему достигается долгая жизнь батарей.

Основная особенность технологии ZigBee заключается в том, что она при относительно невысоком энергопотреблении поддерживает не только простые топологии беспроводной связи («точка-точка» и «звезда»), но и сложные беспроводные сети с ячеистой топологией с ретрансляцией и маршрутизацией сообщений (рисунок 1.2).

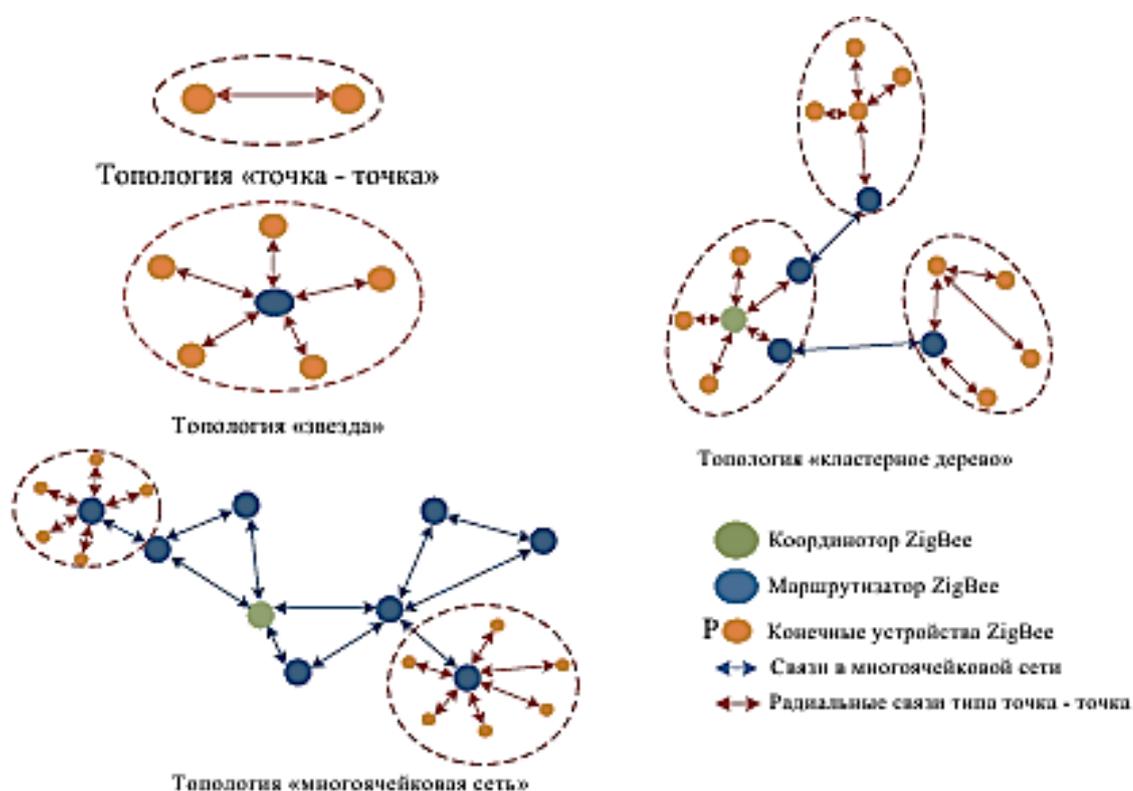


Рисунок 1.2 – Различные топологии сетей ZigBee 802.15.4

1.2.2 Применение протокола ZigBee

ZigBee — недорогой, маломощный стандарт для беспроводных сетей с ячеистой топологией. Низкая стоимость позволяет широко развернуть технологию для беспроводных приложений контроля и наблюдения, маломощность позволяет долгую жизнь маленьким батарейкам. Области применения данной технологии — это построение беспроводных сетей датчиков, автоматизация жилых и строящихся помещений, создание индивидуального диагностического медицинского оборудования, системы промышленного мониторинга и управления, а также при разработке бытовой электроники и персональных компьютеров.

Цель ZigBee - это создание недорогой, самоорганизующейся сети с ячеистой топологией предназначенной для решения широкого круга задач требующих низкую скорость передачи данных и низкое энергопотребление.

Типовые области приложения:

а) домашние развлечения и контроль - рациональное освещение, продвинутый температурный контроль, охрана и безопасность, фильмы и музыка.

б) домашнее оповещение - датчики воды и энергии, мониторинг энергии, датчики задымления и пожара, рациональные датчики доступа и переговоров.

в) мобильные службы — мобильные оплата, мониторинг и контроль, охрана и контроль доступа, охрана здоровья и телепомощь.

г) коммерческое строительство - мониторинг энергии, HVAC, света, контроль доступа.

д) промышленное оборудование - контроль процессов, промышленных устройств, управление энергией и имуществом.

1.2.3 Типы устройств ZigBee

Существуют три различных типа устройств ZigBee [7].

1) координатор ZigBee (ZC) — наиболее ответственное устройство, формирует пути древа сети и может связываться с другими сетями.

2) маршрутизатор ZigBee (ZR) — Маршрутизатор может выступать в качестве промежуточного маршрутизатора, передавая данные с других устройств.

3) конечное устройство ZigBee (ZED) — его функциональная нагруженность позволяет ему обмениваться информацией с материнским узлом (или координатором, или с маршрутизатором), он не может передавать данные с других устройств.

Первый опыт разработки преобразователей частоты и регуляторов напряжения с ZigBee-интерфейсом. Преобразователи частоты (ПЧ) и многоканальные регуляторы напряжения (МРН) имеют высокопроизводительную систему управления на базе DSP микроконтроллера TMS320F2810 с интегрированным готовым ZigBee-модулем XBP24-X от компании Digi International. Для обеспечения качественного приема использована всенаправленная внешняя антенна с возможностью наклона оси до 90° и поворота до 180°. Интерфейс ZigBee предназначен для беспроводного конфигурирования, настройки параметров и оперативного управления сетью исполнительных устройств на базе ПЧ и МРН от персонального компьютера с помощью демонстрационной интерфейсной платы XBIB-U-DEV.

На данный момент достигнуты невысокие скорости передачи информации (10...15 Кбит/с) при полномасштабной реализации протокола ZigBee, количестве узлов в сети не более 10 и расстояниях между узлами до 300 м (в прямой видимости). Несомненным достоинством беспроводной технологии является:

а) возможность изготовления удобных пультов для обслуживания сложной преобразовательной техники, которые не требуют подключения к

сети и объекту и автоматически обеспечивают гальваническую развязку оборудования;

- б) эффективность и надежность управления;
- в) возможность применения энергосберегающего оборудования;
- г) применение интеллектуальных счетчиков;

Недостатки:

- а) не высокая распространенность;
- б) к настоящему моменту выпущено весьма ограниченное количество микроконтроллеров, поддерживающих ZigBee;
- в) слабая тех поддержка со стороны производителей устройств.

Одним из основных преимуществ стандарта ZigBee/802.15.4 является простота установки и обслуживания подобных устройств. Особенности спецификации ZigBee позволяют с легкостью развертывать беспроводные персональные сети. Реализация данного принципа предполагает внедрение ZigBee-модулей во все новые приборы и системы для дома и офиса.

1.2.4 Режимы работы ZigBee

Режим бездействия

Если RF-модуль не отправляет и не получает данные, он переходит в Режим бездействия (Idle Mode)[8].

В этом режиме RF-модуль ожидает получения и проверяет входящие RF-данные. Из режима бездействия возможны переходы в следующие режимы:

- а) режим передачи (данные в последовательном буфере готовы к формированию в пакеты);
- б) режим приема (получены действительные RF-данные);
- в) режим сна (только для Конечных устройств);
- г) режим управления (введена последовательность перехода в Режим управления).

Режим передачи

Когда последовательные данные получены и готовы к формированию в пакеты, RF-модуль выходит из Режим бездействия и приступает к передаче данных. Адрес назначения указывает, для какого (или каких) узлов предназначены данные. До момента отправки данных модуль проверит, существует ли 16-битный сетевой адрес и маршрут к узлу назначения. Если 16-битный сетевой адрес неизвестен, начнется процедура определения сетевого адреса. Если неизвестен маршрут, начнется процедура определения маршрута к узлу назначения. Если модуль с соответствующим сетевым адресом не найден, пакет будет пропущен. Данные будут переданы после нахождения маршрута. Если процедура определения маршрута оканчивается неудачно, пакет будет пропущен.

При передаче данных от одного узла к другому, подтверждение сетевого уровня отправляется обратно по найденному маршруту к узлу-источнику. Этот пакет с подтверждением указывает узлу-источнику, что пакет данных

был получен узлом назначения. Если сетевое подтверждение не получено, узел-источник повторит передачу данных.

Режим приема

После получения действительного RF-пакета, данные передаются в последовательный буфер приема.

Режим управления

Для изменения или получения параметров RF-модуля, модуль должен перейти в Режим управления-состояние, в котором входящие последовательные символы интерпретируются как команды (для альтернативного варианта настройки модуля см. раздел Режим API). AT-режим управления. Для перехода в AT-режим управления: Введите командную последовательность из 3-х символов "+++" и подождите некоторое время до и после командных символов. Последовательность перехода в AT-режим управления по умолчанию:

- а) нет символов в течение одной секунды [параметр GT = 0x3E8] ;
- б) в течение одной секунды введите три символа плюс ("+++") [параметр CC = 0x2B] ;
- в) нет символов в течение одной секунды [параметр GT = 0x3E8] .

Все параметры в последовательности можно изменить.

Ответ на команду. После отправки команды модулю, модуль проверит и выполнит команду. Если выполнение команды прошло успешно, модуль возвратит сообщение "OK". Если выполнение команды окончилось ошибкой, модуль возвратит сообщение "ERROR".

Режим сна

В Режиме сна RF-модуль переходит в состояние низкого энергопотребления. Для перехода в Режим сна, должно состояться одно из следующих событий (в дополнение к ненулевому значению параметра SM):

- а) активация вывода Sleep_RQ ;
- б) режим бездействия модуля (данные не передаются и не принимаются) в течение времени, определенного параметром ST.

Команда SM является основной командой настройки Режимы сна. По умолчанию Режим сна отключен (SM=0), и модуль остается в режиме бездействия/приема без перехода в режим сна. В состоянии бездействия модуль может постоянно контролировать наличие данных как в последовательном, так и RF-каналах.

Управление режимом сна с помощью вывода Sleep_RQ

Вывод Sleep_RQ (вывод 9) управляет усыплением и пробуждением устройства в зависимости от уровня сигнала: если Sleep_RQ активирован (высокий уровень), модуль прекратит отправку и прием данных, и перейдет в состояние низкого энергопотребления. В этом режиме модуль не будет отвечать на запросы по последовательному или RF-каналу.

Для пробуждения модуля необходимо деактивировать (установить на низкий уровень) вывод Sleep_RQ (вывод 9). После этого модуль проснется и, как только вывод CTS установится на низкий уровень, будет готов к приему

или отправке данных. Когда модуль выходит из режима сна, он отправляет запрос к родительскому устройству (Маршрутизатору или Координатору) для получения информации о наличии буферизированных пакетов данных, предназначенных для Конечного устройства. В течение всего времени, пока модуль находится в активном режиме, он будет опрашивать родительское устройство, ожидая ответа о полученных RF-данных. Как только родительское устройство получило RF-данных для одного или более своих дочерних устройств, оно перенаправит пакет этому Конечному устройству сразу после получения запроса.

Сон в цикле предназначен для периодического пробуждения модуля, с целью проверки наличия для него RF-данных, и перехода в режим сна, после такой проверки. Если SM параметр равен 4, модуль будет спать в течение времени, определенного параметром SP. После истечения времени SP, модуль проснется и проверит наличие последовательных или RF-данных. Для проверки наличия RF-данных, модуль отправит запрос родительскому устройству (Маршрутизатору или Координатору). Если родительское устройство получило данные для модуля, модуль останется в активном режиме пока не получит данные. Иначе модуль снова перейдет в режим сна.

После получения последовательных или RF-данных, модуль запустит таймер ST, и останется в активном режиме до истечения таймера. В активном режиме модуль продолжит отправку запросов родительскому устройству для проверки наличия данных. Таймер ST будет перезапускаться каждый раз, когда модуль получает последовательные или RF-данные. После истечения таймера ST модуль перейдет в режим сна.

Когда модуль выходит из режима сна он активирует вывод On/Sleep для индикации своего состояния для хост-приложения. Если хост-приложение требует большего времени сна, чем обеспечивает параметр SP, или оно должно просыпаться только при наличии RF-данных, возможно применение команды SN для отключения активации вывода On/Sleep в течение нескольких интервалов SP. Например, если SP установлен на 20 секунд и SN = 5, вывод On/Sleep останется отключенным (то есть, на низком уровне) в течение 100 секунд.

Если контроль CTS активирован, вывод CTS (вывод 12) перейдет на низкий уровень (0В), при пробуждении модуля и деактивируется (установится на верхний уровень) при переходе в режим сна, указывая, таким образом, хост-приложению о возможностях обмена данными.

1.2.5 Адресация XBee Series 2

XBee модули поддерживают прямую адресацию устройств ZigBee и адресацию устройств на уровне приложений. Прямая адресация устройств обеспечивает простой способ отправки данных от одного устройства к другому, при этом скрывая информацию об адресации на уровне приложений (терминалы и идентификаторы кластера ZigBee). Если устройство поддерживает несколько терминалов или идентификаторов кластера, при

передаче можно использовать адресацию на уровне приложений с указанием терминала и идентификатора кластера.

Все модули XBee Series 2 могут быть идентифицированы с помощью уникального 64-битного адреса или строчного идентификатора (в символах ASCII). 64-битный адрес модуля может быть считан с помощью команд SH и SL. Строка ASCII идентификатора настраивается с помощью команды NI. Для передачи данных при прямой адресации устройств достаточно знать адрес назначения, который задается с помощью 64-битного физического адреса устройства или NI-строки. Модули Xbee поддерживают режим адресации Координатора и широковещательный режим адресации. Адресация устройств в AT-режиме выполняется с помощью команд DL, DH, или DN. В режиме API для указания адресов

При 64-битной адресации адрес назначения узла должен быть установлен 64-битным значением, соответствующим адресу. При использовании AT-команд, 64-битный адрес задается с помощью команд DH и DL. В API-режиме 64-битный адрес устанавливается с помощью фрейма запроса на передачу. Для отправки пакета к RF-модулю, используя его 64-битный адрес (в прозрачном режиме): Установите параметры DH и DL узла-источника соответствующим 64-битным адресом узла назначения (параметры SH и SL).

Так как протокол Zigbee основан на 16-битной сетевой адресации, 64-битный физический адрес узла назначения должен быть преобразован в 16-битный сетевой адрес. Если 16-битный сетевой адрес узла не известен, модуль-источник отправит широковещательный запрос для определения сетевого адреса. Модуль, чей адрес соответствует 64-битному значению, указанному в запросе, ответит пакетом, содержащим собственный 16-битный сетевой адрес. Как только сетевой адрес получен, данные могут передаваться. Модули поддерживают таблицы, в которых хранятся до семи 64-битных адресов и соответствующих им 16-битных сетевых адресов [9].

Модули XBee Series 2 предоставляют некоторые дополнительные возможности, а именно:

- а) поиска устройств;
- б) удаленной настройки;
- в) самопроверки;
- г) индикации присоединения;
- д) идентификации устройств в ручном режиме;
- е) контроля над источником питания.

1.2.6 Поиск устройств

Команда определения узла (ND) используется для поиска всех модулей, которые присоединились к ZigBee сети.

При выполнении команды ND модуль отправляет в сеть широковещательный пакет с командой определения узла. Все устройства, которые получают команду, ответят данными с включением собственного 64-

битного адреса, 16-битного сетевого адреса и строки NI (См. команду NI). Команда ND удобна для составления списка адресов всех модулей в сети.

В режиме API есть возможность настройки командных регистров удаленного устройства с помощью API фрейма удаленного командного запроса. Команды в данном фрейме можно использовать как для чтения, так и для настройки параметров удаленного модуля.

Диапазон и качество связи можно проверить с помощью функции "программной петли данных". Для отправки и возврата сообщения от удаленного устройства, данные необходимо адресовать Идентификатору кластера (0x12) на Терминале данных (0xE6) удаленного устройства [9].

1.2.7 Индикаторы присоединения

Команда JN используется для отправки сообщения Координатору, при присоединении Маршрутизатора или Конечного устройства к сети. Если команда JN активирована для индикации присоединения, ответный пакет ND будет отправлен Координатору после присоединения устройства к сети (сообщение о присоединении доступно только на Координаторе).

На рисунке 1.3 показан формат данного пакета ZigBee, где каждое поле отвечает за свою функцию:

Personal number — номер отловленного сниффером пакета.

Time — время от старта. Это используется для составления временной диаграммы.

Pnl	Time (ms)	Length	Frame pending	Sequence number	Dest PAN	Dest Address	Source Address	MAC payload
RX		32						
218								

Рисунок 1.3 - Формат пакета

Length — длина пакета + 2 байта LQI и RSSI.

Security enabled — шифрование включено/выключено.

Frame pending — 0 — это целый пакет. 1 — это часть пакета. (В ZigBee большой пакет может быть разбит на части).

Ack. request — 0 — отправка без подтверждения. 1- с подтверждением.

Intra-PAN — 1 — пакет передается внутри сети. 0 — передать пакет в другую сеть.

Sequence number — порядковый номер пакета. Используется для подтверждения получения пакета в текущем соединении.

MAC Payload (Medium Access Control/Управление доступом к среде Payload/Полезная нагрузка) — сообщение которое отправлено по сети или между сетями

В ZigBee пакеты не передаются сразу. Они ставятся в очередь. Каждому пакету в очереди присваивается уникальный номер. За один сеанс передачи может быть передано более одного пакета и порядковый номер нужен для того чтоб определить какие именно пакеты дошли успешно.

Dest. PAN (Destination Personal Area Network/Персональная сеть) — адрес сети получателя.

Dest. Address — адрес получателя в сети назначения(адрес сети может быть другой). В данном случае координатор. Это не обязательно адрес конечного получателя. Может быть другим если пакет следует по маршруту.

Source Address — адрес отправителя сообщения. Это не обязательно адрес конечной точки(устройства) которое отправило сообщение. Это может быть адресом того кто переслал сообщение [10].

1.3 Заключение по первой главе

В заключение хочу отметить, что в настоящее время беспроводные сетевые технологии находятся в стадии активного развития, кроме того, постоянно вводятся новые стандарты и радиопротокولات. Серьезные усовершенствования конструкции микросхем радио трактов и сокращение стоимости устройств позволяют создавать большие беспроводные сети контроля и управления, способные надежно функционировать в неблагоприятных условиях нашей среды при очень ограниченных программных ресурсах. Только в этом случае они могут быть успешно конкурировать с проводными системами.

Внедрение технологии ZigBee подтверждает, что перечисленные выше требования к беспроводным системам являются непреодолимыми. Используемый для разработки компактного сетевого протокола стандарт IEEE.802.15.4 способен обеспечить любые потребности в беспроводных коммуникациях для устройств бытового, промышленного и коммерческого управления и контроля, даже если эти устройства имеют недостаточно вычислительных ресурсов. Дополнительным преимуществом ZigBee является наличие множества доступных средств и инструментов для быстрого развертывания и обслуживания сети.

2 Исследование различных помех, влияющих на производительность сенсорной сети

Одной из основных характеристик в сети является ее производительность. Перечислим все основные факторы, от которых идет зависимость производительности сети:

1 Скорость передачи данных.

Данный фактор определяет, какой объем данных можно передать за единицу времени, т.е. пропускную способность. Скорость передачи данных в свою очередь может подразделяться на три вида: средняя, максимальная и мгновенная.

2 Задержка передачи данных.

Так же важным фактором, влияющим на производительность сети, является задержка передачи данных. Фактор определяется исходя из задержки, возникающей из-за загрузки на линии связи. Фактор очень важен, если вы частенько общаетесь в on-line конференциях, смотрите видео по сети, т.е. различные on-line мультимедиа продукты.

Существуют так же различия вариации задержек, которые так же влияют на производительность сети. Но вариации задержек и сами задержки не связаны друг с другом. Вот примеры: при увеличении расстояний в сети задержка возрастает, но пропускная способность остается прежней; при увеличении количества пользователей или возрастании их активности пропускная способность наоборот резко падает, но на задержку это не влияет (правда, не влияет до тех пор, пока пропускная способность не приблизится к критической своей отметке).

3 Время отклика (реакции).

Время отклика или время реакции так же влияет на производительность сети. Т.е. данный фактор определяет интервал времени от посылки запроса, до получения ответа на данный запрос.

Все вышеперечисленные факторы, влияющие на производительность сенсорной сети, напрямую зависят от различных помех, влияющих на передачу данных устройств ZigBee.

2.1 Помехи в диапазоне 2,4 ГГц

Диапазон ISM 2,4 ГГц предусмотрен для первичного и вторичного использования. Его вторичное использование не требует получения лицензии, но оно должно осуществляться в соответствии с правилами, оговоренными американской Федеральной комиссией по связи (FCC).

Помехи различных пользователей не мешают первичной аппаратуре, пока выполняются установленные правила. Таким образом, основной недостаток нелицензируемого диапазона ISM состоит в том, что частоты разделяются между приложениями, а это может приводить к возникновению

помех. Правила в отношении расширенного спектра и максимально допустимой излучаемой суммарной мощности довольно эффективны при разрешении конфликтов между пользователями этой полосы частот при условии, что радиоприемники физически разделены, но не действуют при близком расположении радиоприемников. Множество приложений, а также собственные помехи дают эффект увеличения уровня шума в данной полосе частот, что приводит к ухудшению характеристик канала обмена.

Влияние помех может быть даже более сильным, когда радиоприемники различных приложений используют одну и ту же полосу частот, находясь при этом близко друг от друга. Таким образом, для проблемы помех характерны временные и частотные коллизии. В данном случае, система перескока частоты ZigBee, занимающая полосу 1 МГц спектра, перекрывает сигнал WLAN DSSS, занимающий канал 22 МГц. Следует также отметить, что время перекрытия коллизий зависит от вида частотных скачков (хопов) и распределения трафика в обеих системах — ZigBee и WLAN. Более того, можно выделить два класса помех на основе использования ими спектра.

Устройства, действующие по методу расширения спектра с помощью прямой последовательности DSSS, составляют один класс источников помех (используют фиксированный канал в данной полосе). Обычно этот канал имеет ширину 22 МГц, хотя эта величина зависит от реализации радиопередатчика.

Второй класс источников помех представлен устройствами, обеспечивающими механизм перескока частоты (FH). Технические условия стандарта IEEE 802.11 включают метод перескока частоты, в котором используется детерминированный частотный паттерн. С другой стороны, техническими условиями ZigBee определяется псевдослучайная последовательность частоты, основанная на адресе устройства ZigBee и его внутреннем тактовом сигнале. Несмотря на то, что помехи между системами одного и того же типа, такими как ZigBee, или IEEE 802.15.4 и IEEE 802.11, могут быть значительными, это обстоятельство обычно учитывается на стадии разработки протокола. Поэтому самый худший реальный сценарий помех включает множество неоднородных устройств (то есть устройств, принадлежащих разным классам).

Соответственно, большинство результатов, публикуемых в современной литературе, делают акцент на этом сценарии самого плохого варианта. Недавно было сделано несколько попыток определения степени влияния помех на характеристики как Bluetooth так и ZigBee.

Опубликованные результаты можно отнести, по меньшей мере, к трем категориям, в зависимости от того, на чем они основывались: на анализе, моделировании или на экспериментальных измерениях. Шеллхаммер (Shellhammer) [11], Эннис (Ennis) [12] и Зайрен (Zyren) [13] получили аналитические результаты на основе вероятности конфликта пакетов для случая потери пакета WLAN; Голми (Golmie) [14] — для случая с ошибкой в пакете Bluetooth. Эти аналитические результаты могут часто давать аппрокси

мацию первого порядка по влиянию помех и ухудшению характеристик (до 25% для потери пакета ZigBee и около 70% для потери пакета Bluetooth). Однако они часто помогают сделать ряд предположений относительно распределения вызовов и функционирования протокола доступа к среде передачи (MAC).

Более важен тот факт, что для упрощения анализа взаимные помехи, которые могут изменить распределение каналов в каждой системе, часто не принимаются во внимание. С другой стороны, экспериментальные результаты, подобные тем, что получены Камерманом (Kammerman), Хоуитом (Howitt) и Фьюмолэри (Fumolari), можно считать более точными благодаря тому, что они очень конкретны в отношении тестируемых методов реализации. Таким образом, третий вариант включает применение моделирования и имитацию с целью оценки влияния помех. Третий подход может обеспечить большую гибкость. Однако точность результатов зависит от допущений, сделанных в процессе моделирования. Зюрбес (Zurbes) дает результаты имитации для ряда устройств типа Bluetooth, расположенных в одной большой комнате. Они показывают, что при 100 одновременных сеансах связи характеристики ухудшаются только на пять процентов. Голми (Golmie) использует детальную структуру имитации MAC и PHY для оценки влияния помех. Сходные результаты были получены Лэнсфордом (Lansford), который использовал моделирование и экспериментальные измерения, чтобы оценить помехи, возникшие в результате действия систем Bluetooth и IEEE 802.11. Их модели симуляции основаны на анализе энергетического потенциала линии связи и вычислении функции Q соответственно для канала и моделей PHY в дополнение к действию уровня MAC.

2.2 Структура совместимости ZigBee с другими устройствами, работающими в диапазоне 2,4 ГГц

Разработчики беспроводных систем связи всегда должны были бороться с помехами как от природных, так и от других источников. Например, классический цикл разработки устройств беспроводной связи включал измерение или прогнозирование ухудшения канала, выбор метода модуляции, ухудшение сигнала на передатчике и обработку сигнала на приемном устройстве, чтобы создать надежную структуру передаваемой информации. Однако в отличие от классических методов компенсации помех, таких как модуляция, канальное кодирование, чередование или уравнивание, в большинстве методов, предлагаемых для решения проблемы помех в полосе 2,4 ГГц, делается акцент на адаптивные стратегии контроля обработки сигнала, включая управление мощностью и перескок частоты. В действительности производители стараются обеспечить совместимость в полосе частот 2,4 ГГц различными методами. Была сформирована Целевая группа IEEE 802.15.4 по вопросам совместимости, чтобы произвести оценку работы устройств типа Bluetooth, мешающих работе устройств типа ZigBee, и

разработать модель совместимости, которая будет включать ряд рекомендаций и, возможно, изменений в технических требованиях [15] стандарта для устройств Bluetooth и IEEE 802.15.4, которые обеспечат нормальную совместную работу этих протоколов. В то же время, Специальная группа Bluetooth (SIG) сформировала свою целевую группу по вопросам совместимости. Обе рабочие группы поддерживают связь между собой и занимаются поиском новых методов ослабления влияния помех. Группами рассматриваются самые разные предложения, начиная от схем объединения протоколов Bluetooth и IEEE 802.15.4 в одном устройстве и заканчивая полностью независимыми решениями, основанными на обнаружении помех и их оценке.

Механизмы без объединения предусматривают большое разнообразие решений — от адаптивного перескока частоты [16] до определения сроков передачи пакетов и управления трафиком [17]. В них во всех используются схожие методики обнаружения присутствия других устройств в данной полосе частот — измерение битовой скорости или определение ошибочной скорости кадра, уровня сигнала, отношения сигнала к шуму (часто реализуемое в виде RSSI). Так, например, каждое устройство может измерять частоту появления ошибок в битах, приходящихся на используемую частоту. Тогда устройства с перескоками частоты могут знать, какие частоты заняты другими пользователями, и в соответствии с этим модифицировать свою модель перескока частоты. Они могут даже не передавать на определенной частоте, если эта частота занята. Каждая методика имеет свои преимущества и недостатки. Одним из преимуществ использования определения сроков является то, что при этом не требуется никаких изменений правил FCC. Фактически FCC [18] допускает применение системы перескока частот для распознавания присутствия других пользователей в пределах одной и той же полосы спектра с тем, чтобы они адаптировали свои наборы скачков и могли избежать перескоков на занятые каналы. Более того, определение сроков передачи пакетов в технических условиях для ZigBee имеет свою специфику при реализации продавцом. Поэтому политику определения сроков можно легко осуществлять с имеющимся в настоящее время набором микросхем типа ZigBee. С другой стороны, для адаптивного перескока частоты требуется внести изменения в модель перескока типа ZigBee, а значит, нужен и новый набор микросхем ZigBee. Наряду с тем, что оба метода могут уменьшить потери пакетов ZigBee, а также влияние помех на другие системы, только метод адаптивного перескока частоты может увеличить пропускную способность сети ZigBee путем максимизации использования спектра.

Таким образом, по мере увеличения занятости диапазона частот рабочий цикл уменьшается, что требует применения решений, связанных с изменением промежутка времени. Решения, связанные с частотной областью, такие как адаптивный перескок частоты, могут быть эффективными только в случае небольшой занятости диапазона частот.

2.2.1 Факторы, действующие на помехи

В данном разделе уделяется внимание различным факторам, которые могут оказать влияние на помехи. Наше описание основано на приведенных в общедоступных источниках результатах работы, полученных с помощью установки для создания детальной имитационной модели [14]. Примерный сценарий, который был для этого использован, основан на топологии четырех узлов, включая два узла WLAN (1 точка доступа (AP) и одно мобильное устройство) и два узла ZigBee (1 ведущий и 1 ведомый). Данные передаются с мобильного узла WLAN на точку доступа, которая отвечает сообщением о подтверждении успешного приема пакетов данных. Чтобы лучше представить топологию, можно подумать о размещении четырех беспроводных устройств в двумерной сети. Устройства WLAN расположены на расстоянии (0,15) и (0,d) метров соответственно для AP и мобильного устройства. Устройства ZigBee расположены на расстоянии (0,0) и (1,0) метров соответственно для ведомого и ведущего устройства. Мощность передачи установлена 25 мВт и 1 мВт для WLAN и ZigBee соответственно. Статистические данные собраны с ведомого устройства ZigBee и мобильного узла WLAN. Распределение вызовов WLAN установлено следующим образом. Предлагаемая нагрузка установлена в размере 50 % от пропускной способности канала обслуживания. Размер пакета составляет 8000 бит, а время между прибытием пакетов установлено 1,86 мс.

Фрагментация или передача коротких пакетов это методика, хорошо подтвержденная документально, она смягчает влияние помех, поскольку меньший пакет данных имеет меньшую вероятность конфликта с системой, создающей помехи. Однако фрагментация может ухудшить работу системы, создающей помехи. Результаты показывают, что использование FEC ограничило преимущества многих сценариев наведения помех. Кроме того, применение фрагментации может снизить вероятность потери пакета за счет создания большего количества помех для других систем.[11]

2.3 Распространение радиосигнала в реальных условиях

В реальных условиях распространения радиосигнала на местности величина затухания зависит от комплекса факторов, определяющих характер распространения радиоволн. К ним относятся: отражение, дифракция, рассеивание, рефракция (преломление) и эффект Доплера [9-13].

1 Отражение: оно происходит, когда электромагнитная волна натывается на объект, который по размерам больше, чем длина волны. Это может привести к ослаблению мощности сигнала при прохождении через препятствие типа стены, но может также заставить отраженную волну распространяться по совершенно иному пути.

2 Дифракция: она происходит, когда электромагнитная волна встречается с неровной поверхностью с характерным радиусом кривизны существенно меньше длины волны. Это может привести к движению волны

вокруг углов и других выступов. Этот эффект очень полезен в условиях здания, поскольку это позволяет сигналу проходить по другому пути, за исключением случая прямой видимости.

3 Рассеивание: оно происходит, когда на пути электромагнитной волны встречается объект размером меньшим, чем длина волны. Результатом будет рассеивание сигнала, и будет иметь место эффект подобный эффекту отражению, когда рассеянный сигнал будет двигаться по разным путям. (Например, лиственные деревья).

4 Рефракция (преломление): происходит при распространении электромагнитных волн в среде с плавно меняющимся от точки к точке показателем преломления; причем термином "преломление" чаще называется резкое изменение направления лучей на границе раздела двух однородных сред с разными показателями преломления. Сигнал испытывает рефракцию, проходя через воздушную и водную среду, стены зданий, различные перекрытия и другие препятствия.

5 Эффект Доплера, имеющий место при перемещении подвижного объекта. Эти эффекты приводят к множественному распространению одного сигнала, и в результате мы получаем многолучевой эффект [8-16].

2.3.1 Затухание радиосигналов при распространении

Согласно эмпирическим данным среднее значение затухания растет прямо пропорционально степени n расстояния d :

$$L \sim d^n, \quad (2.1)$$

где n - экспонента затухания, определенная экспериментально и лежащая в пределах от 2 до 6, в зависимости от характера местности [10,11]. Аналогично, среднее значение уровня сигнала на входе приемной антенны обратно пропорционально экспоненте затухания:

$$P_r \sim d^{-n}. \quad (2.2)$$

При определении n результаты экспериментов, как правило, усредняют по множеству реализаций на окружности с радиусом d от передающей антенны. При распространении радиосигнала его мощность уменьшается с увеличением расстояния. В общем виде эту зависимость можно записать так [13]:

$$P_r = \alpha_0 P_t d^{-n}, \quad (2.3)$$

где P_t и P_r — мощность излучаемого и принимаемого сигнала соответственно;

d — расстояние между передающей и приемной станциями;

n — показатель затухания;

α_0 — нормирующий множитель [20].

2.4 Анализ особенностей распространения радиоволн в пикосетях

Как известно, используемые в беспроводной связи радиоволны плохо огибают препятствия, распространяясь, в основном, по прямой линии. Они испытывают многочисленные отражения от окружающих объектов и подстилающей поверхности [20 -24]. Одним из следствий такого многолучевого распространения является более интенсивное, чем в свободном пространстве, убывание уровня принимаемого сигнала с расстоянием.

Другое следствие замирания и искажения результирующего сигнала. Область существенных отражений ограничивается обычно сравнительно небольшим участком в окрестности ZigBee — порядка нескольких метров. При движении подвижных ZigBee эта область перемещается вместе с ними таким образом, что подвижные устройства все время остаются вблизи центра этой области.

При сложении двух сигналов, прошедших по разным путям и имеющих в точке приема в общем случае различные фазы, результирующий сигнал может быть как несколько выше среднего уровня, так и заметно ниже. При этом провалы или замирания сигнала, образующиеся при взаимной компенсации сигналов вследствие неблагоприятного сочетания их фаз и амплитуд, могут быть достаточно большими.

Искажения результирующего сигнала имеет место в том случае, когда более или менее синфазные составляющие сигналы с соизмеримыми амплитудами настолько отличаются по разности хода, что символы одного сигнала налезает на соседние символы другого.

Типовая модель линии передачи пикосетей ZigBee, включает в себя антенну ведущего (передающего) устройства и относительно короткий участок распространения по линии прямой видимости [25]. Часто присутствуют множество трасс с переотражением, то есть не прямой видимости, и одна или несколько антенн, установленных в ведомых (принимающих) SRD. Иногда из-за естественных и искусственных препятствий имеет место неполный участок распространения радиоволн в пределах прямой видимости между антеннами ведущего и ведомых устройств ZigBee. При таких условиях трасса распространения может моделироваться как трасса, изменяющаяся случайным образом. Во многих случаях может существовать более одного пути распространения радиоволн, и эта ситуация называется многолучевым распространением (рисунок 2.1).

Трасса распространения изменяется как при перемещениях SRD, так и при движении окружающих предметов или окружающей среды. Даже малейшее, самое медленное перемещение приводит к изменению во времени условий многолучевого распространения и, как следствие, к изменению параметров принимаемого сигнала.

Распространение радиоволн в подобных условиях характеризуется тремя, частично самостоятельными эффектами: замирания из-за многолучевости распространения, затенение (или экранирование) и потери

при распространении. Замирания из-за многолучевости описываются через замирания огибающей (независящие от частоты изменения амплитуды), доплеровское рассеяние (селективный во времени, случайный фазовый шум) и временное рассеяние (изменяющиеся во времени длины трасс распространения отраженных сигналов вызывают изменения самих сигналов) [26 - 30].



Рисунок 2.1 - Модель многолучевого распространения принимаемого сигнала

Для пикосетей SRD необходимо различать две модели распространения. Первая модель — это модель распространения при размещении ZigBee внутри помещения (рисунок 2.2), вторая модель — модель распространения при размещении SRD на открытой местности или внутри сравнительно больших крытых помещений.



Рисунок 2.2 - Модель распространения радиоволн при размещении ведущего устройства внутри помещения (офиса)

При размещении SRD внутри помещения типовая модель распространения включает в себя относительно короткий участок прямой видимости и присутствие множества близко расположенных препятствий, обуславливающих наличие различных путей распространения радиоволн. При этом ведомые устройства могут находиться как внутри помещения, так и за его пределами.

При работе с ведущим устройством, находящимся внутри помещения, ведомые устройства вне помещения за счет стен принимают существенно ослабленный сигнал. При этом напряженность волн будет зависеть как от числа стен, через которые проходит волна, так и от материала, из которого эти стены изготовлены.

При размещении SRD на открытой местности (или внутри сравнительно большого помещения (крытых ангаров, выставок, стадионов, аэропортов, машинных залов тепловых, гидро- и атомных электростанций, и т.д.), типовая модель распространения (рисунок 2.3) включает в себя ведущее и ведомое SRD и относительно длинный участок прямой видимости (до 100м).

За счет переотражения радиоволн от препятствий могут также иметь место трассы не прямой видимости. Однако количество отраженных лучей, как правило, гораздо меньше, чем при нахождении SRD внутри помещения. Обычно считается, что устройства пикосетей мало подвижны и условия распространения в процессе связи изменяются незначительно, поэтому изменение частоты за счет доплеровского эффекта можно не учитывать. При работе внутри помещения на ведомые устройства приходят множество волн с примерно одинаковой мощностью и с незначительной разницей во времени задержки. При этом может появиться эффект временного рассеяния, проявляющийся в наличии частотно-селективных замираний.

Для модели вне помещения (офиса), обычно принимается, что прямая волна доминирует по мощности по сравнению с отраженными волнами. В результате наличия множества препятствий на пути распространения, границы пикосетей имеют вид неправильных кривых, зависящих от условий распространения и затухания радиоволн.



Рисунок 2.3 - Модель распространения радиоволн внутри большого крытого помещения (офиса)

Более того, эти границы вообще не являются четко определенными, так как если ведущее устройство перемещается, то, в зависимости от направления его движения, перемещаются и границы самой пикосети. Кроме того, положение ведущего устройства лишь приближенно совпадает с центром пикосети, который к тому же не так просто однозначно определить, если она имеет неправильную форму.

Таким образом, прогнозирование зон уверенного приема внутри и вне помещения (офиса) как основной элемент территориального планирования беспроводных пикосетей является одной из важнейших проблем для сетей ZigBee.[47]

2.4.1 Существующие подходы для расчета зоны обслуживания в пикосетях

Как видно из описания моделей распространения радиоволн в пикосетях, достаточно сложно получить надежный аналитический прогноз зоны уверенной работы ZigBee как внутри, так и вне помещений с инженерной точностью совпадающий с экспериментальными данными. Как уже было отмечено, технология ZigBee может успешно работать в условиях отсутствия прямой видимости между ведомым и ведущими устройствами. На основе экспериментальных данных для сотовых сетей была разработана обобщенная модель оценки потерь L при распространении радиоволн в условиях отсутствия прямой видимости [31]:

$$L \approx L(r/r_0)^{-n}, \quad (2.4)$$

где r — расстояние между передающей и приемной антеннами;
 r_0 - расстояние до первого препятствия.

В зависимости от трассы показатель степени n может принимать значения от 2 до 5. Например, при отсутствии прямой видимости трасс вне помещений (офисов) считают, что коэффициент $3,5 < n < 5$, при связи внутри помещений (офисов) $2 < n < 4$, а r_0 лежит в диапазоне от 1 до 3 м.

Потери $L(r_0)$ в дБ при распространении радиоволн в свободном пространстве до первого препятствия, расположенного на расстоянии r_0 могут быть рассчитываются по формуле:

$$L(r_0)=27,56-\lg f-20\lg r_0, \quad (2.5)$$

где f - частота в МГц,
 r_0 - расстояние м.

Абсолютные потери $L_0(r)$ при распространении на расстояние r_0 , выраженные в дБ, определяются как потери при распространении от передатчика до препятствия в свободном пространстве $L(r_0)$ плюс дополнительные потери при распространении:

$$L(r_0) = 27,56 - \lg f - 20 \lg r_0 - 20n \lg(r/r_0) \quad (2.6)$$

Результаты расчета затухания с использованием выражений (2.5) и (2.6) в зависимости от расстояния при различных коэффициентах $n = 2, 3$ и 5 представлены на рисунке 2.4, где расстояние до препятствия $r_0 = 1$ м.

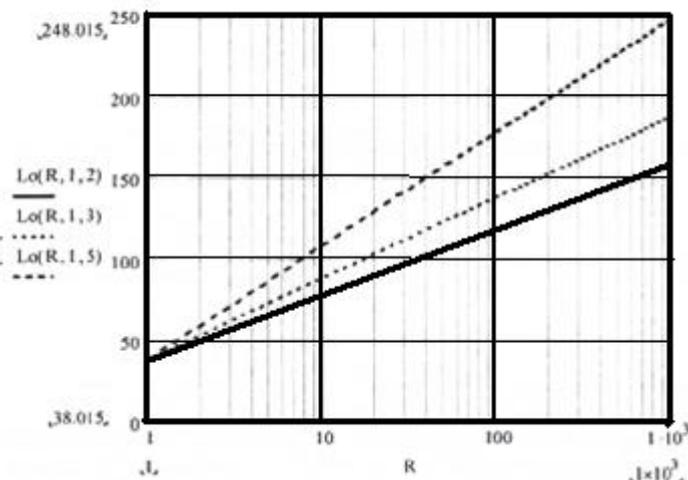


Рисунок 2.4 - Зависимость потерь при распространении от расстояния

Из графиков видно, что коэффициент n существенно влияет на дальность связи. При затухании на трассе 100 дБ расстояние изменяется от 30 м в свободном пространстве ($n = 2$) до 7 м в условиях помещения ($n = 5$). На рисунке 2.5 представлены результаты расчета затухания с использованием выражений (2.5) и (2.6) в зависимости от расстояния при коэффициенте $n = 4$ при различном расстоянии до препятствия $r_0 = 1, 2, 5$ и 10 метров.

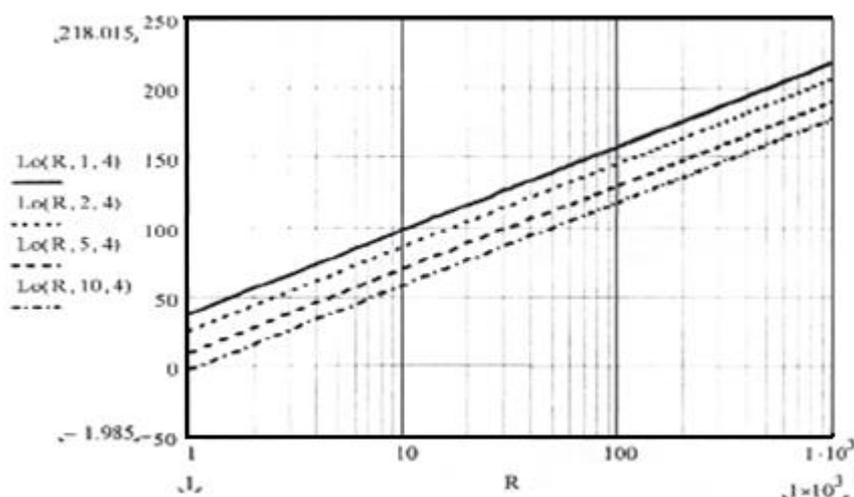


Рисунок 2.5 - Зависимость потерь при распространении от расстояния при различном расстоянии до препятствия

Из представленных графиков видно, что чем меньше расстояние, на котором размещается препятствие, тем на большую величину увеличивается затухание, причем по мере удаления препятствия скорость изменения затухания не изменяется.

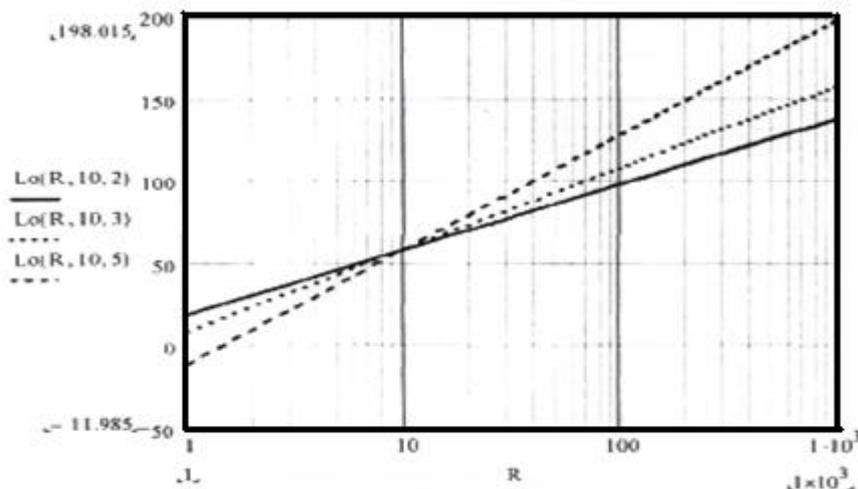


Рисунок 2.6 - Зависимость потерь при распространении от расстояния при различных коэффициентах n

Результаты расчета затухания с использованием выражений (2.5) и (2.6) в зависимости от расстояния при различных коэффициентах $n = 2, 3, \text{ и } 5$ представлены на рисунке 2.6, при этом расстояние до препятствия $r_0 = 10$ м.

Как видно из рисунка потери при $n > 3$ на малых расстояниях меньше, чем при $n = 2$, к тому же в выражениях (2.1), (2.2), потери не зависят от высоты подъема устройств. Поэтому по представленным формулам можно дать лишь приближенную оценку зоны уверенной работы ZigBee в пикосетях.

Наибольшее распространение при расчете зоны уверенной работы получили эмпирические формулы, известные как модель COST 231 Хата, представленные комиссией Европейского сотрудничества в области научно-технических исследований [32]. Согласно этим формулам средние потери при распространении могут быть рассчитаны как:

а) для размещения внутри помещения:

$$L_p = A + B \lg(r), \quad (2.7)$$

б) для размещения на открытом пространстве:

$$L_p = A + B \lg(r) - D, \quad (2.8)$$

где величины A, B и D определяются следующим образом:

$$A = 46,3 + 33,9 \lg(f_0) - 13,82 \lg(h_m) - a(h_s) + C_m, \quad (2.9)$$

$$B = B(h_m) = 44,9 - 6,55 \lg(h_m), \quad (2.10)$$

$$D = D(f_0) = 4,78 [\lg(f_0)]^2 - 19,33 \lg(f_0) + 40,94, \quad (2.11)$$

$C_m = 0.. 3$ дБ — зависит от плотности препятствий в зоне действия системы и может меняться от 0 до 3 дБ;

h_m и h_s - соответственно, высота размещения передающего и приемного устройства, м.

На графике рисунка 2.7 представлены зависимости потерь при распространении радиоволн от расстояния, для различных условий распространения, рассчитанные по приведенным выше формулам (2.7) - (2.8).

Данные зависимости рассчитаны для помещения с высокой плотностью препятствий L_g ($C = 3$ дБ), менее плотной — L_{pg} ($C = 2$ дБ), низкой плотностью — L_{sm} ($C = 1$ дБ) и на открытом пространстве — L_{op} ($C = 0$ дБ), при этом высота расположения передающих устройств - 1 метр, а принимающих - 10 метров. Для сравнения, на рисунке 2.6, показаны графики потерь, рассчитанные по формулам (2.5), (2.6) для случаев $n = 2$ и $n = 4$, при расстоянии до препятствия - 10 метров.

Из графиков видно, что потери при распространении, в различных условиях, возрастают лишь по абсолютной величине, хотя должен возрасти и градиент увеличения потерь с расстоянием так, как это показано на кривой при $n = 4$. Кроме того, потери в свободном пространстве, рассчитанные по формулам (2.5), (2.6) и по формулам Хата отличаются.

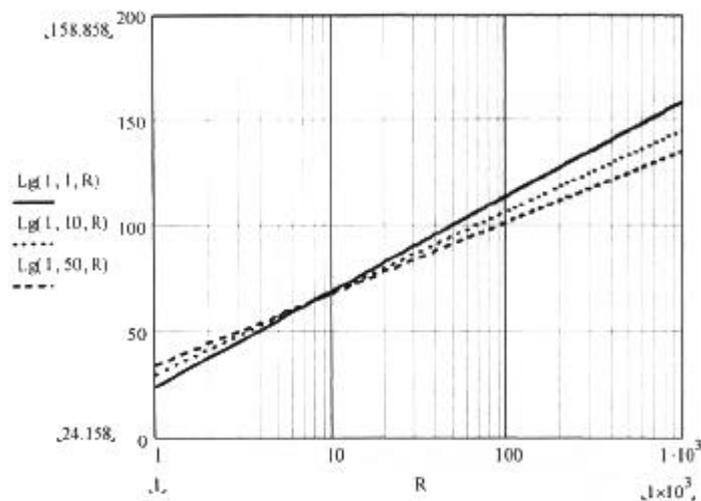


Рисунок 2.8 - Зависимость потерь при распространении от расстояния при различных высотах расположения ведущего устройства

По формулам Хата потери зависят от высоты антенны. На рисунке 2.8 представлены зависимости потерь при распространении радиоволн в помещении с высокой плотностью препятствий L_g ($C = 3$ дБ), рассчитанные при высоте расположения ведомого устройства 1 м, а ведущего - 1, 10 и 50 м. Как видно из графиков, при увеличении высоты подъема передающего устройства уменьшается градиент потерь.

Однако на малых расстояниях формула не действует, так как, чем выше антенна, тем ниже потери. Причем расстояние между устройствами не связано с высотой их подъема. То есть, при высоте подъема ведущего устройства на 3 м, а ведомого на 1 м не может быть расстояния между ними менее 2 м. Формулы этого не учитывают.

Таким образом, данные формулы расчета дают лишь очень приблизительную оценку затухания радиоволн при их распространении в различных условиях, имеющих место в пикосетях, и не подходят для решения задачи оптимизации размещения ZigBee [33].

2.4.2 Постановка задачи исследования

Важнейшей проблемой пикосетей ZigBee является прогнозирование зон уверенной работы как вне, так и внутри помещений. Главная причина этого заключается в неравномерном затухании сигнала при распространении в помещении и многочисленных рассеивающих препятствиях внутри него, что обусловлено сильной пространственной неоднородностью среды распространения радиоволн.

Анализ имеющиеся методик расчета зон уверенного приема показал, что они дают лишь очень приблизительную оценку затухания радиоволн при их распространении в различных условиях, и не подходят для решения задачи оптимизации размещения ZigBee.

Для обеспечения устойчивой работы пикосетей, минимизации их стоимости и энергетических характеристик необходимо разработать методику расчета зон обслуживания и размещения ZigBee.

Для достижения поставленной цели необходимо решение ряда задач:

- разработка методики расчета зон уверенной работы пикосетей в различных условиях распространения радиоволн;
- разработка методики расчета электромагнитной совместимости ZigBee с устройствами различных систем работающих в том же частотном диапазоне;
- разработка практических рекомендаций, позволяющих осуществить наиболее экономичный вариант построения пикосетей, в зависимости от технических характеристик ZigBee, высоты их расположения и условий распространения радиоволн.

Решение перечисленных задач требует привлечения научных методов, основанных на методах теории вероятностей, случайных процессов, математической статистики.

2.5 Заключение по второй главе

1 Показано, что одной из важнейших проблем повышения производительности для сенсорных сетей беспроводного доступа, выполненных на основе технологии ZigBee является прогнозирование зон уверенной работы как вне, так и внутри помещений. Главная причина этого заключается в неравномерном затухании сигнала и многочисленных рассеивающих препятствиях, что обусловлено сильной пространственной неоднородностью среды распространения радиоволн.

2 Получены зависимости оценки потерь при распространении радиоволн в условиях отсутствия прямой видимости при различном удалении от препятствия. Показано, что чем меньше расстояние, на котором размещается препятствие, тем на большую величину увеличивается затухание, причем скорость изменения затухания по мере удаления не изменяется.

3 Показано, что потери при распространении в различных условиях застройки возрастают лишь по абсолютной величине, хотя с увеличением расстояния должен возрасти и градиент увеличения потерь. Кроме того, потери в свободном пространстве, рассчитанные по формулам Хата и общепринятым выражениям для расчета оценки потерь при распространении радиоволн в условиях отсутствия прямой видимости, в сотовых системах связи, различаются.

4 Получены зависимости оценки потерь при распространении радиоволн от расстояния при различных высотах расположения ведущего и ведомого устройства. Показано, что при увеличении высоты подъема передающего устройства уменьшается градиент потерь. Однако на малых расстояниях формула не действует, так как, чем выше антенна, тем ниже потери, причем расстояние между устройствами не связано с высотой их подъема. То есть, при высоте подъема ведущего устройства на 3 м, а ведомого на 1 м не может быть расстояния между устройствами менее 2 м. Формулы этого не учитывают.

5 Анализ имеющихся методик и формул расчета показал, что они дают лишь приблизительную оценку затухания радиоволн при их распространении в различных условиях, и не подходят для решения задач по расчету зон уверенного обслуживания ZigBee как на открытой местности, так и внутри помещений.

3 Оценка влияния помех радиоэлектронных средств на беспроводные устройства ZigBee

3.1 Влияние шумовых помех с FHSS и ЧМ на устройства ZigBee

Пусть на системы SRD со скачкообразной перестройкой частоты FHSS и двоичной частотной манипуляцией (ЧМ), воздействуют помехи от РЭС представляющие собой сосредоточенный по рабочей полосе ZigBee белый гауссовский шум (БГШ).

Рассмотрим наихудший случай, когда помеха от РЭС попадает в канал приемника ZigBee до перескока его рабочей частоты. Согласно [34-36], средняя вероятность ошибки на один информационный бит РБ может быть оценена как:

$$P_B = K_{\text{пер}} P_{B1} [E_c / (G_{\text{ш}} + G_{\text{п}})] + (1 - K_{\text{пер}}) P_{B0} [E_c / G_{\text{ш}}], \quad (3.1)$$

где $K_{\text{пер}}$ — коэффициент перекрытия, коэффициент характеризующий часть частотного элемента (скачка частоты), пораженную помехой $0 < K_{\text{пер}} < 1$;

P_{B1}, P_{B0} - средняя вероятность ошибки на один бит при наличии и отсут-

ствии помехи, соответственно;

E_c — энергия сигнала на бит;

$G_{\text{ш}}$ — спектральная плотность мощности собственных шумов приемного устройства;

$G_{\text{п}}$ — спектральная плотность мощности помехи.

Так как, мы рассматриваем предельный случай, когда коэффициент перекрытия скачка частоты $K_{\text{пер}} = 1$, то выражение (3.1) примет вид:

$$P_B = P_{B1} [E_c / (G_{\text{ш}} + G_{\text{п}})]. \quad (3.2)$$

Учитывая, что шумовая помеха представляет собой сосредоточенный по полосе БГШ, то согласно [36 — 38], средняя вероятность ошибки на один информационный бит РБ может быть найдена исходя из выражений:

- при воздействии шумовой помехи на основной канал

$$P_{\text{осн}} = (2 + \beta)^{-1} \exp\{-[2G_{\text{ш}}/E_c + P_{\text{п}}/P_c]\}^{-1}, \quad (3.3)$$

- при воздействии шумовой помехи на дополнительный канал

$$P_{\text{Б,Доп}} = [(1 + \beta)/(2 + \beta)] \exp\{-[2G_{\text{ш}}/E_c + P_{\text{п}}/P_c]\}, \quad (3.4)$$

- при воздействии шумовой помехи на основной и дополнительный каналы

$$P_{Б.Осн+Доп} = 0,5 \exp\{-[2G_{ш}/E_c + P_{п}/P_c]\}, \quad (3.5)$$

где $P = E_c P_{п} / G_{ш} P_c$;

$P_c, P_{п}$ — соответственно, мощность сигнала и помехи.

Средняя вероятность ошибки в приеме бита информации, в условиях воздействия шумовой помехи на один из каналов демодулятора ZigBee, будет определяться исходя из выражений (3.4) и (3.5)

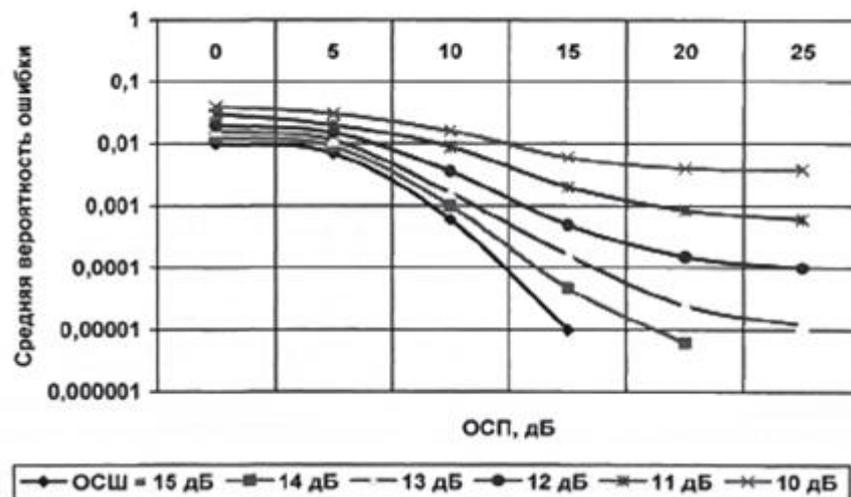
$$P_{Б} = 0,5(P_{Б.Осн} + P_{Б.Доп}) = 0,5 \exp\{-[2G_{ш}/E_c + P_{п}/P_c]\}^{-1}. \quad (3.6)$$

Введя обозначения $\rho_{ш} = E_c/G_{ш}$ и $\rho_{п} = P_c/P_{п}$ характеризующие, соответственно, отношение сигнал/шум (ОСШ) и отношение сигнал/помеха (ОСП) перепишем выражение (6) в виде:

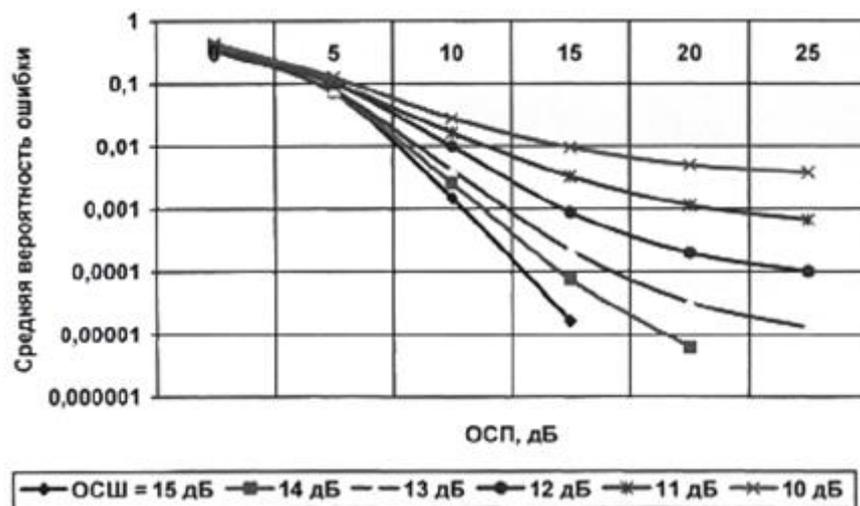
$$P_{Б} = 0,5 \exp\{-[2\rho_{ш}^{-1} + \rho_{п}^{-1}]\}^{-1}. \quad (3.7)$$

На рисунке 3.1 представлены графики средней вероятности ошибки, при приеме бита информации, в зависимости от ОСП при различных значениях ОСШ, как при отдельном, так и одновременном воздействии шумовой помехи на основной и дополнительный каналы ZigBee.

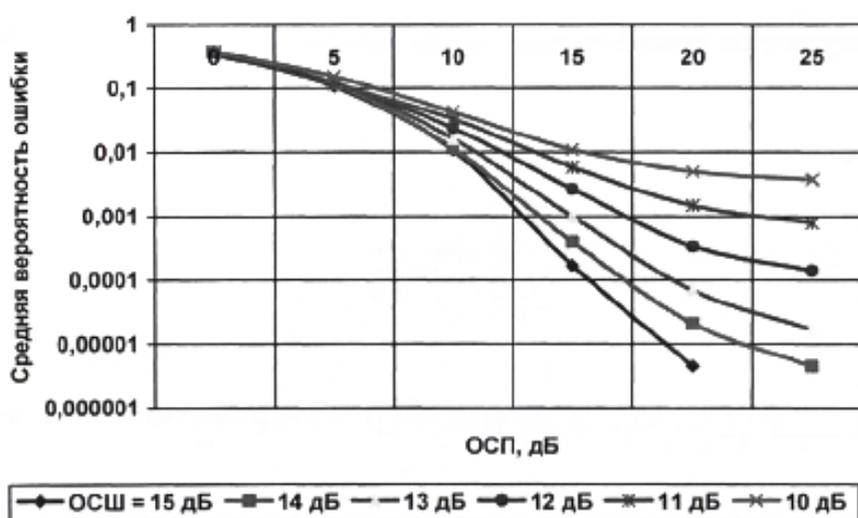
Из представленных на рисунке 3.1 зависимостей видно, что средняя вероятность ошибки, при приеме бита информации, зависит не только от ОСП, но и ОСШ. Причем, чем больше величина ОСШ, тем больше на среднюю величину ошибки влияет величина ОСП, и наоборот, чем меньше ОСШ, тем меньше величина ОСП влияет на среднюю величину ошибки.



а)



б)



в)

а - основной канал; б - дополнительный; в - основной и дополнительный

Рисунок 3.1 - Зависимость средней вероятности ошибки на бит информации от ОСП

Сравнивая представленные на рисунке 3.1 зависимости видно, что воздействие помех от РЭС на ZigBee наиболее отрицательно сказывается на дополнительном канале, чем на основном.

Из представленных графиков видно, что максимальное значение средней вероятности ошибки на бит, при воздействии шумовой помехи РЭС на дополнительный канал ZigBee, стремится к 0,5. Следовательно, с точки зрения помехозащищенности, те устройства ZigBee в приемниках которых частотный разнос между информационными каналами постоянно меняется, являются более помехозащищенными.

При одновременном воздействии шумовой помехи от РЭС на основной и дополнительный канал ZigBee, согласно выражению (3.5), максимальное значение средней вероятности ошибки на бит, при ОСП стремящемся к нулю, стремится к 0,5, то есть при $\rho_{\text{п}} \rightarrow 0$, $P_{\text{Б.макс.Осн+Доп}} \rightarrow 0,5$.

Решая уравнение $dP_{\text{Б}}/d\rho_{\text{п}} = 0$ применительно к (3.3) можно определить максимальное значение средней вероятности ошибки на бит при воздействии шумовой помехи РЭС на основной канал ZigBee

$$P_{\text{Б.макс.Осн}} \approx \begin{cases} \rho_{\text{ш}}^{-1} e^{-1}, P_{\text{п}} - 2\sigma_{\text{ш}}^2 > 0 \\ 0,5 \exp\{-0,5\rho_{\text{ш}}\}, P_{\text{п}} = P_{\text{с}} - 2\sigma_{\text{ш}}^2 \leq 0 \end{cases}, \quad (3.8)$$

где $\sigma_{\text{ш}}^2$ - мощность (дисперсия) собственных шумов приемного устройства.

Анализируя (3.8) видно, что собственными шумами приемника SRD нельзя пренебрегать даже тогда, когда помеха от РЭС, воздействующая на ZigBee, значительно больше их по мощности.

3.2 Влияние шумовых помех FHSS и М-ичной ЧМ на ZigBee

Произведем оценку влияния шумовых помех с FHSS и М-ичной ЧМ на ZigBee. Если передача данных осуществляется с использованием М-ичной ЧМ, когда частотные каналы всего сегмента частот являются смежными, но каждый сегмент может иметь случайно выбранное положение внутри общей полосы частот $P_{\text{с}}$, то средняя вероятность ошибки в приеме бита информации может быть найдена исходя из зависимости [39]:

$$P_{\text{Б}} = M[2(M-1)]^{-1}(1-P_{\text{к}}),$$

где M — размер алфавита сигнала;

$P_{\text{к}}$ — условная вероятность того, что напряжение на выходе канала, в котором присутствует сигнал, превышает выходное напряжение остальных $(M-1)$ каналов демодулятора.

В общем случае условная вероятность $P_{\text{к}}$ может быть определена как:

$$P_{\text{к}} = \int_0^{\infty} f_{\text{с}}(Z_{\text{с}}) \left[\int_0^{Z_{\text{с}}} f_0(Z_{\text{п}}) dZ_{\text{п}} \right]^{M-1} dZ_{\text{с}}, \quad (3.9)$$

где $f_{\text{с}}(Z_{\text{с}})$, $f_0(Z_{\text{п}})$ — функции плотности вероятности статистики $Z_{\text{с}}$ на выходе канала с сигналом и статистики $Z_{\text{п}}$ на выходе остальных $(M-1)$ каналов, содержащих только собственные шумы приемника.

Согласно [39], функция $f_{\text{с}}(Z_{\text{с}})$ при воздействии шумовой помехи может быть найдена исходя из выражения

$$f_c(Z_c) = \frac{Z_c}{\sigma_n^2 + \sigma_w^2} \exp \left[-\frac{Z_c^2 + P_c}{2(\sigma_n^2 + \sigma_w^2)} \right] I_0 \left(\frac{\sqrt{P_c}}{\sigma_n^2 + \sigma_w^2} Z_c \right). \quad (3.10)$$

Если в каналах присутствуют только собственные шумы, то функция $f_0(Z_n)$ может быть найдена исходя из выражения:

$$f_0(Z_n) = \left[\frac{Z_n}{\sigma_w^2} \right] \exp \left\{ -\frac{Z_n}{2\sigma_w^2} \right\}.$$

Сделав соответствующие преобразования, получим выражение для определения средней вероятности ошибки в приеме бита информации РБ при воздействии шумовой помехи с FHSS и М-ичной ЧМ от РЭС на основной канал ZigBee [40-42].

$$P_{Б.0сн} = \frac{M}{2^{(M-1)}} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{(-1)^{m+1}}{m+1} \binom{M-1}{m} \frac{1}{1 + \frac{m}{m+1} \beta} \exp \left\{ -k\rho_n^{-1} + \frac{m+1}{m} \rho_w^{-1} \right\}^{-1},$$

где $M=2^k$, $k = 1, 2, 3, \dots$, $k = \log_2 M$; $m \in [1, M]$; $\beta = \rho_w / \rho_n$

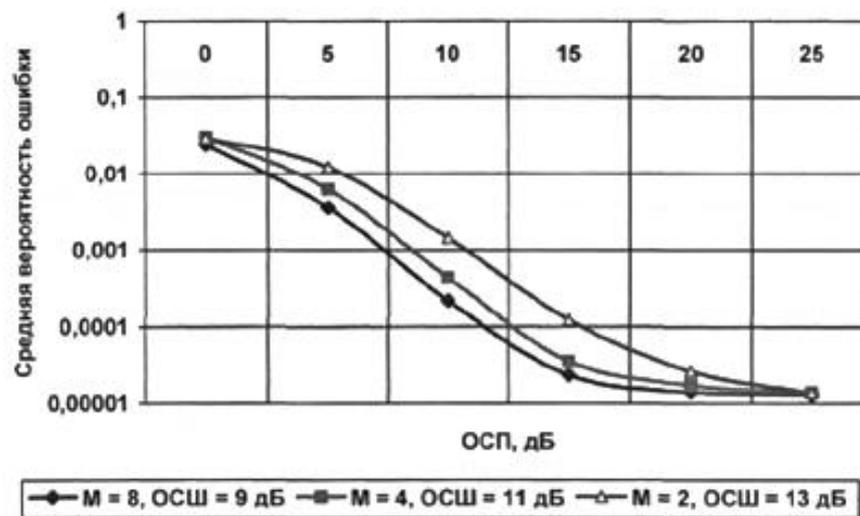


Рисунок 3.4 - Зависимость средней вероятности ошибки на бит информации от ОСП, для различных значений М и ОСШ, при воздействии шумовой помехи на основной канал

Зависимости средней вероятности ошибки в приеме бита информации при воздействии шумовой помехи от РЭС с FHSS и М-ичной ЧМ от ОСШ на основной канал ZigBee, для различных значений М и ОСШ, представлены на рисунке 3.4.

Из представленных зависимостей видно, что с увеличением ОСП средняя вероятность ошибки в приеме бита информации при воздействии

шумовой помехи от РЭС FHSS и М-ичной ЧМ на основной канал ZigBee стремится к величине равной 10^{-5} .

Решая уравнение $\frac{dP_{Б.Осн}}{d\rho_{ш}} = 0$ применительно к (10) можно определить максимальное значение средней вероятности ошибки на бит при воздействии шумовой помехи РЭС с FHSS и М-ичной ЧМ. на основной канал ZigBee.

Максимальное значение средней вероятности ошибки $P_{Б.мах.Осн}$ достигается при ОСП

$$\rho_{ш} = \frac{\left(\frac{m}{m+1}\right)\rho_{ш}}{\left[\left(\frac{m}{m+1}\right)\rho_{ш}^{k-1}\right]} \quad (3.11)$$

Так как $\left(\frac{m}{m+1}\right)\rho_{ш} \gg 1$, то приближенно можно считать, что выражение (3.6) имеет вид $\rho_{ш} \sim k^{-1}$. Подставив $\rho_{ш} = k^{-1}$ в (3.13), получим

$$P = \frac{M}{2(M-1)} \sum_{m=1}^{M-1} (-1)^{m+1} \left(\frac{M-1}{m}\right) \frac{e^{-1}}{mk\rho_{ш}} \quad (3.12)$$

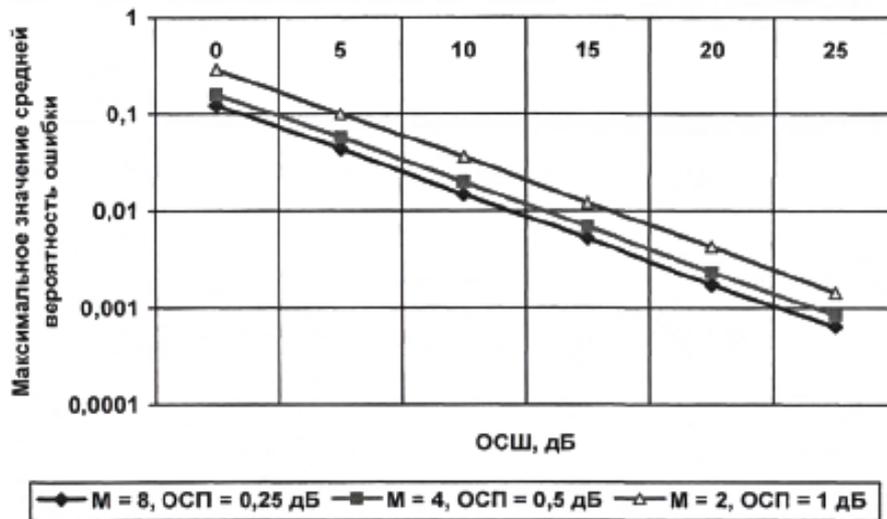


Рисунок 3.5 - Зависимость максимальной средней вероятности ошибки на бит информации от ОСШ, для различных значений М и ОСП, при воздействии шумовой помехи на основной канал

На рисунке 3.5 представлены зависимости РБ значений величин ОСП и М. $P_{Б.мах.осн}$ (3.6) от ОСШ для различных значений М и ОСП, при воздействии шумовой помехи на основной канал.

Из представленных зависимостей видно, что для уменьшения влияния шумовой помехи от РЭС с FHSS и М-ичной ЧМ на основной канал ZigBee необходимо, чтобы значение ОСШ приемника SRD было наибольшим.

Увеличение размера алфавита сигнала M при постоянной скорости передачи и энергии сигнала на бит приводит к увеличению помехоустойчивости ZigBee с FHSS и M -ичной ЧМ при шумовой помехи.

Сопоставив (3.11) с первым выражением в (3.12) можно прийти к выводу, что ZigBee более устойчивы к воздействию с FHSS и M -ичной ЧМ, по сравнению с двоичной ЧМ шумовых помех от РЭС. Так, при $M = 4$ воздействие шумовых помех на ZigBee с помехой FHSS и M -ичной ЧМ уменьшается почти на 2 дБ, а при $M = 8$ почти на 3 дБ.

Заметим, что при $M = 2; 4$ и 8 , соответственно $c = 1; 2$ и 3 .

3.3 Влияние гармонических помех на ZigBee с FHSS и ЧМ

Если на основной канал ZigBee воздействуют гармонические помехи с FHSS с частотой ω_n равной частоте сигнала ω_c и равномерной распределенной фазой, то средняя вероятность ошибки в приеме бита информации, для случая когда $K_{\text{пер}} = 1$, может быть найдена исходя из выражения [42]:

$$P_{\text{Б.осн.}} = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp\{-0,5\rho_{\text{ш}}(1 + \rho_c^{-1} + 1\sqrt{\rho_c^{-1}\cos\theta})\} d\theta, \quad (3.13)$$

где θ — разность фаз между помехой и сигналом, $\theta \in (-\pi; \pi)$

Применив к выражению (13) интегральное представление модифицированной функции Бесселя первого рода нулевого порядка

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[x\cos(U + \vartheta)] dU, \quad (3.14)$$

и усреднив его по фазе, получим

$$P_{\text{Б.осн.}} = \frac{1}{2} \exp\{-0,5\rho_{\text{ш}}(1 + \rho_c^{-1})\} I_0(\rho_{\text{ш}}\sqrt{\rho_c^{-1}}). \quad (3.15)$$

Зависимость средней вероятности ошибки в приеме бита информации, при воздействии гармонической помехи FHSS на основной канал ZigBee, от ОСП, при ОСШ равном 13 дБ, представлена на рисунке 3.6

Из представленного графика видно, что характер изменения средней вероятности ошибки в приеме бита информации практически такой же, как и при воздействии шумовой помехи с FHSS на основной канал ZigBee. С увеличением ОСП значение величины средней вероятности ошибки уменьшается.

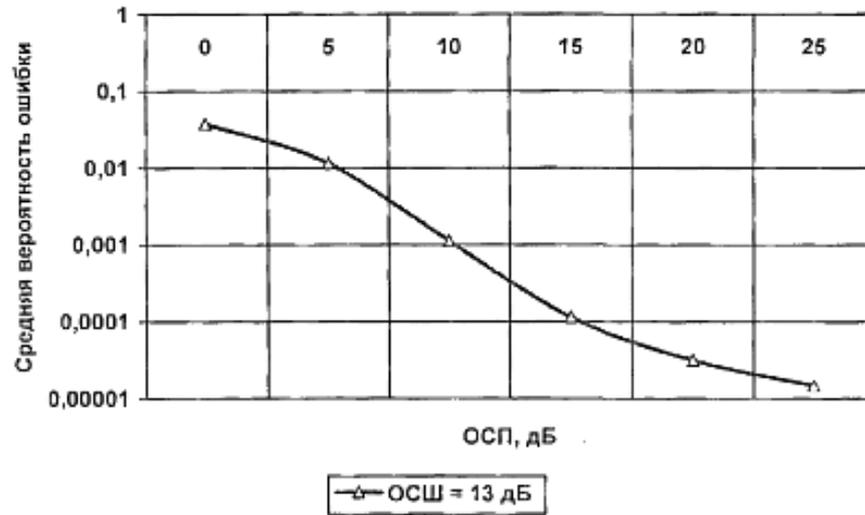


Рисунок 3.6 - Зависимость средней вероятности ошибки от ОСП, в приеме бита информации по основному каналу, при ОСШ 13 дБ

Воспользовавшись асимптотическим приближением функции Бесселя

$$I_0(x) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi x}} \right) \exp(x), x \gg 1,$$

$$P_{Б.Осн} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2\pi\sqrt{P_c P_n}} \right)^{0.5} \exp \left[-\frac{(P_c^{0.5} - P_n^{0.5})^2}{2\sigma_{ш}^2} \right], (P_c P_n)^{0.5} \geq \sigma_{ш}^2. \quad (3.16)$$

Решая уравнение $dP_{Б.Осн} / d\rho_n = 0$, применительно к (3.10), видно, что наиболее неблагоприятным для ZigBee является случай, когда мощность воздействующей от РЭС гармонической помехи равна мощности полезного сигнала, то есть $P_n = P_c$. В этом случае максимальная средняя вероятность в приеме бита информации будет определяться исходя из выражения:

$$P_{Б.мах.осн.} \cong 0,5 \left(\frac{1}{2\pi\rho_{ш}} \right)^{0.5}, P_n \approx P_c \gg \sigma_{ш}^2. \quad (3.17)$$

Если воздействию гармонической помехи от РЭС с FHSS подвергся только дополнительный канал демодулятора ZigBee, то в этом случае средняя вероятность ошибки в приеме бита информации может быть найдена исходя из выражения [17]:

$$P_{Б.Доп} = Q[(\rho_{ш} + \rho_n)^{0.5}, \rho_{ш}^{0.5}] - 0,5 \exp[-0,5\rho_{ш}(1 + \rho_n^{-1})I_0][\rho_{ш}(\rho_n^{-1})^{0.5}]. \quad (3.18)$$

Графики зависимости средней вероятности в приеме бита информации от величины ОСП, для различных значений ОСШ, представлены на рисунке 3.7.

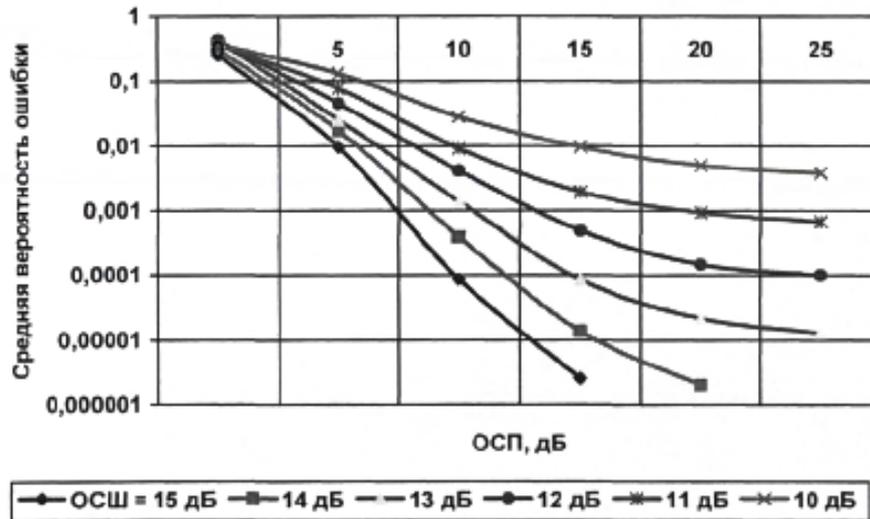


Рисунок 3.7 - Зависимость средней вероятности ошибки от ОСП, в приеме бита информации по дополнительному каналу, при различных значениях ОСШ

Из представленных зависимостей видно, что при относительно небольших значениях ОСП, не превышающих 15 дБ, гармоническая помеха с FHSS, воздействующая на дополнительный канал демодулятора ZigBee оказывает больше негативного влияния на величину средней вероятности ошибки, чем при ее воздействии на основной канал демодулятора. При $\rho_n > 0$, максимальное значение средней вероятности ошибки в приеме бита информации по дополнительному каналу, стремиться к единице.

Согласно выражениям (3.17) и (3.18), средняя вероятность ошибки в приеме бита информации при условии попадания гармонической помехи с FHSS от РЭС в один из каналов демодулятора ZigBee может быть найдена исходя из выражения:

$$P_B = 0,5 (P_{B,Осн} + P_{B,Доп}) = 0,5 Q \left[\left(\frac{\rho_{us}}{\rho_n} \right)^{0,5}, (\rho_{us})^{0,5} \right]$$

Если на оба канала демодулятора ZigBee воздействуют две гармонические помехи с FHSS с равной мощностью, то средняя вероятность ошибки в приеме бита информации будет определяться как [43]

$$P_{B,Осн+Доп} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left\{ Q \left[\left(\frac{\rho_{us}}{\rho_n} \right)^{0,5}, (\rho_{us} (1 + \rho_n^{-1} + 2\sqrt{\rho_n^{-1}} \cos\theta))^{0,5} \right] - 0,5 \exp \left[-\rho_{us} (0,5 + \rho_n^{-1} + 2\sqrt{\rho_n^{-1}} \cos\theta) \right] \times I_0 \left[\rho_{us} (\rho_n^{-1} (1 + \rho_n^{-1} + 2\sqrt{\rho_n^{-1}} \cos\theta))^{0,5} \right] \right\} d\theta . \quad (3.19)$$

Зависимость средней вероятности ошибки на бит от ОСП, при воздействии на основной канал ZigBee двух гармонических помех с FHSS с равной мощностью, при ОСШ равном 13 дБ, представлена на рисунке 3.8.

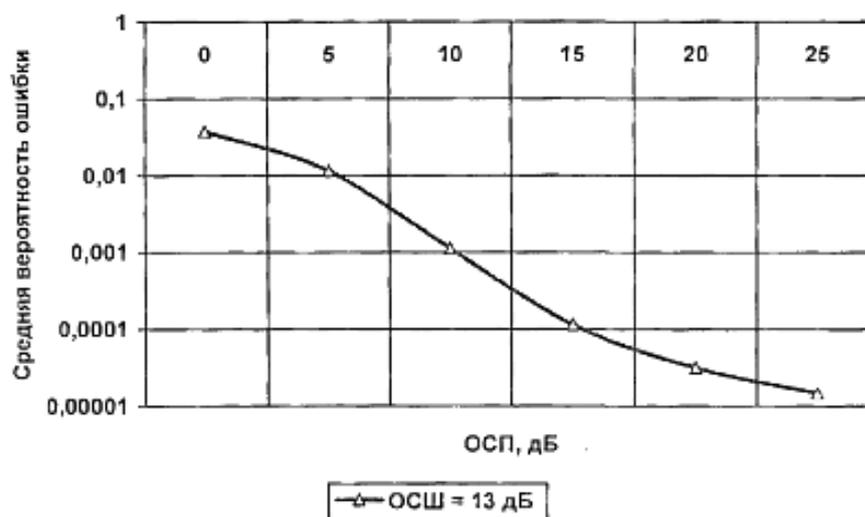


Рисунок 3.8 - Зависимость средней вероятности ошибки от ОСП, в приеме бита информации, при воздействии двух гармонических помех равной мощности на основной и дополнительный каналы, для ОСШ 13 дБ

Сравнивая представленные на рисунках 3.6 и 3.8 зависимости видно, что при воздействии двух гармонических помех с FHSS равной мощности на оба канала демодулятора ZigBee средняя вероятность ошибки в приеме бита информации значительно больше, чем при воздействии гармонической помехи с FHSS на основной канал. Величины средней вероятности ошибки начинают выравниваться лишь при относительно больших значениях ОСП.

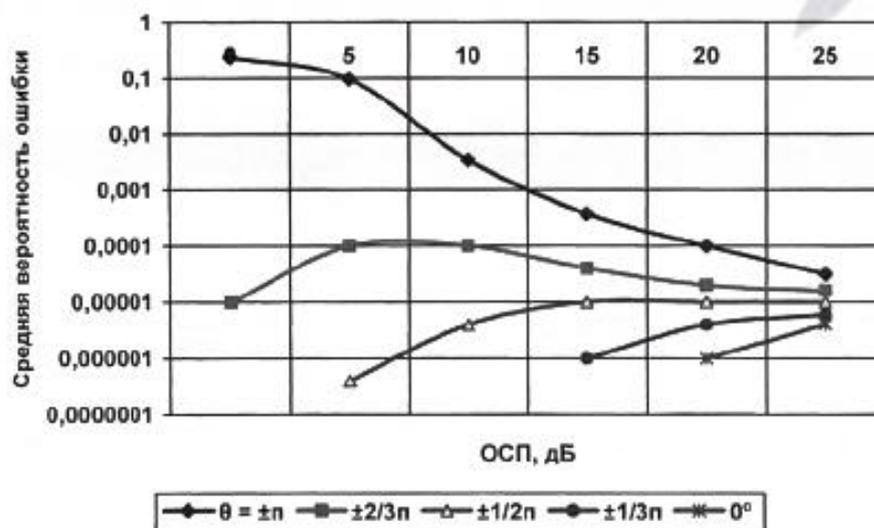
При оценке воздействия гармонической помехи с FHSS на ZigBee необходимо учитывать не только ее мощность, но и разность фаз между помехой и сигналом, которая может меняться от $-\pi$ до π .

Если фазовый сдвиг между сигналом и гармонической помехой равен θ , то мощность результирующего сигнала может быть найдена исходя из выражения [44]:

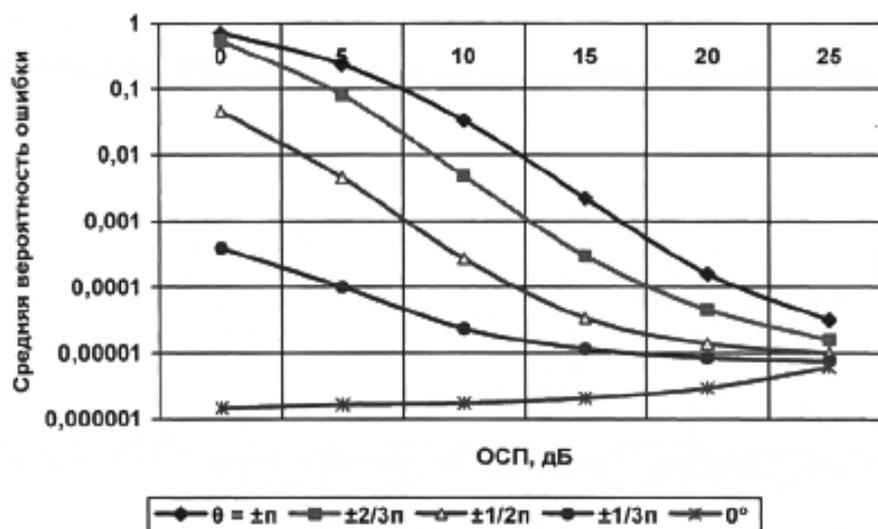
$$P_{\text{сумм}} = (P_c (1 + \left(\frac{2}{\rho_n}\right)^{0,5} \cos\theta + \rho_n^{-1})). \quad (3.20)$$

В наихудшем случае, когда мощность помехи от РЭС, воздействующая на SRD с FHSS и двоичной ЧМ, соизмерима с мощностью полезного сигнала $\rho_n \sim 1$, а их частоты равны $\omega_{\text{п}} = \omega_{\text{с}}$, мощность результирующего сигнала, в зависимости от разности фаз θ , может меняться в пределах $0 < P_{\text{сумм}} < 4$.

На рисунке 3.9 представлены зависимости подынтегральных выражений (3.16) и (3.23) от ОСП для различных значений разности фаз.



а)



б)

а- гармонической помехи на основной канал; б — двух гармонических помех равной мощности на основной и дополнительный канал

Рисунок 3.9 – Зависимость $P_{\text{сумм}}$ от ОСП, при различных значениях величины фазового сдвига между сигналом и гармонической помехой, при воздействии стремиться к нулю, при этом средняя вероятность ошибки на бит информации может быть описана выражением $P_B = 0,5 \exp(-0,5\rho_{\text{ин}})$.

Из представленных зависимостей видно, что, как и следовало ожидать, максимальное значение средняя вероятность ошибки при приеме бита информации достигает тогда, когда сигнал и помеха находятся в противофазе $\theta = \pm\pi$, а минимальное — когда разность их фаз равна нулю $\theta = 0$. В том случае, когда ОСП имеет величину близкую к единице, разность между

максимальным и минимальным значениями средней вероятности ошибки в приеме бита информации может достигать несколько порядков.

Из представленных зависимостей видно, что, как и следовало ожидать, максимальное значение средней вероятности ошибки при приеме бита информации достигается тогда, когда сигнал и помеха находятся в противофазе $\theta = \pm\pi$, а минимальное — когда разность их фаз равна нулю $\theta = 0$. В том случае, когда ОСП имеет величину близкую к единице, разность между максимальным и минимальным значениями средней вероятности ошибки в приеме бита информации может достигать несколько порядков.

3.4 Влияние гармонических помех с FHSS и M-ичной ЧМ на ZigBee

В том случае, когда в ZigBee, то при воздействии гармонической помехи с FHSS используется M-ичной ЧМ на основной канал средняя вероятность ошибки в приеме бита информации может быть найдена с помощью выражения (3.9). При этом функция плотности вероятности статистики z_c на выходе основного канала, приняв $a=0$, будет описываться выражением [45]

$$f_c(z_c) = \frac{z_c}{\sigma_{uu}^2} \left[-\frac{1}{2\sigma_{uu}^2} (z_c^2 + P_c + P_n + 2(P_c P_n)^{0,5} \cos\theta) \right] \times I_0 \left[\frac{1}{\sigma_{uu}^2} (P_c + P_n + 2(P_c P_n)^{0,5} \cos\theta) z_c \right]. \quad (3.24)$$

Так как в остальных (M- 1) каналах присутствуют только собственные шумы, то распределение статистики z_n на выходе этих каналов будет описываться функцией (3.24).

Воспользовавшись результатами [46], получаем, что при воздействии на основной канал передачи ZigBee средняя вероятность ошибки в приеме бита информации будет определяться как:

$$P_{Б.Осн} = \frac{M}{2(M-1)} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{(-1)^{m+1}}{m+1} \left(\frac{M-1}{m} \right) \exp \left\{ -k\rho_{uu} (1 + \rho_n^{-1}) \frac{m}{m+1} \right\}^{-1} \times I_0 \left(\frac{2m}{m+1} k\rho_{uu} (\rho_n^{-1})^{0,5} \right). \quad (3.25)$$

Графики зависимости средней вероятности ошибки в приеме бита информации при воздействии гармонической помехи по основному каналу от ОСП, при различных значениях M и ОСП представлены на рис. 3.10. Из графиков видно, что, так же как и в случае воздействия шумовой помехи с уменьшением ОСП средней вероятности ошибки в приеме бита информации увеличивается. Своего максимального значения она достигает, когда $\rho_n = 1$, то есть когда $P_c = P_n \gg \sigma_n^2$.

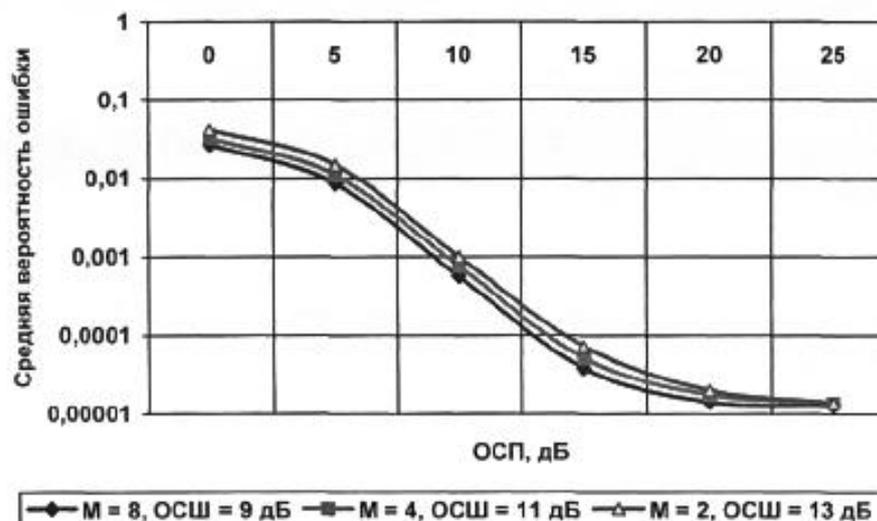


Рисунок 3.10 - Зависимость средней вероятности ошибки на бит информации от ОСП для различных значений M и ОСШ, при воздействии гармонической помехи на основной канал

Если представить функцию Бесселя $I_0(x)$ в виде (3.19), то выражение для определения максимального значения средней вероятности ошибки в приеме бита информации запишется как:

$$P_{\text{Б.мах.осн}} = \frac{M}{2(M-1)} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{(-1)^{m+1}}{m+1} \left(\frac{M-1}{m}\right) 0,5 \left[\frac{(m+1)}{\pi m k_{\text{рш}}}\right]^{0,5}, P_c = P_{\text{п}}. \quad (3.26)$$

Зависимости $P_{\text{в.тах.осн}}$ от ОСШ, для наихудшего случая, когда мощность гармонической помехи равна мощности полезного сигнала, то есть $p_n = 1$, для различных значений M , представлены на рисунке. 3.11.

Из представленных зависимостей видно, что, так же как и при воздействии шумовой помехи, при воздействии гармонической помехи с FHSS и M -ичной ЧМ на канал ZigBee по которому ведется передача, помехоустойчивость ZigBee возрастает с увеличением размера алфавита сигнала M , при постоянной скорости передачи символов и энергии сигнала на информационный бит. Так, по сравнению с двоичной ЧМ ($M = 2$), при $M = 4$ помехоустойчивость увеличивается примерно на 2 дБ, а при $M = 8$ - почти на 3 дБ.

Однако необходимо отметить, что при воздействии гармонической помехи с FHSS на любой из M -ичных каналов ZigBee, в которых не ведется передача, так же как и при воздействии шумовой помехи с FHSS на любой дополнительный канал, помехоустойчивость ZigBee резко падает. Это связано с тем, что при M -ичной ЧМ на одной несущей частоте одновременно передается $\log_2 M$ бит, поэтому при воздействии помехи с FHSS на любой

дополнительный канал ZigBee могут возникнуть ошибки сразу в $\log_2 M$ битах [46].

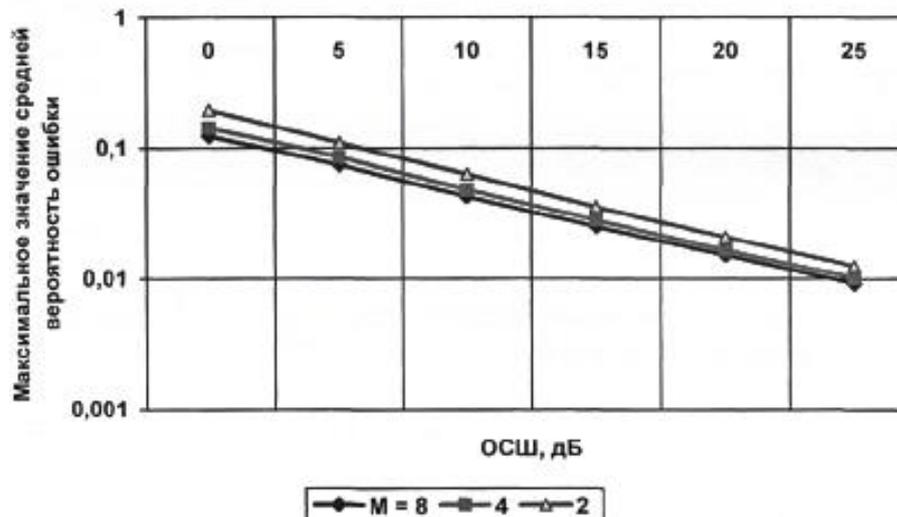


Рисунок 3.11 - Зависимость средней вероятности ошибки на бит информации от ОСП для различных значений M и ОСШ, при воздействии гармонической помехи на основной канал

Сравнение зависимостей представленных на рисунке 3.5 и рисунке 3.11 показывает, что воздействие гармонической помехи с FHSS и M -ичной ЧМ на основной канал ZigBee, более отрицательно сказывается на помехоустойчивости ZigBee, чем воздействие на тот же канал помехи имеющей шумовой характер.

Негативное воздействие как гармонической, так и шумовой помехи значительно уменьшается с увеличением величин ОСП и ОСШ. В этом случае значение величины максимальной средней вероятности ошибки на бит информации уменьшается.

3.5 Влияние комбинированной (шумовой и гармонической) помехи на ZigBee с FHSS и ЧМ

При воздействии на основной канал ZigBee одновременно двух помех имеющих шумовой и гармонический характер с FHSS и двоичной ЧМ средняя вероятность ошибки в приеме бита информации может быть найдена исходя из выражения:

$$P_{Б.Осн} = \left(2 + \frac{\rho_{ш}}{\rho_n}\right)^{-1} \exp\left\{-\frac{1 + \rho_n^{-1}}{\rho_n^{-1} + 2\rho_{ш}^{-1}}\right\} I_0\left(\frac{\sqrt{\rho_n^{-1}}}{\rho_n^{-1} + 2\rho_{ш}^{-1}}\right). \quad (3.27)$$

График зависимости средней вероятности ошибки в приеме бита информации от ОСП, при ОСШ равном 13 дБ, построенный на основании выражения (3.27), представлен на рисунке 3.12

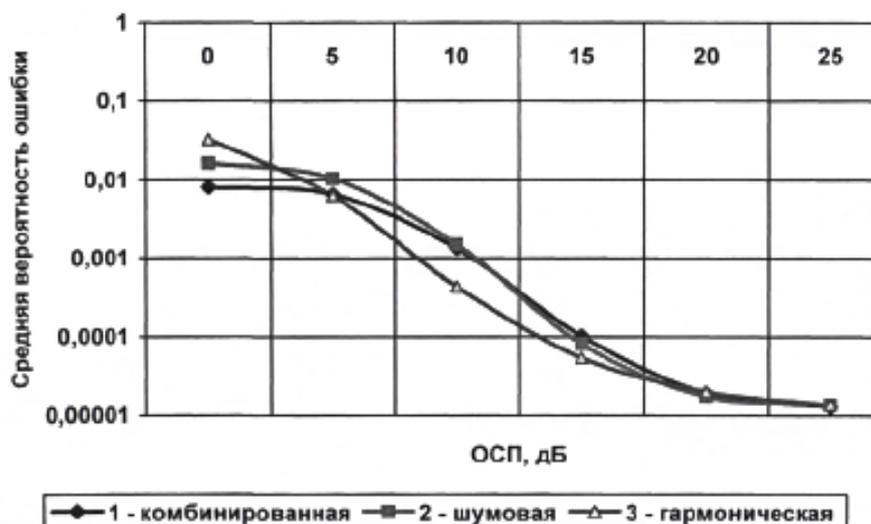


Рисунок 3.12 - Зависимость средней вероятности ошибки на бит информации от ОСП, при ОСШ = 13 дБ, при воздействии на основной канал

Для сравнения, на рис. 3.12 приведены зависимости средней вероятности ошибки в приеме бита информации от ОСП, при тех же значениях ОСШ, когда на основной канал демодулятора ZigBee воздействует только шумовая помеха (кривая 2) и только гармоническая (кривая 3).

Анализ представленных на рис. 3.12 графиков показывает, что в случае воздействия на ZigBee комбинированной помехи с FHSS и двоичной ЧМ, помехоустойчивость ZigBee мало будет отличаться от случая, когда на демодулятор будет воздействовать только шумовая или только гармоническая помеха. Эта разница будет ощущаться лишь при относительно небольших значениях ОСП. По мере увеличения ОСП эта разница практически сводится к нулю.

3.6 Заключение по третьей главе

1 Произведена оценка влияния шумовых помех с FHSS и ЧМ на ZigBee. Рассмотрен наихудший случай, когда помеха от РЭС попадает в канал приемника ZigBee до перескока его рабочей частоты. Показано, что если на системы ZigBee воздействует помеха со скачкообразной перестройкой частоты FHSS и двоичной ЧМ, представляющая собой сосредоточенный по рабочей полосе SRD белый гауссовский шум, то средняя вероятность ошибки, при приеме бита информации, зависит не только от ОСП, но и ОСШ. Чем больше величина ОСШ, тем больше на величину ошибки влияет величина ОСП, и наоборот, чем меньше ОСШ, тем меньше величина ОСП влияет на

среднюю величину ошибки. Показано, что более помехозащищенными являются те устройства ZigBee, в приемниках которых частотный разнос между информационными каналами постоянно меняется.

2 Произведена оценка влияния шумовых помех с FHSS и M -ичной ЧМ на ZigBee. Показано, что с увеличением ОСП средняя вероятность ошибки в приеме бита информации при воздействии шумовой помехи с FHSS и M -ичной ЧМ от РЭС на основной канал ZigBee стремится к величине 10. Для уменьшения влияния шумовой помехи с FHSS и M -ичной ЧМ от РЭС на основной канал ZigBee необходимо, чтобы значение ОСП приемника ZigBee было наибольшим.

3 Увеличение размера алфавита сигнала M при постоянной скорости передачи и энергии сигнала на бит приводит к увеличению помехоустойчивости ZigBee при воздействии на него шумовой помехи с FHSS и M -ичной ЧМ. Причем ZigBee с помехой FHSS и M -ичной ЧМ, по сравнению с помехой с двоичной ЧМ, более устойчив к воздействию.

Так, при $M = 4$ воздействие шумовых помех с FHSS и M -ичной ЧМ на ZigBee уменьшается почти на 2 дБ, а при $M = 8$ почти на 3 дБ.

4 Произведена оценка влияния гармонических помех с FHSS и ЧМ на ZigBee. Показано, что если на основной канал ZigBee воздействуют гармонические помехи с FHSS с частотой равной частоте сигнала и равномерной распределенной фазой, то характер изменения средней вероятности ошибки в приеме бита информации практически такой же, как и при воздействии шумовой помехи с FHSS на основной канал ZigBee.

При оценке воздействия гармонической помехи с FHSS на ZigBee необходимо учитывать не только ее мощность, но и разность фаз между ней и сигналом. Если ОСП близко к единице, то разность между максимальным и минимальным значениями средней вероятности ошибки может достигать несколько порядков.

5 Произведена оценка влияния гармонических помех с FHSS и M -ичной ЧМ на ZigBee. Показано, что, так же как и при воздействии шумовой помехи, при воздействии гармонической помехи с FHSS и M -ичной ЧМ на канал ZigBee по которому ведется передача, помехоустойчивость ZigBee возрастает с увеличением размера алфавита сигнала M , при постоянной скорости передачи символов и энергии сигнала на информационный бит. Так, по сравнению с двоичной ЧМ ($M = 2$), при $M = 4$ помехоустойчивость увеличивается примерно на 2 дБ, а при $M = 8$ — почти на 3 дБ.

6 Произведена оценка влияния комбинированной (шумовой и гармонической) помехи с FHSS и ЧМ на ZigBee. Показано, что в случае воздействия на ZigBee комбинированной помехи с FHSS и двоичной ЧМ, помехоустойчивость ZigBee мало будет отличаться от случая, когда будет воздействовать только шумовая или только гармоническая помеха. Эта разница будет ощущаться лишь при относительно небольших значениях ОСП. По мере увеличения ОСП эта разница практически сводится к нулю.

4 Экспериментальная часть

4.1 Параметры исследуемых помех, влияющих на скорость обмена информацией

В литературе [2,3,4,5] рассмотрены вопросы влияния различных помех на системы связи. В технической документации [6,7,8] говорится о высокой помехозащищенности устройств ZigBee, однако числовые значения не приводятся. Поэтому основной задачей работы явилась экспериментальная оценка возникновения ошибок при перекрытии сигнала помехой для двух условий работы – для открытого пространства и в закрытом помещении.

Разработано много математических моделей для расчета зон покрытия. Наиболее подробная модель разработана Аунг Мьинт Эй [1]. Основные положения и параметры взяты из данной работы.

Зона покрытия зависит от чувствительности приемника, которая связана с отношением сигнал/шум на входе приемника. Для цифровых систем принято вместо отношения сигнал/шум рассматривать отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 (нормированная версия отношения сигнал/шум). Эта величина определяет вероятность появления битовой ошибки в приемнике, влияя на качество, а, следовательно, и скорость передачи информации. График, связывающий E_b/N_0 с вероятностью появления битовой ошибки, изображен на рисунке 4.1.

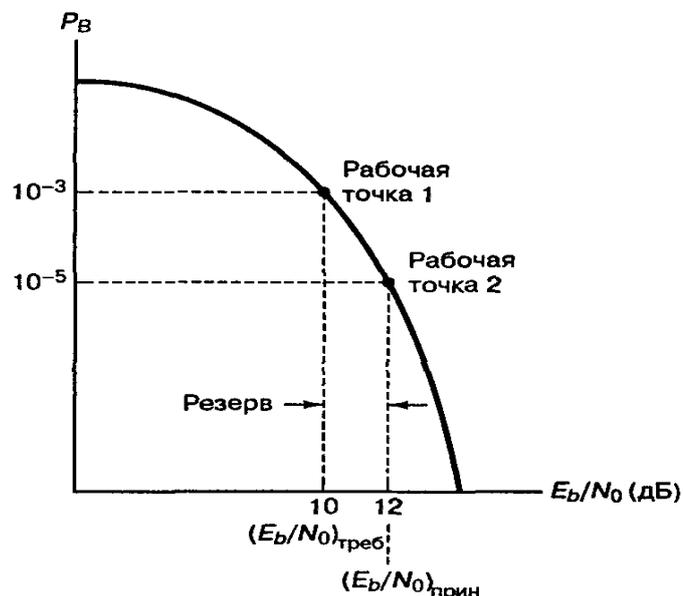


Рисунок 4.1 – Зависимость вероятности появления битовой ошибки от соотношения E_b/N_0

Для цифровой системы связи существует критическая величина битовой ошибки, после которой система перестает работать. Эта критическая величина задает нам требуемое отношение E_b/N_0 на входе приемника и фактически определяет зону покрытия передатчика. Но поскольку существует много

причин, по которым мощность в точке приема может оказаться меньше расчетной или шумы окажутся больше систему связи проектируют с некоторым запасом, который называется энергетическим резервом M .

$$M(\text{дБ}) = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{прин}} (\text{дБ}) - \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{треб}} (\text{дБ}), \quad (4.1)$$

где $(E_b/N_0)_{\text{прин}}$ – реальное принятое отношение E_b/N_0 .

На рисунке 4.1 показаны два важных значения E_b/N_0 . Величина энергетического резерва M выбирается из практической целесообразности, так как чем больше выбираем M , тем меньше зона покрытия у передатчика. Обычно величина энергетического резерва небольшая и составляет несколько децибел (на рисунке 4.1 она равна 2 дБ).

При определении зоны покрытия учитываются собственные шумы приемника, общие фоновые шумы в заданном диапазоне радиоволн, затухание сигнала за счет расхождения фронта волны и затухание в атмосфере. Если помехи будут достаточно сильными, они могут полностью нарушить связь. Проблема помехозащищенности может возникнуть по ряду дополнительных причин. Сама технология ZigBee предусматривает очень широкое применение в различных устройствах, поэтому возможно возникновение ситуации, когда две ZigBee сети окажутся размещенными в одном помещении.

Другая возможность возникновения помех связано с электромагнитным излучением различных устройств, например, компьютер у которого тактовая частота процессора 2,4 ГГц. Учитывая, что устройства ZigBee могут использоваться в охранных системах, то возможна и специальная постановка помех. Для систем, которые могут быть подвержены внешним помехам, определяется порог сопротивления помехам

$$M_{AJ}(\text{дБ}) = \left(\frac{E_b}{J_0} \right)_{\text{прин}} (\text{дБ}) - \left(\frac{E_b}{J_0} \right)_{\text{треб}} (\text{дБ}), \quad (4.2)$$

где J_0 – спектральная плотность мощности помехи;

E_0 – отношение мощности сигнала к скорости передачи данных.

Необходимо отметить, что должно выполняться условие $(E_b/J_0)_{\text{треб}} \geq (E_b/N_0)_{\text{треб}}$. Иначе вероятность ошибки станет неприемлемой. Учитывая, что уровень помех может быть достаточно высоким то порог сопротивления помехам должен быть больше энергетического резерва.

Чтобы определить порог сопротивления помехам необходимо выяснить наклон кривой изображенной на рисунке 4.1, т.е. фактически определить производную изменения вероятности ошибки к изменению нормированного отношения сигнал/шум. Для этого вначале рассмотрим технические

характеристики устройств ZigBee на примере модулей производимых компанией Digi. Эти модули взяты за основу, так как они имеются на кафедре и на них можно экспериментально проверить теоретические результаты работы. Технические характеристики модулей, влияющие на помехозащищенность, представлены в таблице 4.1 [3].

Т а б л и ц а 4. 1 – Сравнительные характеристики модулей XBee Series 1 и XBee Series 2 и XBee-PRO

Параметр	XBee Series 1	XBee Series 2	XBee-PRO
Дальность действия в здании, м	до 30	до 40	до 100
Дальность (прямая видимость), м	до 100	до 120	до 1200
Выходная мощность	1 мВт (0 дБм)	2 мВт (+3 дБм)	100 мВт
Скорость в радиоканале, Кбит/с	250	250	250
Чувствительность приемника	-92 дБм (1% PER)	-98 дБм (1% PER)	-100 дБм (1% PER)
Частотный диапазон, ГГц	ISM 2,4000-2,4835	ISM 2,4000-2,4835	ISM 2,4000-2,4835
Варианты антенн	Чип-антенна, Четвертьволновой штырь, Разъем UFL	Чип-антенна, Четвертьволновой штырь, Разъем UFL или RPSMA	Чип-антенна, Четвертьволновой штырь, Разъем UFL
Число каналов	16 частотных каналов	16 частотных каналов	12 частотных каналов
Возможности адресации	PAN ID, Channel & Source/Destination	PAN ID, Channel & Source/Destination	PAN ID, Channel & Source/Destination

В модулях XBee Series 1, XBee Series 2 и XBee-PRO используется 128-битное AES-шифрование, CSMA-CA – алгоритм предотвращения коллизий, для защиты от сосредоточенной помехи используется сигнал с расширением спектра, состоящий из 32 фазоманипулируемых элементов (DSSS) [4]. В зависимости от диапазона частот используются различные виды модуляции:

– квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом (OQPSK) (ещё называемой офсетной фазовой модуляцией) в диапазоне 2,4 ГГц;

– относительная двоично-фазовая модуляция (BPSK) в диапазоне 868 и 915 МГц.

Основное различие в этих видах модуляции в их спектральных характеристиках представленных на рисунке 4.2 [2].

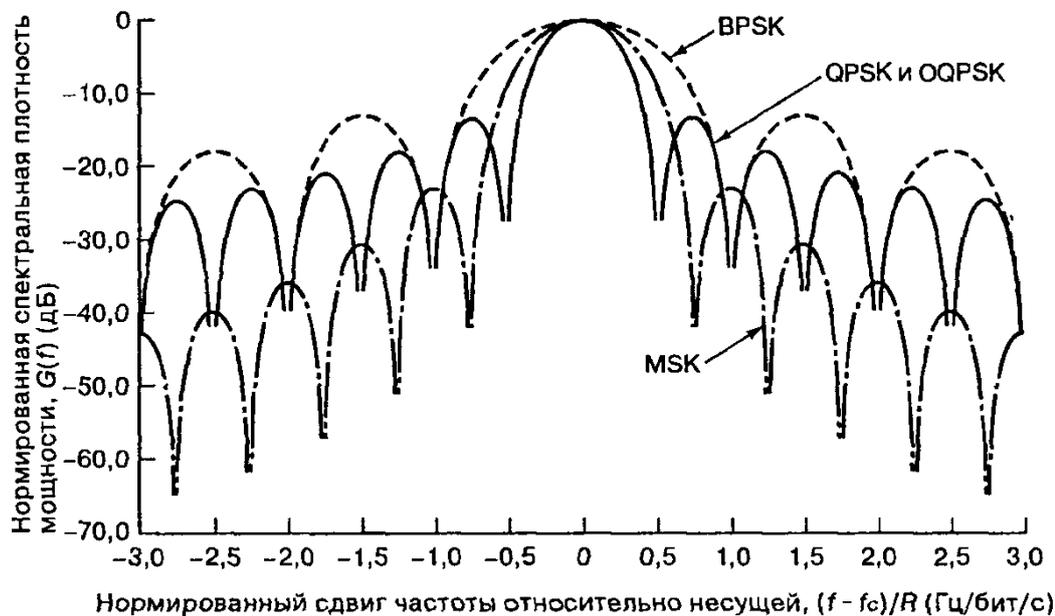


Рисунок 4.2 – Нормированная спектральная плотность мощности для BPSK, QPSK, OQPSK и MSK

Рисунок 4.2 показывает, что лучшей избирательностью по соседнему каналу обладает модуляция QPSK и OQPSK по сравнению с модуляцией BPSK, однако все они уступают модуляции MSK (манипуляция с минимальным сдвигом). Это говорит о том, что в системах ZigBee не реализуются все возможности по защите от помех. Также следует отметить, что, несмотря на разницу в спектрах теоретическая вероятность появления битовой ошибки для модуляций BPSK, QPSK и OQPSK одинаковые [2]. Вероятность битовой ошибки определяется формулой

$$P_B = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \quad (4.3)$$

где $Q(x)$ – гауссовый интеграл. Если сравнить вероятность битовой ошибки модуляций BPSK, QPSK и OQPSK с другими бинарными системами, то она оказывается лучшей. Это иллюстрируется графическими зависимостями вероятности появления ошибочного бита для бинарных систем, изображенными на рисунке 4.3 (на рисунке соответствует линии – когерентное обнаружение сигналов в ортогональной PSK). Следует отметить,

что выигрыш по сравнению с другими видами бинарной фазовой модуляцией небольшой, где-то не более 1 дБ, однако по сравнению с бинарными частотными методами модуляции выигрыш составляет более 3 дБ. Это говорит о том, что устройства ZigBee обладают лучшей помехозащищенностью, по сравнению с устройствами, имеющими другой вид модуляции.

Кроме вероятности появления ошибочного бита, существует вероятность появления символьной ошибки, для модуляции BPSK $P_E = P_B$, а для модуляций QPSK и OQPSK $P_E = 2P_B$.

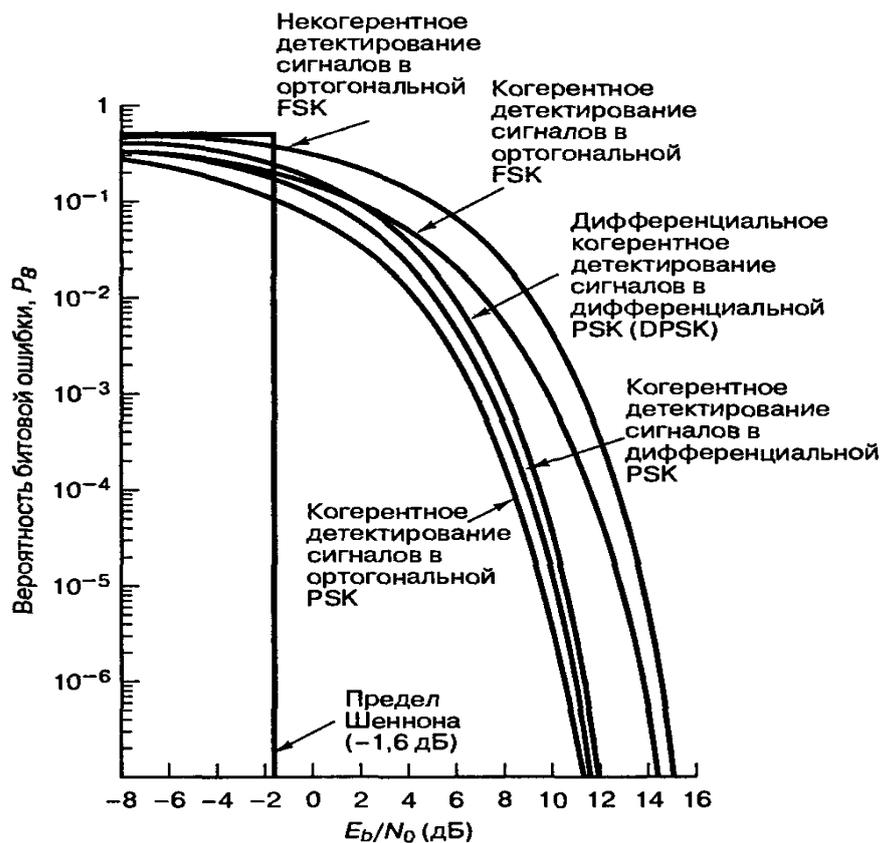


Рисунок 4.3 – Вероятность появления ошибочного бита для бинарных систем нескольких типов

Существует несколько видов преднамеренных помех, а непреднамеренные помехи можно свести к преднамеренным помехам.

Типы преднамеренных помех (рисунок 4.4) [2]:

- широкополосный шум;
- узкополосный шум;
- ступенчатый шум;
- узкополосные тоновые помехи;
- ступенчатые тоновые помехи.

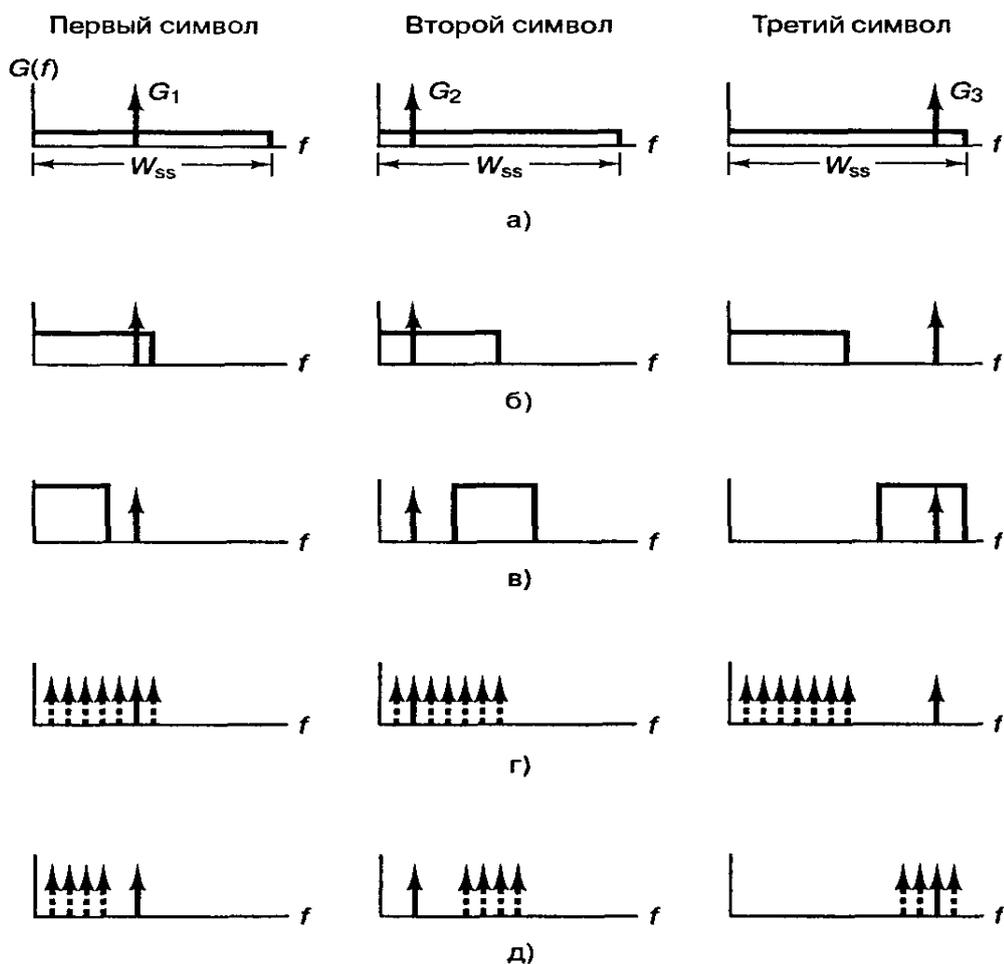


Рисунок 4.4 – Различные типы преднамеренных помех: а) широкополосный шум; б) узкополосный шум; в) ступенчатый шум; г) узкополосные тоновые помехи; д) ступенчатые тоновые помехи

Подавление сигнала широкополосным шумом. Вероятность битовой ошибки в когерентной системе связи BPSK (относительная фазовая модуляция) при наличии широкополосного шума

$$P_B = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0 + J_0}}\right) = Q\left[\sqrt{\frac{2E_b/N_0}{1 + (E_b/N_0)(J/S)/G_p}}\right]. \quad (4.4)$$

где N_0 – спектральная плотность мощности теплового шума на входе приемника,

G_p – коэффициент расширения спектра,

$Q(x)$ – гауссовый интеграл.

Подавление сигнала узкополосным шумом. Если для модуляции применяется двоичная частотная манипуляция с некогерентным детектированием

$$P_B = \frac{1-\rho}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) + \frac{\rho}{2} \exp\left[-\frac{E_b}{2(N_0 + J_0/\rho)}\right]. \quad (4.5)$$

где ρ – параметр, указывающий часть полосы сигнала, в котором присутствует помеха.

Подавление сигнала импульсными помехами. Вероятность битовой ошибки при модуляции BPSK с когерентным детектированием

$$P_B = (1-\rho)Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) + \rho Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0 + J_0/\rho}}\right). \quad (4.6)$$

где ρ – параметр, указывающей часть времени передачи.

Приведенные выражения показывают, что преднамеренные помехи увеличивают вероятность появления битовой ошибки в системе. В этом случае имеет смысл увеличить порог сопротивления помехам, что решается некоторым уменьшением зоны покрытия. Однако для этого необходимо знать точное поведение графика, представленного на рисунке 4.1 на вид, которого влияет тип преднамеренной помехи. Дополнительную помехозащищенность обеспечивает метод расширения спектра используемый в ZigBee, поэтому необходимо найти величину порога сопротивления помехам для различных видов помех. В случае, когда устройства ZigBee используются одновременно в различных системах, воздействия преднамеренных помех может нарушить работу всех систем. Поэтому, для проведения эксперимента может быть использован дополнительный комплект устройств ZigBee. Программное обеспечение модулей ZigBee позволяет измерить уровень ошибок в системе.

4.2 Определение влияния условий распространения при воздействии помех на скорость обмена информацией

Структурная схема установки для проведения эксперимента представлена на рисунке 4.5.

Целью работы является: определение критического коэффициента перекрытия сигнала помехой, при котором возникают ошибки при передаче данных и критической вероятности битовой ошибки [43].

Для проведения эксперимента были использованы 2 модуля ZigBee (XBee Series 2, XBee PRO Series 2), генератор НЧ Г4-102, анализатор спектра UMT FS300, генератор ВЧ Г4-79, измеритель мощности Я2М-64, ноутбук.

Первая часть эксперимента включает оценку прохождения сигнала в открытом пространстве и в помещении при отсутствии помех. Измерение уровня мощности принимаемого сигнала в открытом пространстве проводилось в условиях прямой видимости, а также в помещении, в

зависимости от расстояния. (Помещение прямоугольной формы длиной 13 метров, шириной 2 метра и высотой 4 метра).

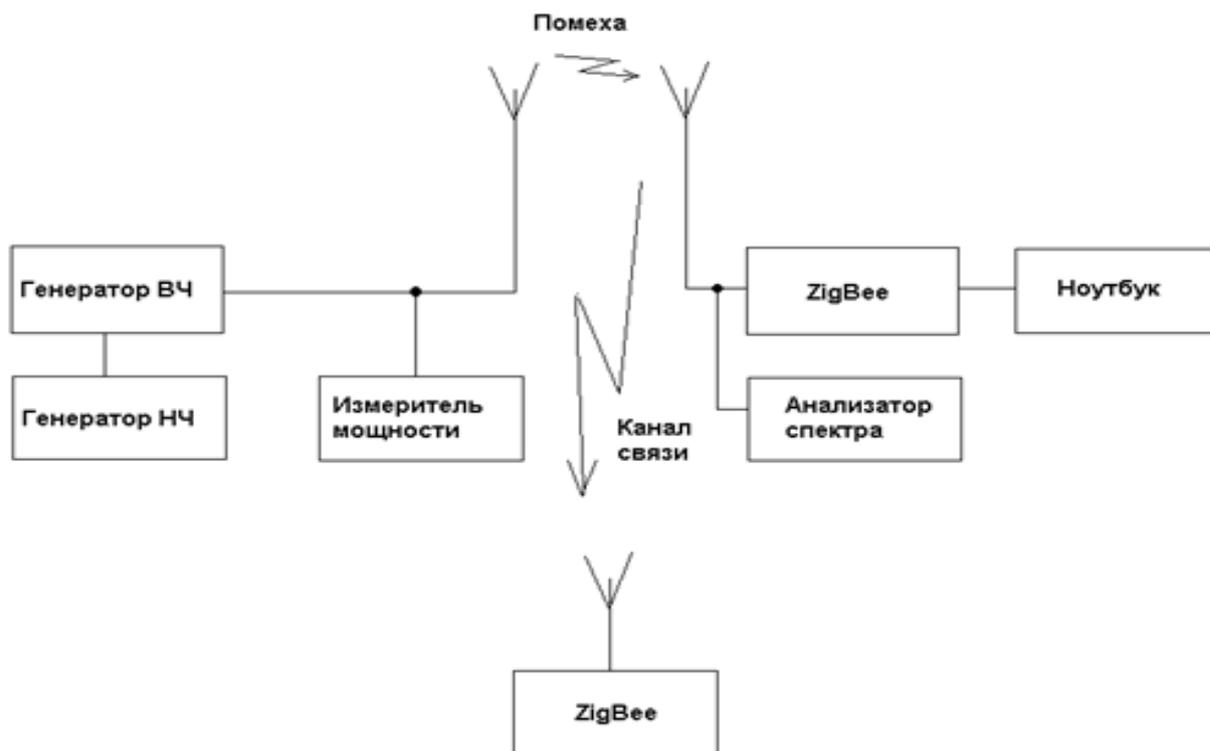


Рисунок 4.5 - Структурная схема для проведения эксперимента

На рисунке 4.6 представлена осциллограмма анализатора спектра (результат передачи информации без помех в помещении). Сигнал передается на частоте 2,445 ГГц. На рисунке 4.7 представлены характеристики зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от расстояния.

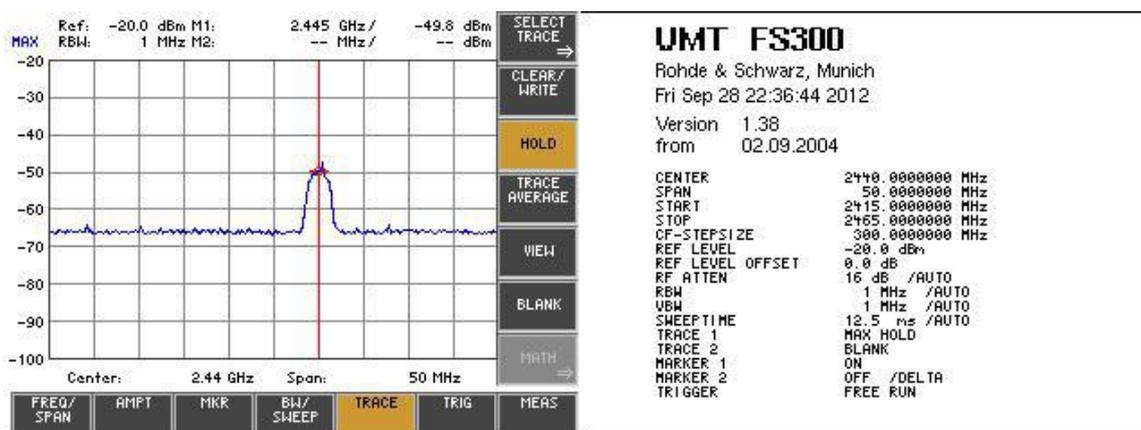


Рисунок 4.6 – Осциллограмма передача информации без помехи

Вторая часть эксперимента заключалась в определении параметров при постановке узкополосной помехи. Для постановки узкополосной помехи

использовался генератор Г4-79 в режиме непосредственной генерации с частотами 2,440ГГц, 2,441ГГц и 2,442ГГц. На рисунке 4.8 представлена осциллограмма анализатора спектра, когда сигнал перекрывается узкополосной помехой на частоте 2,442 ГГц. При данном положении помехи наблюдался срыв сигнала. На рисунке 4.9 приведены характеристики зависимости уровня мощности принимаемого сигнала при наличии узкополосных помех.

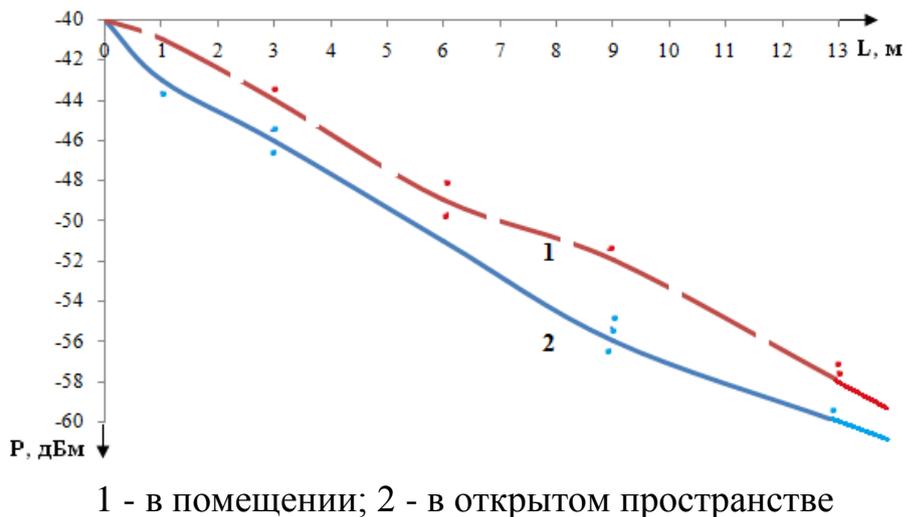


Рисунок 4.7 – Характеристики зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от расстояния в открытом пространстве и в помещении

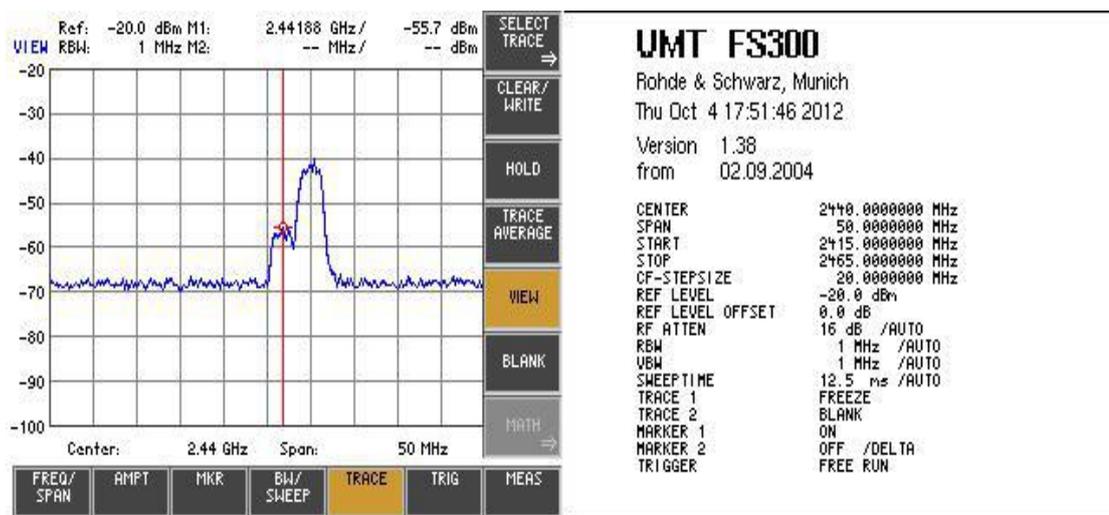


Рисунок 4.8 - Критическое положение узкополосной помехи на сигнал, при которой пропадает сигнал

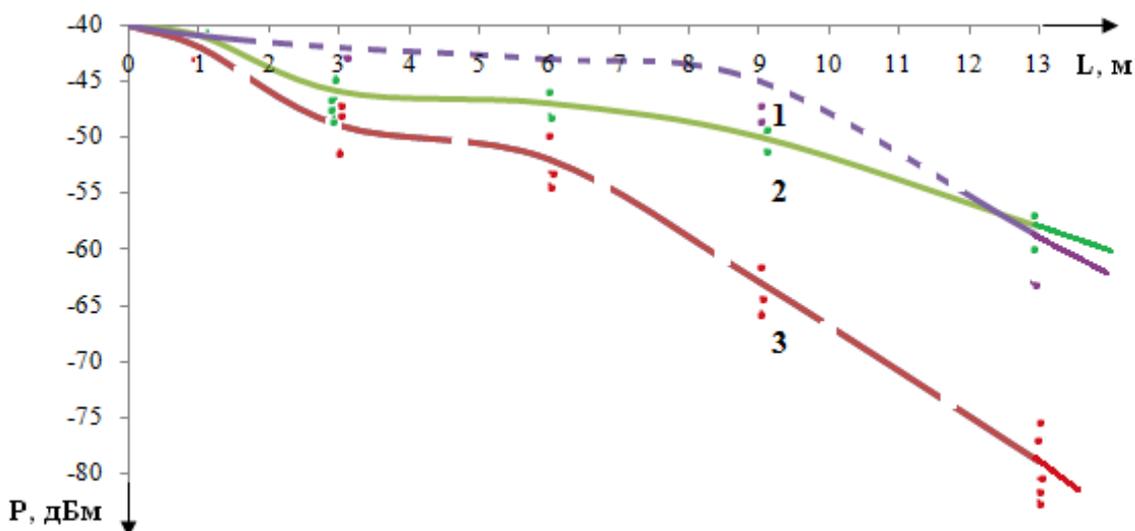


Рисунок 4.9 – Характеристики зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от расстояния в помещении при наличии узкополосной помехи: 1 – частота помехи 2,442ГГц; 2 - частота помехи 2,441ГГц; 3- частота помехи 2,440ГГц

\Третья часть эксперимента заключалась в определении параметров при постановке помехи модулированным сигналом. Для постановки помехи модулированным сигналом на генератор Г4-79 подавался модулирующий сигнал с генератора Г4-102. На рисунке 4.10 представлен результат эксперимента, при котором сигнал с ЧМ модуляцией на частоте 2,4477 ГГц вызывал критическую ошибку.

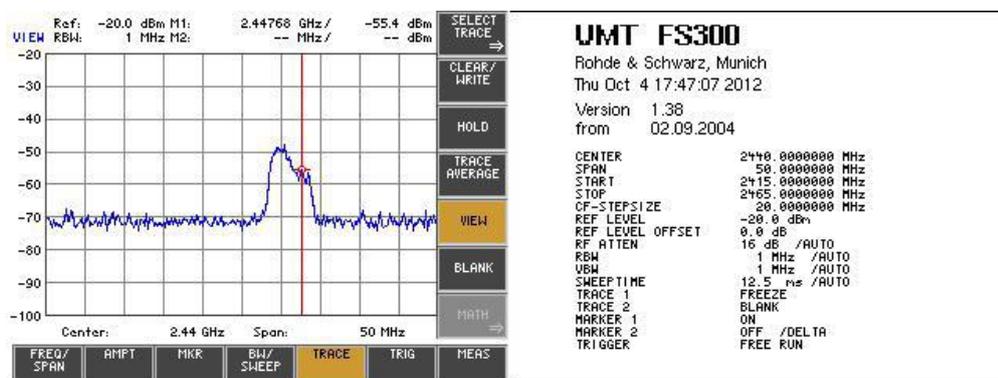


Рисунок 4.10 - Критическое положение помехи с ЧМ модуляцией, при котором пропадает передача данных

Спектрограммы на рисунке 4.8 и 4.10 снимались при значении сигнал/помеха равном 12.5 дБ, при этом были получены коэффициенты перекрытия для гармонического сигнала 0.09, для сигнала с ЧМ модуляцией 0.112. Для определения критической вероятности битовой ошибки воспользуемся выражением [4].

$$P_B = \frac{\rho}{2} \exp\left(-\frac{\rho E_b}{2J_0}\right), \quad (4.7)$$

где ρ – коэффициент перекрытия сигнала помехой;

E_b/J_0 – отношение сигнал/помеха.

Построим график функции для значений коэффициента перекрытия $\rho=0.09$ и $\rho=0.112$ (рисунок 4.11).

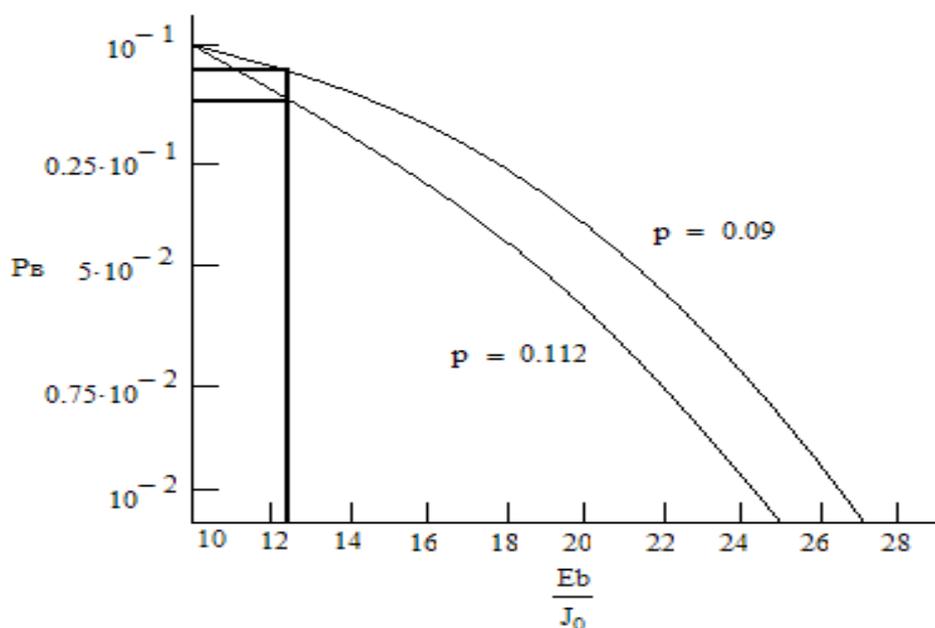


Рисунок 4.11 - Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/помеха для различных коэффициентов перекрытия

По графику для отношения сигнал/помеха равным 12.5 дБ определяем критические вероятности ошибок. Для помехи в виде гармонического сигнала (эксперимент 2) критическая вероятность ошибки составила 0.012, для помехи с ЧМ модуляцией (эксперимент 3) критическая вероятность ошибки составила 0.06.

Выводы по эксперименту:

- частота узкополосной немодулированной помехи должна отличаться от частоты полезного сигнала при коэффициенте перекрытия не более чем на 9% для безошибочной передачи данных. При этом, критическая вероятность битовой ошибки 0.06;

- частота модулированной помехи должна отличаться от частоты полезного при коэффициенте перекрытия не более чем на 11 % для безошибочной передачи данных. Критическая вероятность битовой ошибки 0.012. Это может объясняться тем, что энергия помехи с частотной модуляцией распределяется в более широком спектре, давая возможность более широкого перекрытия сигнала помехой.

4.3 Влияние отражающих препятствий и расстояния между ними на уровень мощности принимаемого сигнала

Влияние отражающего препятствия, расположенного между передатчиком и приемником, создает значительную интерференцию сигнала и способно привести к уменьшению уровня принимаемого сигнала.

Определим влияние угла α (между приемником и передатчиком) и отражающей поверхностью между ними на уровень мощности принимаемого сигнала при условиях предыдущего эксперимента.

Приемник и передатчик располагаются в помещении на расстоянии 13 метров, а отражатель на различных расстояниях относительно передатчика ($h=2$ метра, $h=1$ метр, $h=0,5$ метра) и под различными углами α к лучу приходящей волны. Отражатель, представляет собой лист из пластмассы размером $0,5\text{ м} * 0,5\text{ м}$, установленный на штативе. Результаты замеров приведены на рисунке 4.12.

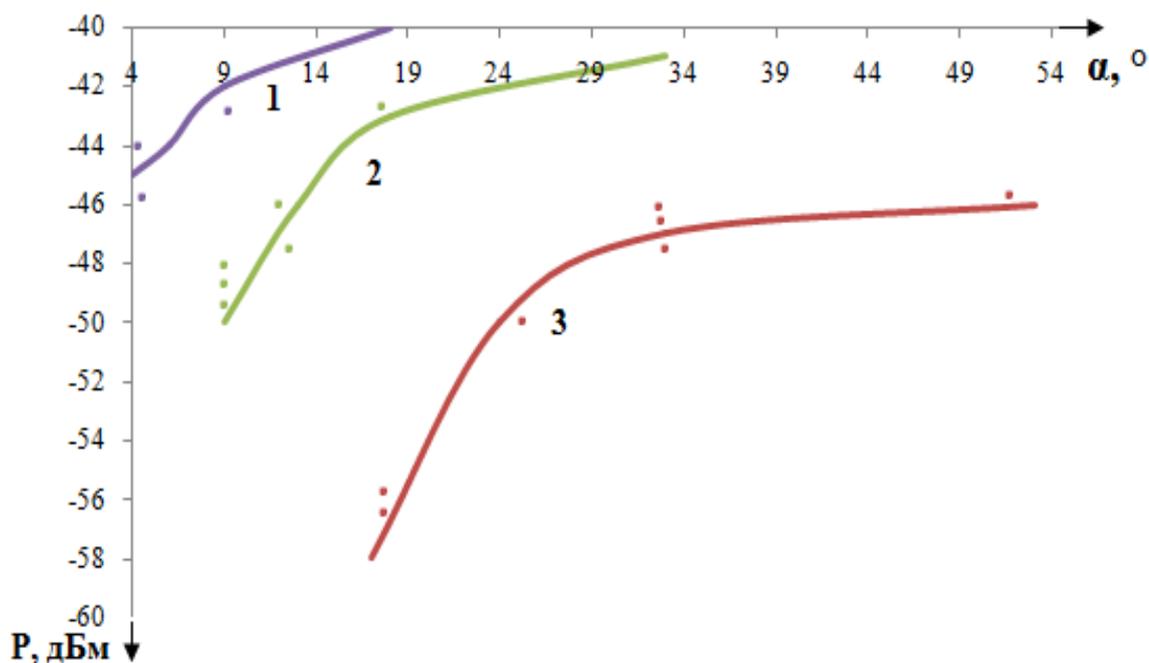


Рисунок 4.12 – Характеристики зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от угла α ; 1 - $h=0,5$ м; 2 - $h=1$ м; 3 - $h=2$ м

Как показал эксперимент (рисунок 4.12), величина мощности принимаемого сигнала имеет нелинейную зависимость и при определенных условиях (линия 3, угол $\alpha = 16^\circ$) увеличивается на 2 дБ. Более высокие значения уровня мощности принимаемого сигнала могут быть связаны с тем, что, при данных положениях, сказывается положительное влияние интерференции, однако во всех других случаях сигнал на входе приемника был значительно меньше.

4.4 Определение совместимости и влияния воздействия помех на скорость обмена информацией идентичных устройств ZigBee при передаче данных на одном канале на частоте 2.4 ГГц

Помехи, которые возникают при одновременной работе беспроводных устройств, находящихся в непосредственной близости друг от друга, могут привести к значительному ухудшению характеристик устройств. В литературе рассматривается взаимное влияние особое внимание уделяется совместимости двух технологий Bluetooth и WLAN в ближнепольном режиме [47].

В каждом модуле ZigBee имеется своя адресация, с помощью которой пакеты отправляются от отправителя к получателю, от получателя к отправителю. В теории две идентичные системы работающие на одной частоте будут зашумлять канал, следовательно будет происходить ошибка при передаче пакета [48,50].

Целью данного эксперимента является описание проблем, связанных с взаимными помехами, при этом особое внимание уделяется совместимости идентичных технологий — ZigBee. Структурная схема установки для проведения эксперимента представлена на рисунке 4.13

Для проведения эксперимента были использованы 4 модуля ZigBee (XBee Series 2, XBee PRO Series 2) и ноутбук. Эксперимент включает оценку прохождения сигнала в свободном пространстве при безошибочной передаче данных.

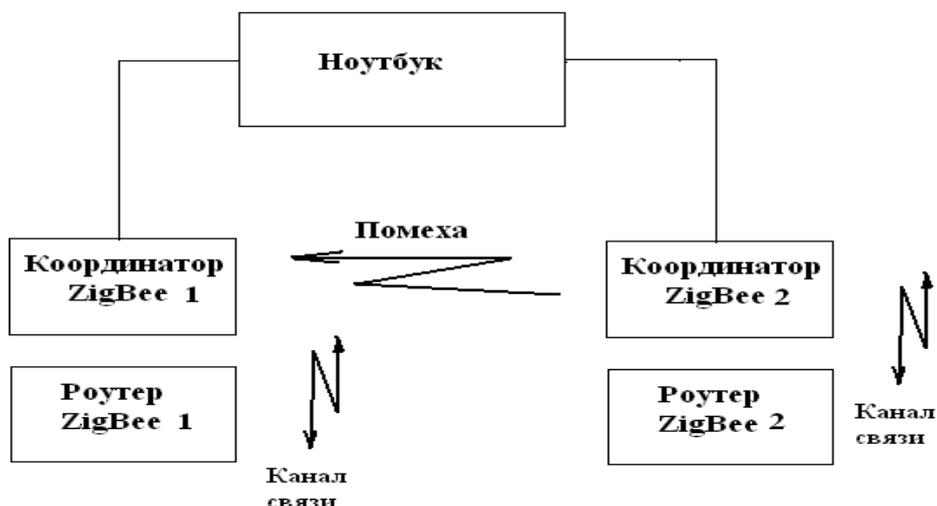


Рисунок 4.13 - Схема определения совместимости идентичных технологий

Координатор передает оконечному устройству тестовую последовательность символов, как полезную нагрузку кадра. Тестовая последовательность задается оператором с помощью программного обеспечения X-CTU и может включать в себя любые символы в произвольном порядке. Оконечное устройство принимает эту последовательность и пересылает обратно координатору. При обработке на приеме координатор

определяет средний уровень мощности каждого принятого пакета. Эта информация выводится в поле индикатора 1 (рисунок 4.14). Затем координатор сравнивает принятую последовательность с отправленной. Все принятые последовательности символов отображаются в поле 4. При несовпадении последовательностей символов устройство принимает решение об ошибочном приеме. Количество правильно принятых последовательностей и принятых с ошибками отображается в поле 3, а их соотношение – в поле 2.

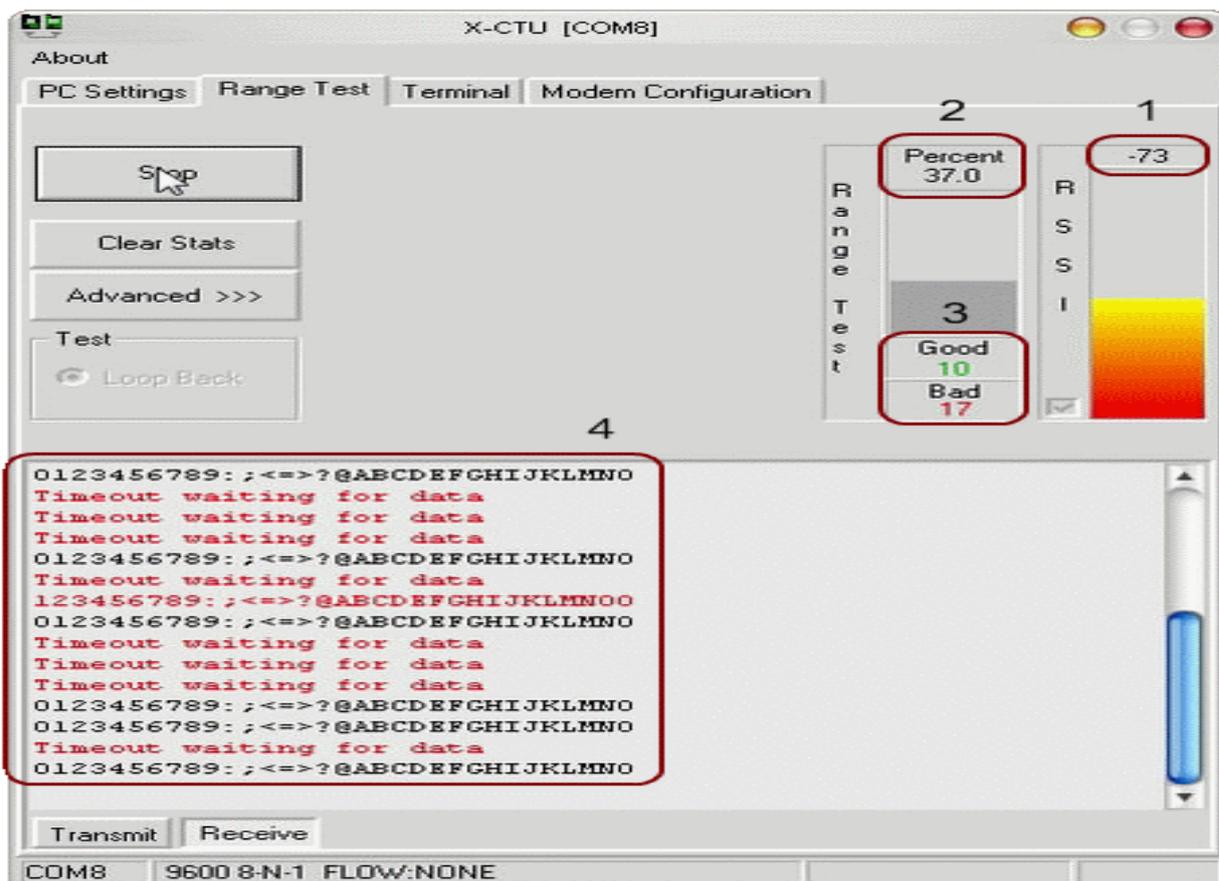


Рисунок 4.14 – Программное обеспечение X-CTU (окно «Range test») 1 – индикатор уровня принимаемого сигнала; 2 – индикатор коэффициента пакетных ошибок; 3 – индикатор правильно принятых пакетов; 4 – принимаемая тестовая последовательность символов

С помощью программы X-CTU можно установить максимально допустимую задержку в приеме сигнала (вкладка «Advanced»). Если в течение отведенного времени координатор не зафиксировал сигнала, в поле 4 выводится сообщение о том, что превышено время ожидания и добавляется единица к счетчику пакетов, содержащих ошибки.

Модули ZigBee предоставляют следующую информацию: коэффициент пакетной ошибки и уровень мощности каждого принятого пакета, в т.ч. и ошибочного.

На рисунке 4.15 представлены результаты передачи информации без помех в ограниченном пространстве на расстоянии 3 метра. Сигнал передавался на частоте 2,445 ГГц. На рисунке 4.16 представлены результаты передачи данных двух идентичных устройств осуществляемых на одинаковых каналах.

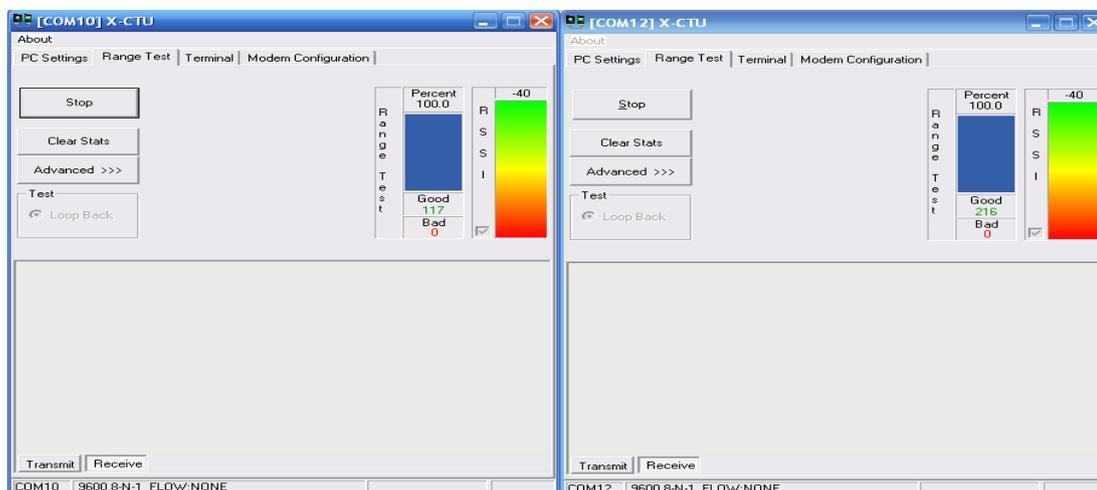


Рисунок 4.15 - Передача данных двух тождественных устройств ZigBee

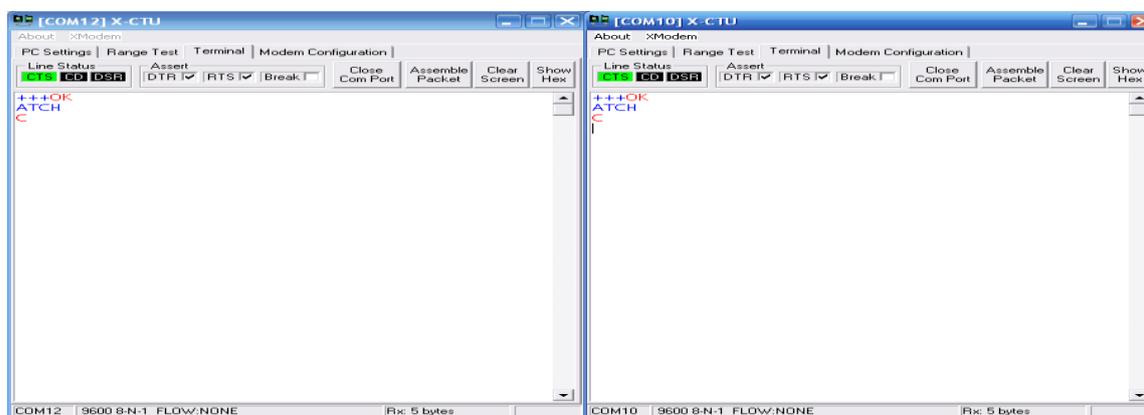


Рисунок 4.16 – Результаты передачи данных двух идентичных устройств осуществляемых на одинаковых каналах

Из распечатки экрана (рисунок 4.16) видно, что при передаче пакетов, происходит синхронизация по времени. Синхронизация осуществляется ноутбуком одновременно для обоих устройств. Пакетная ошибка может произойти в случае отсутствия взаимной синхронизации или если координаторы одновременно пошлют запрос. Однако добиться данной коллизии в эксперименте не удалось.

Как показал эксперимент, взаимная работа устройств ZigBee не влияет на скорость передачи данных при определенных условиях. Устройства ZigBee

способны работать независимо друг от друга на одном канале не снижая качества сигнала при осуществлении взаимной синхронизации. Передача пакетов проходит синхронизировано во временной оси, однако, если координаторы одновременно пошлют запрос, то в этом случае произойдет пакетная ошибка (информация теоретическая, так как добиться данной коллизии в эксперименте не удалось).

4.5 Заключение по экспериментальной части

Для ZigBee, как и любой другой цифровой системы связи существует критическая величина битовой ошибки, после которой система перестает работать. Эта критическая величина задает нам требуемое отношение E_b/N_0 на входе приемника и фактически определяет зону покрытия передатчика. Дополнительную помехозащищенность обеспечивает метод расширения спектра используемый в ZigBee. В случае, когда устройства ZigBee используются одновременно или с другими системами, воздействия преднамеренных помех может нарушить работу систем в следующих случаях:

- частота узкополосной немодулированной помехи должна отличаться от частоты полезного сигнала ZigBee при коэффициенте перекрытия не более чем на 9% для безошибочной передачи данных. При этом, критическая вероятность битовой ошибки 0.06;

- частота модулированной помехи должна отличаться от частоты полезного сигнала ZigBee при коэффициенте перекрытия не более чем на 11 % для безошибочной передачи данных. Критическая вероятность битовой ошибки 0.012. Это может объясняться тем, что энергия помехи с частотной модуляцией распределяется в более широком спектре, давая возможность более широкого перекрытия сигнала помехой;

- величина мощности принимаемого сигнала при наличии отражающих препятствий имеет нелинейную зависимость и при определенных условиях (линия 3, угол $\alpha = 16^\circ$) увеличивается на 2 дБ. Более высокие значения уровня мощности принимаемого сигнала могут быть связаны с тем, что, при данных положениях, сказывается положительное влияние интерференции, однако во всех других случаях сигнал на входе приемника значительно меньше;

- взаимная работа устройств ZigBee не влияет на скорость передачи данных только при определенных условиях. Устройства ZigBee способны работать независимо друг от друга на одном канале не снижая качества сигнала при осуществлении взаимной синхронизации. Передача пакетов проходит синхронизировано во временной оси, однако, если координаторы не будут синхронизированы или одновременно пошлют запрос, то в этом случае произойдет значительное снижение скорости передачи или возникнет пакетная ошибка.

Заключение

В диссертации решена важная научно-техническая задача, заключающаяся в разработке методов повышения помехоустойчивости беспроводных устройств малого радиуса действия в условиях интенсивного воздействия внешних помех.

При решении поставленных задач получены результаты, на основании которых можно сделать следующие выводы:

В настоящее время беспроводные сетевые технологии находятся в стадии активного развития, кроме того, постоянно вводятся новые стандарты и радиопротоколы. Серьезные усовершенствования конструкции микросхем радио трактов и сокращение стоимости устройств позволяют создавать большие беспроводные сети контроля и управления, способные надежно функционировать в неблагоприятных условиях нашей среды при очень ограниченных программных ресурсах. Только в этом случае они могут быть успешно конкурировать с проводными системами.

Внедрение технологии ZigBee подтверждает, что перечисленные выше требования к беспроводным системам являются непреодолимыми. Использованный для разработки компактного сетевого протокола стандарт IEEE.802.15.4 способен обеспечить любые потребности в беспроводных коммуникациях для устройств бытового, промышленного и коммерческого управления и контроля, даже если эти устройства имеют недостаточно вычислительных ресурсов. Дополнительным преимуществом ZigBee является наличие множества доступных средств и инструментов для быстрого развертывания и обслуживания сети.

Показано, что одной из важнейших проблем для сетей беспроводного доступа выполненных на основе технологии ZigBee является прогнозирование зон уверенной работы как вне, так и внутри помещений. Главная причина этого заключается в неравномерном затухании сигнала и многочисленных рассеивающих препятствиях, что обусловлено сильной пространственной неоднородностью среды распространения радиоволн.

Получены зависимости оценки потерь при распространении радиоволн в условиях отсутствия прямой видимости при различном удалении от препятствия. Показано, что чем меньше расстояние, на котором размещается препятствие, тем на большую величину увеличивается затухание, причем скорость изменения затухания по мере удаления не изменяется.

Показано, что потери при распространении в различных условиях застройки возрастают лишь по абсолютной величине, хотя с увеличением расстояния должен возрасти и градиент увеличения потерь. Кроме того, потери в свободном пространстве, рассчитанные по формулам Хата и общепринятым выражениям для расчета оценки потерь при распространении радиоволн в условиях отсутствия прямой видимости, в сотовых системах связи, различаются.

Получены зависимости оценки потерь при распространении радиоволн от расстояния при различных высотах расположения ведущего и ведомого устройства. Показано, что при увеличении высоты подъема передающего устройства уменьшается градиент потерь. Однако на малых расстояниях формула не действует, так как, чем выше антенна, тем ниже потери, причем расстояние между устройствами не связано с высотой их подъема. То есть, при высоте подъема ведущего устройства на 3 м, а ведомого на 1 м не может быть расстояния между устройствами менее 2 м. Формулы этого не учитывают.

Анализ имеющихся методик и формул расчета показал, что они дают лишь приблизительную оценку затухания радиоволн при их распространении в различных условиях, и не подходят для решения задач по расчету зон уверенного обслуживания ZigBee как на открытой местности, так и внутри помещений.

Произведена оценка влияния шумовых помех с FHSS и ЧМ на ZigBee.

Рассмотрен наихудший случай, когда помеха от РЭС попадает в канал приемника ZigBee до перескока его рабочей частоты. Показано, что если на системы ZigBee воздействует помеха со скачкообразной перестройкой частоты FHSS и двоичной ЧМ, представляющая собой сосредоточенный по рабочей полосе SRD белый гауссовский шум, то средняя вероятность ошибки, при приеме бита информации, зависит не только от ОСП, но и ОСШ. Чем больше величина ОСШ, тем больше на величину ошибки влияет величина ОСП, и наоборот, чем меньше ОСШ, тем меньше величина ОСП влияет на среднюю величину ошибки.

Показано, что более помехозащищенными являются те устройства ZigBee, в приемниках которых частотный разнос между информационными каналами постоянно меняется.

Произведена оценка влияния шумовых помех с FHSS и M -ичной ЧМ на ZigBee. Показано, что с увеличением ОСП средняя вероятность ошибки в приеме бита информации при воздействии шумовой помехи с FHSS и M -ичной ЧМ от РЭС на основной канал ZigBee стремится к величине 10.

Для уменьшения влияния шумовой помехи с FHSS и M -ичной ЧМ от РЭС на основной канал ZigBee необходимо, чтобы значение ОСШ приемника ZigBee было наибольшим.

Увеличение размера алфавита сигнала M при постоянной скорости передачи и энергии сигнала на бит приводит к увеличению помехоустойчивости ZigBee при воздействии на него шумовой помехи с FHSS и M -ичной ЧМ. Причем ZigBee с помехой FHSS и M -ичной ЧМ, по сравнению с помехой с двоичной ЧМ, более устойчив к воздействию. Так, при $M = 4$ воздействие шумовых помех с FHSS и M -ичной ЧМ на ZigBee уменьшается почти на 2 дБ, а при $M = 8$ почти на 3 дБ.

Произведена оценка влияния гармонических помех с FHSS и ЧМ на ZigBee. Показано, что если на основной канал ZigBee воздействуют гармонические помехи с FHSS с частотой равной частоте сигнала и

равномерной распределенной фазой, то характер изменения средней вероятности ошибки в приеме бита информации практически такой же, как и при воздействии шумовой помехи с FHSS на основной канал ZigBee.

При оценке воздействия гармонической помехи с FHSS на ZigBee необходимо учитывать не только ее мощность, но и разность фаз между ней и сигналом. Если ОСП близко к единице, то разность между максимальным и минимальным значениями средней вероятности ошибки может достигать несколько порядков.

Произведена оценка влияния гармонических помех с FHSS и M-ичной ЧМ на ZigBee. Показано, что, так же как и при воздействии шумовой помехи, при воздействии гармонической помехи с FHSS и M-ичной ЧМ на канал ZigBee по которому ведется передача, помехоустойчивость ZigBee возрастает с увеличением размера алфавита сигнала M , при постоянной скорости передачи символов и энергии сигнала на информационный бит. Так, по сравнению с двоичной ЧМ ($M = 2$), при $M = 4$ помехоустойчивость увеличивается примерно на 2 дБ, а при $M = 8$ — почти на 3 дБ.

Произведена оценка влияния комбинированной (шумовой и гармонической) помехи с FHSS и ЧМ на ZigBee. Показано, что в случае воздействия на ZigBee комбинированной помехи с FHSS и двоичной ЧМ, помехоустойчивость ZigBee мало будет отличаться от случая, когда будет воздействовать только шумовая или только гармоническая помеха. Эта разница будет ощущаться лишь при относительно небольших значениях ОСП. По мере увеличения ОСП эта разница практически сводится к нулю.

Произведена оценка влияния помех с FHSS, двоичной ЧМ и блоковым кодированием от РЭС на системы ZigBee. Показано, что применение простых двоичных блоковых кодов приводит к повышению помехоустойчивости двоичных ZigBee. Так, применение кода Хэмминга (7,4), в условиях воздействия наихудшей шумовой помехи, позволяет повысить ОСП примерно на 8 дБ при средней вероятности ошибки в приеме бита более помехоустойчивые коды можно еще больше повысить ОСП.

Применение кодирования с исправлением ошибок, в условиях воздействия наихудших гармонических помех с FHSS и случайной ЧМ, так же позволяет значительно повысить помехоустойчивость ZigBee. Так, применение кода Голя (23,12), при средней вероятности ошибки в приеме бита информации обеспечивает выигрыш около 10 дБ.

Установлено, что частота помехи может отличаться от частоты полезного сигнала не более 9% для безошибочной передачи данных. Критическая вероятность битовой ошибки 0.06.

Частота помехи с ЧМ модуляцией может отличаться от частоты полезного сигнала не более 11 % для безошибочной передачи данных. Критическая вероятность битовой ошибки 0.04 Это объясняется, если энергия помехи с ЧМ модуляцией распределяется в более широком спектре, то возможно более широкое перекрытие сигнала помехой.

Список литературы

- 1 Аунг Мьинт Эй Диссертация на тему "Исследование распространения радиоволн и разработка модели затухания для помещений сложной формы" – М.:МГИЭТ, 2008.
- 2 Антипенский Р. Основы аналоговой связи - / под ред. Тузова Г.И. - М.: Радио и связь, 1988.
- 3 Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / под ред. Тузова Г.И. - М.: Радио и связь, 1985.
- 4 Скляр Б. Цифровая связь . Теоретические основы и практические применения. – М.: С - П., К., 2003.
- 5 Феер К. Беспроводная цифровая связь. – М.:Радио и связь, 2000.
- 6 XBee™ Series 2 OEM RF Modules Digi International, Inc. – 2007.
- 7 XBee®/XBee-PRO® RF Modules Digi International, Inc. – 2009.
- 8 802.15.4 IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks — Specific requirements. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York. – 2003.
- 9 Спецификация ZigBee-2006 (ZigBee-Specification-2006Download.pdf)
- 10 www.zigbee.org
- 11 Артюшенко В.М., Корчагин В.А. Анализ особенностей распространения радиоволн в пикосетях беспроводных устройств малого радиуса действия. // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. 2009. №4(31).С.32-37.
- 12 Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: Учебн. пособие. - М: Эко-Трендз, 2005. - 392 с.
- 13 Долуханов М.П. Распространение радиоволн. Учебник для вузов.М., «Связь», 1972. - 234 с.
- 14 Черникова Е.Л., Чернышев О.В. Распространение радиоволн: Учебник для вузов связи. —М.: Радио и связь, 1984. —272 с.
- 15 Никольский В.В., Никольская Т.Н. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебн. пособие для вузов. —3-е изд., перераб. И доп. -М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит. 1989. - 544 с.
- 16 Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. Пособие для вузов по спец. «Радиотехника». - М.: Высш. Шк., 1992. - 416 с.
- 17 Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами/ Г.И.Тузов, В.А. Сивов, В.И. Прытков и др.; Под ред. Г.И. Тузова. - М.: Радио и связь, 1985.-264 с.
- 18 Адресные системы управления и связи. Вопросы оптимизации/ Г.И.Тузов, Ю.Ф. Урядников, В.И. Прытков и др.; Под ред. Г.И. Тузова. - М.: Радио и связь, 1993. - 384 с.

19 Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. -М.: Радио и связь, 2000. - 384 с.

20 Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Немчилова А.В., Чаплыгина А.А. Пространственные и вероятностно-временные характеристики эффективности станции ответных помех при подавлении систем радиосвязи. —М.: РадиоСофт, 2008. - 362 с.

21 Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: Учебное пособие. — М.:Эко-Трендз, 2005. - 392 с.

22 Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем: Учебное пособие / Бузов А.Л., Быховский М.А., Васе-хо Н. В., Волкова Ю.В. и др. - М.: ЭкоТрендз, 2006. - 372 с.

23 Прохоров А. Цифровой дом завтрашнего дня // КомпьютерПресс. - 2003.-№5.С.39-43.

24 Опыт построения сети беспроводных датчиков для мониторинга систем ОВК зданий // АВОК. 2006. № 1.

25 Проблемы проектирования и эксплуатации беспроводных устройств функционирующих в нелицензируемом диапазоне ISM 2,4ГГц и пути их решения // Беспроводные технологии. 2006. № 3

26 Пахомов С. Технологии беспроводных сетей семейства 802.15.4 // Компьютер Пресс.-2003.-N5.С.66-81.

27 Майская В. Беспроводные сенсорные сети. — Электроника: НТБ, 2005, №2, С. 18-22.Баскаков С, Оганов В. Беспроводные сенсорные сети на базе платформы Meshlogic TM. - Электронные компоненты, 2006, №8, С.65 - 69.

28 IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks — Specific requirements. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) Revision of 802.15.4 - 2003, July 2006.

29 Беспроводные сети передачи данных. Радиооборудование. - М.: СОМТЕР, 2001.-81 с.

30 Варгаузин В. Состояние и перспективы сетей Radio Ethernet диапазонов 2.4 и 5 ГГц // ТелеМультиМедиа, 2002, №5 (15), С. 18 - 20.

31 Баскаков С. С. Стандарт ZigBee и платформа MeshLogic: эффективность маршрутизации в режиме «многие к одному» // Первая миля (приложение к журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес»). 2008. № 2 - 3.

32 Агафонов Н. Технологии беспроводной передачи данных ZigBee, Bluetooth, Wi-Fi //Беспроводные технологии. 2006. №1.

- 33 Байчаров С. Выбор технологии беспроводного обмена данными для решения задач автоматизации систем жизнеобеспечения офисно-производственных помещений//Беспроводные технологии. 2007. №2. С.59- 61.
- 34 Соколов М., Воробьев О. Реализация беспроводных сетей на основе технологии ZigBee стандарта 802.15.4 // Компоненты и технологии. 2005.№2.
- 35 Киселев В. Прорезался ZigBee. Журнал «Мир ПК», №2, 2001 // Издательство «Открытые системы».
- 36 Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. Сети и системы радиодоступа.—М.: Эко-Трендз, 2005. - 384 с.
- 37 Рошан Педжман, Лиэри Джонатан. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.15.4.: Пер. с англ. - М.: Издательский дом«Вильямс», 2004. - 304 с.
- 38 Кривченко Т.И. Беспроводные сети компании Ember (ZiBee и EmberNet) для систем контроля и сбора данных. Беспроводные технологии N1,2005.
- 39 Пушкарев О. ZigBee в вопросах и ответах // Сайт Беспроводные технологии.
- 40 Материалы сайта: www.zigbee.org.
- 41 Маковеева М.М. Сигналы и помехи в системах подвижной радиосвязи: М.: Радио и связь, 1999.
- 42 Григорьян И.В. Анализ электротехнических особенностей распространения радиоволн в пикосетях. Наука - сервису: Сб. научных трудов. - МГУС филиал г. Сочи, 2004. С.73 - 75.
- 43 Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. - М.: Радио и связь, 1989. - 656 с.
- 44 Артющенко В.М., Корчагин В.А. Анализ особенностей распространения радиоволн в пикосетях беспроводных устройств малого радиуса действия. // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. 2009. №4(31).С.32-37.
- 45 Долуханов М.П. Распространение радиоволн. Учебник для вузов.
- 46 Черникова Е.Л., Чернышев О.В. Распространение радиоволн: Учебник для вузов связи. —М.: Радио и связь, 1984. —272 с.
- 47 Баскаков СИ. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. Пособие для вузов по спец. «Радиотехника». - М.: Высш. Шк., 1992. - 416 с.
- 48 Коняев А.К. Обеспечение радиопокрытия в DECT - системах / Мобильные системы. №9, 1999. С.34 - 39.
- 49 Системы радиосвязи с расширением спектра сигналов (аналитический обзор)/ В.И. Борисов, В.М. Зинчук, В.И. Николаев и др.// Теория и техника радиосвязи, 1998.- Вып. 1. С. 18-48.
- 50 Никольский В.В., Никольская Т.Н. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебн. пособие для вузов. —3-е изд., перераб. и доп. - М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит. 1989. - 544 с.

51 Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты./Под ред. В.И. Борисова. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: РадиоСофт, 2008. - 512 с.

52 Корчагин В.А. Электромагнитная совместимость беспроводных устройств малого радиуса действия. — Электротехнические и информационные комплексы и системы. №1, т.7, 2010. С. 12 —18.

53 Артюшенко В.М., М. Med Tayeb Laskri, Григорьян И.В. Организация связи и технические характеристики технологии ZigBee. Информационные технологии в XXI веке. Материалы 5-й Международной научно-практической конференции. - М . : МГУС, 2003. С. 109 - 113.

54 Оценка воздействия ответных помех на системы радиосвязи с медленной ППРЧ/ В.И. Борисов, В.М. Зинчук, Н.П. Мухини др.// Теория и техника радиосвязи, 1994. -Вып. 1. С. 3 - 19.

55 Витерби А. Принципы когерентной связи: Пер. с англ./ Под ред. Б.Р. Левина. - М.: Сов. Радио, 1970. - 392 с.