

Открытое акционерное общество
«Московский орден Трудового Красного Знамени научно-
исследовательский радиотехнический институт»

На правах рукописи

Пименов Павел Николаевич

МЕТОД ОЦЕНКИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СРЕДСТВ
ШИРОКОПОЛОСНОГО РАДИОДОСТУПА К
ВОЗДЕЙСТВИЮ СВЕРХКОРОТКИХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Ю.В. Невзоров

Москва 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ШРД В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ.....	12
1.1 Построение телекоммуникационных систем с использованием широкополосных беспроводных технологий.....	12
1.2 Сравнительный анализ уязвимостей различных систем радиосвязи при воздействии СКИ ЭМИ.....	18
1.3 Обзор технических средств электромагнитного воздействия.....	26
1.4 Анализ способов воздействия.....	34
Выводы по главе 1.....	40
ГЛАВА 2 МЕТОД ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ СКИ ЭМИ НА ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СРЕДСТВА БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ.....	42
2.1 Методы модуляции применяемые в распространенных средствах ШРД.....	42
2.2 Анализ механизма воздействия СКИ ЭМИ на средства ШРД.....	48
2.3 Разработка критерия эффективности воздействия СКИ ЭМИ на средства ШРД.....	52
2.4 Анализ помехоустойчивости распространенных видов модуляции к воздействию СКИ ЭМИ.....	54
2.5 Определение критериальных параметров СКИ ЭМИ, влияющих на эффективность воздействия.....	55
2.6 Разработка метода оценки степени влияния СКИ ЭМИ на средства ШРД.....	58
Выводы по главе 2.....	68

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЭФФЕКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СКИ ЭМИ НА СРЕДСТВО ШРД.....	70
3.1 Выбор и обоснование объекта исследования.....	70
3.2 Характеристики комплекса воздействия СКИ ЭМИ на средство ШРД.....	77
3.3 Анализ влияния СКИ ЭМИ при различной символьной скорости модуляции полезного сигнала.....	82
3.4 Метод, обеспечивающий эффективное воздействие СКИ ЭМИ на средства ШРД на основе выбора параметров последовательности импульсов.....	86
3.5 Алгоритм формирования последовательности импульсов СКИ ЭМИ, обеспечивающей эффективное воздействие.....	89
3.6 Оценка эффективности воздействия СКИ ЭМИ на средство ШРД.....	94
Выводы по главе 3.....	94
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ СКИ ЭМИ НА СРЕДСТВО ШРД.....	96
4.1 Разработка методики проведения экспериментальных исследований.....	96
4.2 Результаты экспериментальных исследований влияния СКИ ЭМИ на средство ШРД.....	106
4.3 Расчетная оценка степени влияния при параметрах экспериментальных исследований и сопоставление экспериментальных и расчетных результатов.....	108
4.4 Разработка рекомендаций для эффективного воздействия.....	115
Выводы по главе 4.....	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	122

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Современная тенденция увеличения объемов передаваемой информации, а так же повышение ее защищенности требует высокого уплотнения в каналах передачи различных сред, будь то оптические, проводные и эфирные. Рост сегмента рынка беспроводного доступа к глобальной сети интернет дал большой импульс для развития технологии беспроводной широкополосной передачи данных, сформировавший ветвь стандартов связи IEEE 802.11, с высокой плотностью каналов и высокими скоростями передачи информации. С применением этих стандартов строится большой спектр средств беспроводной передачи данных от средств беспроводного радиодоступа к сети до средств ретрансляции сигнала, которые используются для формирования сетей беспроводной передачи данных различного масштаба от персональной до городской.

Сложно переоценить объем присутствия средств беспроводного широкополосного радиодоступа (ШРД) на сегодняшний день, это и средства организации «последних миль» при построении телекоммуникационных каналов связи, средства организации элементов систем «умный дом», средства построения офисных беспроводных систем связи с доступом к корпоративной и глобальной сети передачи данных, и конечно же средства мобильной связи.

Высокая доля использования таких средств, а также огромные объемы передаваемой информации требуют устойчивого функционирования беспроводных сетей передачи данных в условиях воздействия различных деструктивных факторов [8, 16, 18, 21, 41, 42, 65-69], одним из которых отдельно выделяется фактор воздействия сверхкороткоимпульсных электромагнитных излучений (СКИ ЭМИ), ввиду относительной новизны и возможностей высокой эффективности воздействия.

Технология создания генераторов СКИ ЭМИ не стоит на месте и с каждым годом такие устройства приобретают новые качественные характеристики при уменьшении их габаритов. Следует отметить, что применение таких устройств не ограничено использованием в качестве мощного электромагнитного воздействия, а так же достаточно широко используется в средствах радиолокации, средствах сверхширокополосной радиосвязи, и пр.

Особое внимание к СКИ ЭМИ и его влиянию на средства ШРД обусловлено спецификой СКИ ЭМИ занимать достаточно широкий спектр, перекрывающий большую часть диапазонов, выделенных для средств ШРД, потенциальной соизмеримостью частот следования импульсов СКИ ЭМИ с частотами смены состояний модулированного сигнала, а также дискретной природой воздействующего импульса, что обуславливает высокую восприимчивость цифровых систем. При высоких энергетических характеристиках СКИ ЭМИ его влияние возможно не только на антенно- фидерную систему (АФС) устройств, но также и аппаратную часть ввиду формирования наводок в цепях обработки информации. Современные разработки генераторов СКИ ЭМИ позволяют достигать высокой частоты повторения импульсов с возможностью формирования более сложных последовательностей [55].

Следует отметить что, развитие современных средств ШРД идет по пути использования современных методов цифровых модуляций с расширением полосы частот при высокой плотностью передаваемой информации [19]. Это ведет и к росту скорости смены состояний модулированного сигнала. Сигналы, модулированные с расширением спектра, как правило, имеют более низкие амплитудные характеристики, чем узкополосные сигналы. Все это приводит к тому, что длительности импульсов СКИ ЭМИ, а также частота их следования могут быть близки к длительностям символов и их скорости в модулированном сигнале и, как следствие, будут

увеличивать вероятность искажения принимаемой информации средствами ШРД.

Это подтверждают и результаты экспериментальных исследований [1, 7, 13, 14, 40, 59], которые показали, что источники СКИ ЭМИ при сравнительно небольших напряженностях электромагнитного поля способны оказывать воздействия на средства ШРД, приводящие к нарушению целостности передаваемой информации вплоть до полной ее потери. Так на сегодняшний день несколькими научными школами, возглавляемыми российскими (Л.Н. Кечиевым, Н.В. Балюком, Ю.К. Сахаровым, Т.Р. Газизовым,) и зарубежными (W. Radasky, M. Ianoz, C. Baum, F. Sabath,) [70-72, 74-79] учеными, проведено значительное количество исследований, подтверждающих, что с помощью генераторов СКИ ЭМИ, инжектирующих тем или иным способом импульсы напряжения в физическую среду передачи информации, можно воздействовать на обмен данными по сети между оконечными пользователями [24,25]. При этом существующими средствами диагностики факт такого воздействия может не определяться, так как сетевое соединение при этом не разрушается. При этом важной особенностью данного воздействия является не физическое разрушение элементной базы радиоприемных устройств как при воздействии узкополосным сигналом высокой мощности, а искажение принимаемой информации.

В то же время существующие системы защиты беспроводных каналов связи в условиях воздействия в основном заключаются в смене типа модуляции [49, 52], снижения скорости передаваемой информации. Вопросы воздействия СКИ ЭМИ на средства ШРД мало исследованы и нет достоверной информации по механизму воздействия СКИ ЭМИ на широкополосные средства радиосвязи.

Повсеместное использование широкополосных систем беспроводной передачи данных, как бытового, так и специального назначения ставит актуальным вопрос об оценке воздействия

последовательности СКИ ЭМИ на такие системы связи, а также вопрос об оценке такого воздействия. Под реакцией на воздействие в данной работе будут рассмотрены такие влияния, при которых не будут наблюдаться необратимые изменения в аппаратной части за счет поражения элементной базы, а критерием отказа будем считать временные сбои и блокирование работы. В этом случае напряженности воздействующих полей будут сравнительно малы и управление эффективностью воздействия СКИ ЭМИ можно осуществлять путем изменения временных параметров следования импульсов.

Анализ устойчивости систем ШРД к СКИ ЭМИ показал [44, 45, 46], что эти системы более подвержены такому воздействию, чем системы узкополосной радиосвязи и будут рассмотрены в данной работе, в качестве объекта исследования. Для оценки эффективности влияния СКИ ЭМИ на ШРД необходимо проведение комплекса исследований, в том числе исследование влияния временных характеристик СКИ ЭМИ на устойчивость функционирования исследуемых устройств.

Выбор СКИ ЭМИ как средства воздействия на средства широкополосной радиосвязи имеет большой потенциал, так как СКИ ЭМИ формирует в пространстве помеху со спектром, перекрывающим спектр сигнала широкополосных средств радиосвязи. При учете особенностей часто используемого метода модуляции OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) с несколькими рядом расположенными поднесущими частотами, СКИ ЭМИ может оказывать одновременное влияние на несколько несущих частот промодулированных одним сигналом по специальному алгоритму. Анализ алгоритма модуляции исходной битовой последовательности с учетом несущих частот позволяет сформулировать критерии формирования последовательности импульсов СКИ ЭМИ для более эффективного воздействия.

В настоящее время отсутствуют данные по реакциям широкополосных средств беспроводной радиосвязи на воздействие СКИ ЭМИ с амплитудами, не приводящими к наведению токов в аппаратной части атакуемых устройств, поражающих элементную базу. В связи с этим особенно актуальным является проведение экспериментальных исследований воздействия СКИ ЭМИ на широкополосные средства беспроводной радиосвязи для выявления возможности повышения эффективности такого воздействия без увеличения амплитудных характеристик воздействующего поля путем выявления зависимости снижения устойчивого функционирования исследуемых устройств от изменения временных параметров воздействующего СКИ ЭМИ.

Таким образом, актуальность поставленной задачи определяется:

- недостаточной теоретической и экспериментальной изученностью механизма влияния СКИ ЭМИ с малой напряженностью электрического поля на средства широкополосного радиодоступа;

- отсутствием других способов повышения эффективности воздействия СКИ ЭМИ, кроме увеличения амплитуды и изменения частоты следования импульсов;

- отсутствием данных по влиянию временных параметров последовательности СКИ ЭМИ на результаты воздействия, с выявлением взаимосвязи этих характеристик с параметрами исследуемых устройств;

- отсутствием данных и методик по оценке минимальной напряженности электрического поля для потенциального влияния СКИ ЭМИ на средства широкополосного радиодоступа;

- отсутствием методов повышения эффективности воздействия СКИ ЭМИ за счет изменения параметров последовательности импульсов.

Это определило важность и практическую значимость решаемой в диссертации научно-технической задачи направленной на анализ влияния последовательности сверхкоротких электромагнитных импульсов на широкополосные средства беспроводной передачи данных и определения критериев максимальной эффективности воздействия СКИ ЭМИ.

Объектами исследования в работе выбраны типовые средства ШРД.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности воздействия СКИ ЭМИ на средства ШРД путем разработки метода оценки помехоустойчивости средств широкополосного радиодоступа к воздействию СКИ ЭМИ на основе анализа механизма влияния временных параметров последовательности СКИ ЭМИ на устойчивое функционирование ШРД.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Анализ состояния проблемы обеспечения устойчивого функционирования средств ШРД в условиях воздействия преднамеренных импульсных электромагнитных излучений.

2. Анализ современных средств ШРД, как объектов подверженных воздействию СКИ ЭМИ, и применяемых в них видов модуляции сигнала.

3. Анализ основных видов источников СКИ ЭМИ и параметров генерируемого излучения.

4. Определение механизма влияния СКИ ЭМИ на средства ШРД.

5. Разработка алгоритма управления многоканальным источником излучения для формирования последовательности импульсов СКИ ЭМИ, обеспечивающей эффективное воздействие на средства ШРД.

6. Разработка метода формирования последовательности импульсов СКИ ЭМИ обеспечивающей эффективное воздействие на средства ШРД.

7. Разработка критериев эффективности воздействия СКИ ЭМИ на средства ШРД.

8. Разработка методики экспериментальных исследований воздействия последовательности импульсов СКИ ЭМИ для анализа изменений потока обмена данными, происходящих между средствами ШРД при воздействии СКИ ЭМИ.

9. Разработка рекомендаций для повышения эффективности воздействия СКИ ЭМИ на средства ШРД.

Реализация результатов данной работы позволит:

- повысить показатели эффективности воздействия СКИ ЭМИ на средства широкополосной радиосвязи;

- развивать новейшие методы воздействия полем СКИ ЭМИ путем универсализации воздействующей последовательности;

- производить оценку и управлять уязвимостью средств широкополосной радиосвязи СКИ ЭМИ при известных параметрах воздействующего поля;

- разрабатывать рекомендации для повышения устойчивости перспективных средств ШРД к воздействию СКИ ЭМИ.

Результаты исследований планируется использовать при разработках новых эффективных средств воздействия СКИ ЭМИ на средства широкополосной радиосвязи, а также при создании перспективных широкополосных средств радиодоступа устойчивых к воздействию СКИ ЭМИ.

Методы исследований

Решение поставленных в диссертации задач выполнено на основе теории системного анализа, теории электромагнетизма, теории цепей и методов экспериментальных исследований, информационного и компьютерного моделирования с использованием новых

информационных технологий получения знаний об объекте исследования.

Положения, выносимые на защиту:

– Метод оценки помехоустойчивости средств ШРД к воздействию СКИ ЭМИ, реализуется через отношение плотностей энергий с учетом вида воздействующей последовательности, а так же мощностных, спектральных и временных характеристик СКИ ЭМИ.

– Эффективность воздействия СКИ ЭМИ обеспечивается за счет формирования последовательности пакетов импульсов с частотой следования не меньшей символьной скорости модуляции и с интервалом между импульсами в пакете соизмеримым с периодом несущей частоты.

– Алгоритм управления многоканальным источником СКИ ЭМИ должен обеспечивать формирование пакетов импульсов и расширение диапазона частоты следования импульсов СКИ на основе адресного использования ресурсов комплекса с формированием матрицы задержек.

– Методика экспериментальных исследований воздействия последовательности импульсов СКИ ЭМИ на средства связи предусматривает исследования влияния пакетов импульсов СКИ ЭМИ и влияния импульсов следующих с определенной частотой повторения.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ШРД В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

1.1 Построение телекоммуникационных систем с использованием широкополосных беспроводных технологий

В настоящее время имеют большое распространение средства ШРД, использующиеся во многих сферах, специальных, бытовых хозяйственных и прочее. Могут быть организованы различные топологии связи элементов, каждый элемент системы может выполнять различные функции от оконечного устройства, генерирующего и/или обрабатывающего данные, до устройств обеспечивающих определенные алгоритмы маршрутизации.

Архитектура построения телекоммуникационных систем с использованием беспроводных технологий регламентируется несколькими ветвями семейства стандартов IEEE 802 [85]. Указанные стандарты подразумевает разделение на персональные, локальные, и мобильные беспроводные сети и будут рассмотрены в разрезе низшего седьмого уровня модели OSI.

Особая актуальность поставленной в работе задачи в современных условиях развития телекоммуникационных систем с использованием беспроводных технологий на средства ШРД вызвана широким применением различных средств воздействия для нарушения их устойчивой работы, в частности в условиях воздействия СКИ ЭМИ [2, 9, 12].

1.1.1 Беспроводные персональные сети

Беспроводные персональные сети WPAN (Wireless Personal Area Network) регламентируются стандартом IEEE 802.15 и включают в

себя известные подстандарты Bluetooth, ZigBee, и прочие. В Bluetooth применяется модуляция с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) (англ. - Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS). Модуляция FHSS проста в реализации, обеспечивает устойчивость к широкополосным помехам, а оборудование недорогое. Согласно алгоритму FHSS, в Bluetooth несущая частота сигнала скачкообразно меняется 1600 раз в секунду. Рабочих частот несколько. Последовательность переключения между этими частотами для каждого соединения псевдо случайна и известна только приемнику и передатчику, которые синхронно перестраиваются каждые 625 мкс. Bluetooth обеспечивает связь на расстояниях до 100 метров при мощности передатчика 100 мВт и скоростях несколько Мбит/с. В сети стандартов PAN так же входят низкоскоростные подстандарты связи, наиболее известным из которых является ZigBee. Здесь максимальная дальность связи ограничивается расстоянием 10 м и скоростью порядка 250 кбит/с при очень низком энергопотреблении, что дает возможность использования таких средств от автономных источников питания длительное время (несколько лет) без замены элементов питания. В таких системах используются стандарты широкополосной модуляции с прямым расширением спектра псевдослучайной последовательностью, (Direct sequence spread spectrum - DSSS), либо двоичная или квадратурная фазовая манипуляция (binary phase-shift keying - BPSK, quadrature phase shift keying - QPSK). Следует отметить, что в указанной беспроводной сети низкоскоростной передачи данных, каждый беспроводной элемент может выполнять различные функции в сети которая может иметь различную топологию и может применяться в построении гибридных сильномасштабируемых географически разнесенных сетей с минимальной инфраструктурой и

миллионами конечных узлов. Персональные беспроводные сети отличаются сравнительно низкими скоростями передачи данных (за исключением новейших разработок сверхширокополосной радиосвязи на высоких несущих частотах), низким энергопотреблением, и малым расстоянием действия, могут использоваться как средство сбора параметрических данных с датчиков, в системах «Умный дом», в системах сбора данных с датчиков в/на живом организме, системах обеспечения беспроводной межблочной связи различных устройств.

1.1.2 Беспроводные локальные сети

Беспроводные локальные сети передачи данных (Wireless Local Area Network - WLAN) с известным названием Wi-Fi регламентируются набором стандартов IEEE 802.11 и используются для построения компьютерных сетей аналогично построения локальных сетей передачи данных (LAN) с использованием с использованием проводных технологий (кабель UTP - витая пара). Устройства WLAN по сравнению с WPAN имеют другие границы масштабируемости, более высокие скорости передачи информации. Увеличение скорости требует применения модуляций с высоким уплотнением. Наиболее распространенной модуляцией сигнала в указанном стандарте является мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM), основной особенностью которой является одновременная модуляция близко расположенных поднесущих и как следствие, со скоростью модуляции поднесущих обратно пропорциональной их количеству. Также могут применяться модуляции DSSS и FHSS. Стандартом предусмотрено 11-14 каналов. На каждом канале полоса сигнала составляет 22 МГц. Несущая частота порядка 2.4 ГГц. Радиус действия таких систем при этом может достигать порядка 250 метров.

1.1.3 Беспроводные городские сети

Беспроводные городские сети передачи данных (Wireless Metropolitan Area Network - WMAN) регламентируются стандартом IEEE 802.16 и широко известны как WiMax сети. Расстояния между устройствами может быть порядка нескольких километров, адаптированные модуляции для обслуживания большого количества пользователей, со специальными алгоритмами обслуживания мобильных пользователей. Мощность передатчика порядка нескольких ватт.

1.1.4 Виды модуляций в беспроводных сетях передачи данных

Рассматривая перечисленные ветви стандартов IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16 можно выделить три основных типа используемых модуляций FHSS, DSSS, OFDM, при этом эти модуляции можно отнести к методу цифровой обработки сигналов перед модуляцией/демодуляцией на несущие частоты. Как известно, при модуляции DSSS происходит обработка псевдослучайной последовательности, при которой один бит полезной информации передается несколькими битами псевдослучайной последовательности (чиповой последовательности). При модуляции OFDM происходит мультиплексирование потока данных по нескольким рядом расположенным несущим частотам, создавая условия для модулирования нескольких несущих с более низкими скоростями смены состояний модулированной несущей частоты. При модуляции FHSS, по псевдо случайному закону происходит смена несущих частот. Перечисленные методы модуляций расширяют спектр сигнала, к примеру, при модуляции DSSS спектр расширяется в то же количество раз, в которое увеличивается количество чиповых бит для передачи одного бита полезной информации, при этом

приблизительно в это же количество раз будет снижена амплитуда модулированного сигнала. Перечисленные методы позволяют повысить защищенность передаваемой информации, т.к. законы псевдослучайного закона известны только взаимодействующим устройствам, и не оказывают влияния на устройства с другими псевдослучайными законами. При модуляции OFDM многопользовательская совместимость обеспечивается за счет разделения по каналам, а так же применения методов адаптивной модуляции с гибким изменением параметров модуляции, в том числе символьной скорости. На рис. 1.1 изображено условное разделение типов модуляций на нижний и верхний уровни.

Под модуляциями нижнего уровня будем понимать методы наложения битовой цифровой последовательности на каждую несущую частоту, а модуляциями верхнего уровня методы обработки исходного цифрового сигнала для формирования задающих битовых последовательностей для модуляции каждой из несущих частот. В качестве модуляций нижнего уровня в стандартах IEEE802.11, IEEE802.15, IEEE802.16 часто применяются модуляции BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, верхнего уровня DSSS, OFDM. Модуляция верхнего уровня заключается в оперировании поднесущими частотами и/или временными характеристиками сигналов, которые будут промодулированы на нижнем уровне, а так же их временными характеристиками.

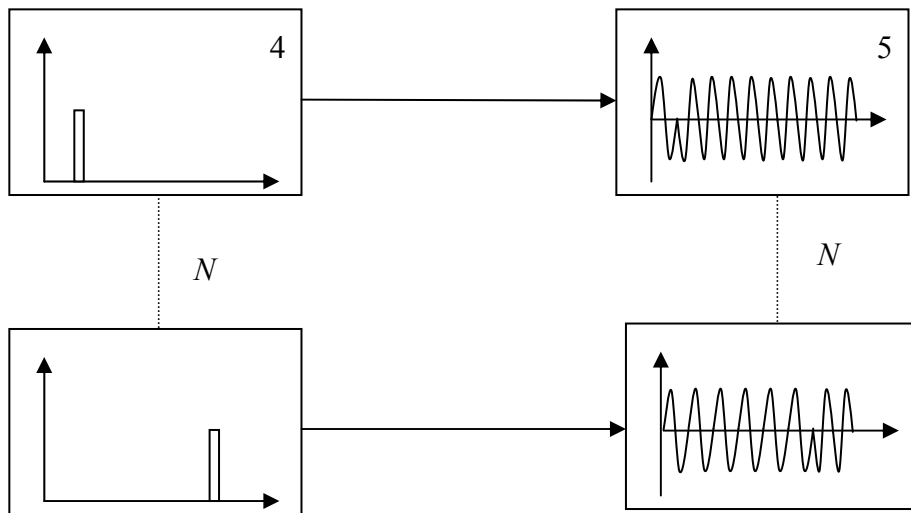
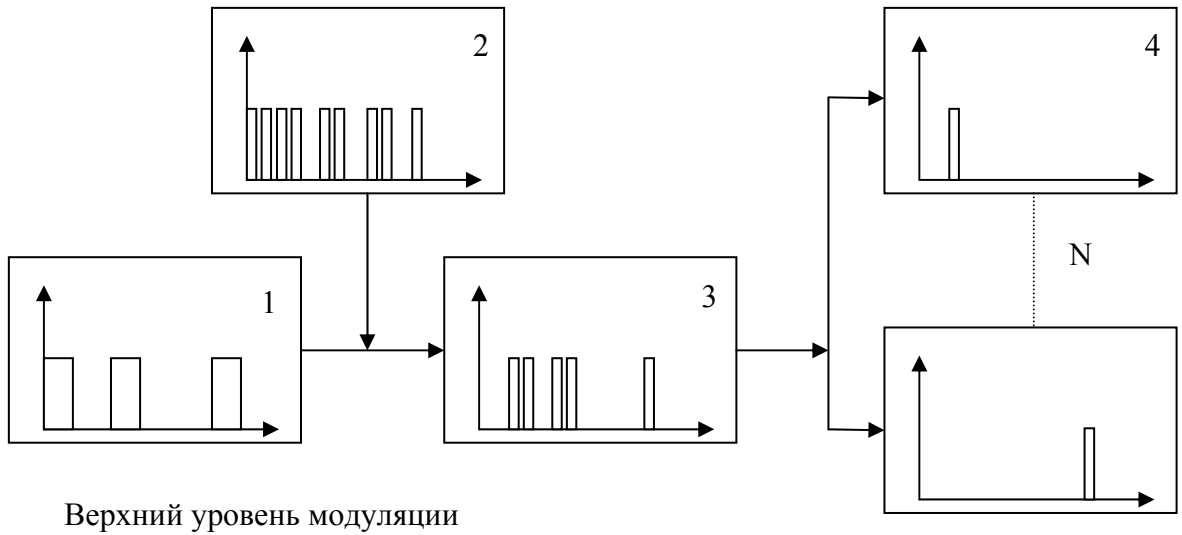


Рис. 1.1. Уровни модуляций

1- исходная информационная последовательность, 2- кодирующая последовательность, 3 - результирующая последовательность, 4 – N параллельных последовательностей с пониженной скоростью, 5 – N – модулированных несущих частот.

1.2 Сравнительный анализ уязвимостей различных систем радиосвязи при воздействии СКИ ЭМИ

1.2.1 Классификация сигналов радиосвязи

Условно сигналы радиосвязи можно разделить на три группы: узкополосные, широкополосные, сверхширокополосные - соответственно занимаемой сигналом полосы спектра.

В разное время существовали разные критерии спектральных границ для отнесения сигнала к тому или иному виду. Разделения на широкополосный и сверхширокополосный сигнал не было. Например, одно из первых критериев опубликовано в ГОСТ 24375-80. Введено определение базы сигнала B - это произведение активной ширины спектра F на длительность T . Это произведение называется базой сигнала B . Для узкополосного сигнала $B = FT \sim 1$, Для ШП сигнала $B = FT \gg 1$.

По другим критериям сигнал оценивали как отношение ширины спектра сигнала к центральной частоте. Так к широкополосным радиосигналам относятся радиосигналы ширина спектра которых сравнима с центральной частотой. Иногда используется коэффициент $1/10$. т.е. если ширина спектра составляет около $1/10$ от частоты, на которой передается сигнал, то сигнал считается широкополосным.

В 1990 г. Комиссией Управления перспективных военных НИОКР Министерства обороны США (DARPA) была определена классификация, согласно следующего расчета:

$$\Delta F = \frac{f_v - f_n}{f_v + f_n}$$

где f_v и f_n — верхняя и нижняя границы полосы частот. Системы или сигналы, имеющие ΔF менее 0,01 (меньше 1%), относятся к узкополосным; имеющие ΔF от 0,01 до 0,25 (от 1% до 25%) относятся к широкополосным, а имеющие ΔF от 0,25 до 1 (от 25%

до 100%) относятся к сверхширокополосным. Это определение широко используется на сегодняшний день. Следует отметить, что иногда в литературе применяется определение относительной полосы частот сигнала $\Delta f_0 = f_v/f_n$. Эта величина связана с ΔF выражением: $\Delta f_0 = (1 + \Delta F) / (1 - \Delta F)$.

Федеральная комиссия связи США (FCC) приняла нормативный документ (с дополнением в 2004 году), согласно которому к сверхширокополосным сигналам отнесены системы и сигналы, обладающие хотя бы одним из следующих свойств:

- ширина спектра излучаемых сигналов $f_v - f_n$ (где f_v и f_n определяются по уровню 10 дБ относительно максимального значения спектра) не менее 500 МГц;
- отношение ширины спектра $f_v - f_n$ (по уровню -10 дБ) к средней частоте спектра $(f_v + f_n) \div 2$ (относительная полоса частот) не менее 0,2.

В стандарте международной электротехнической комиссии (МЭК) МЭК 61000-2-13 для классификации сигналов вводится процентная ширина спектра (percent bandwidth):

$$pbw = 2 \frac{f_v - f_n}{f_v + f_n},$$

при этом согласно ГОСТ Р 51317.1.5-2009 (МЭК 61000-1-5:2004) сверхширокополосный сигнал характеризуется значением ширины полосы частот в процентах pbw от 163,4 % до 200 % или значением отношения полосы частот более 10.

1.2.2 Узкополосные, широкополосные, сверхширокополосные системы радиосвязи связи

К узкополосным системам радиосвязи можно отнести самые распространенные до недавнего времени радиостанции с частотной, амплитудной модуляцией, как вещательные, так и портативные

средства связи. Пик энергии таких средств, в основном, сконцентрирован на несущей частоте с крутыми спадами на спектре.

Повышение базы в широкополосном сигнале достигается путем дополнительной модуляции (или манипуляции) по частоте или фазе на времени длительности сигнала. В результате, спектр сигнала F (при сохранении его длительности T) существенно расширяется.

В системах широкополосной связи ширина спектра излучаемого сигнала F всегда много больше ширины спектра информационного сообщения.

ШП сигналы получили применение в широкополосных системах связи, так как:

- позволяют в полной мере реализовать преимущества оптимальных методов обработки сигналов;
- обеспечивают высокую помехоустойчивость связи;
- позволяют успешно бороться с многолучевым распространением радиоволн путем разделения лучей;
- допускают одновременную работу многих абонентов в общей полосе частот;
- позволяют создавать системы связи с повышенной скрытностью;
- обеспечивают электромагнитную совместимость (ЭМС) ШП сигналов связи с узкополосными системами радиосвязи и радиовещания, системами телевизионного вещания;
- обеспечивают лучшее использование спектра частот на ограниченной территории по сравнению с узкополосными системами связи.

На сегодняшний день большое распространение получили различные средства широкополосной связи (Wi-Fi, WiMax, CDMA, ZigBee и пр.), преимущественно работающих в диапазонах частот от

300 МГц до 3 ГГц. К основным преимуществам можно отнести высокую пропускную способность каналов связи порядка 100Мбит/с, высокую проникающую способность радиоволн указанного диапазона. Данные стандарты связи повсеместно используются в мобильных и портативных устройствах доступа к сетям передачи данных в различного вида ретрансляторах, оборудовании организации каналов связи для сравнительно небольших расстояний порядка 20 км. Основным преимуществом данного вида связи является возможность организации каналов с большей пропускной способностью и высокой помехоустойчивостью.

В обычных узкополосных системах границы полосы определяются частотами, на которых мощность сигнала становится вдвое (на 3 дБ) ниже, чем в центре спектра, где обычно располагается несущая частота. Данное определение удобно для систем, поскольку их спектр обычно симметричен относительно несущей частоты и область спектра между точками, где мощность сигнала на 3 дБ ниже, чем на несущей частоте, содержит не менее 90% всей энергии сигнала.

Сверхширокополосный сигнал представляет собой короткий импульс без высокочастотного заполнения или короткий отрезок периодического колебания, состоящий из одного — полутора — двух, максимум четырех периодов. Поэтому у сверхширокополосных сигналов, как правило, отсутствует понятие несущей частоты. Кроме того, спектр сверхширокополосных сигналов обычно не является симметричным. Фактически, во многих случаях большая часть энергии находится ниже частоты, которую можно было бы назвать центральной.

Сверхширокополосная связь - беспроводная технология связи, которая фундаментально отличается от всех других радиочастотных

коммуникационных систем. Уникальность состоит в том, что она обеспечивает беспроводные коммуникации без использования радиочастотной несущей. Вместо этого она использует модулированные импульсы энергии длительностью менее одной наносекунды. Помимо специфической природы мощность сигнала практически на уровне шума, что обеспечивает защиту передаваемой информации — сигналы практически невозможно принимать нецелевой системой, особенно, на некотором удалении от функционирующего устройства. Этот факт делает сверхширокополосную связь, возможно, наиболее безопасной из всех беспроводных систем связи с точки зрения защиты от несанкционированного доступа к информации.

В 2001 году NTIA продемонстрировала потенциальное влияние определённых классов сверхширокополосного (СШП) потребительского оборудования связи, излучающих радиочастотный сигнал в соответствии с FCC Part 15, со значительным снижением характеристик большинства правительственных и военных систем связи и радиолокационного оборудования (работающих на частотах ниже 3,1 ГГц). Именно это стало одним из главных факторов, повлиявших на длительное «торможение» в лицензировании и, как следствие, появление в мире реально функционирующих потребительских СШП устройств [31].

1.2.3 Особенности воздействия сверхкороткого электромагнитного импульса на системы радиосвязи

Основной особенностью воздействия сверхкороткого электромагнитного импульса является то, что сформированный импульсом спектр перекрывает спектр широкополосного сигнала и сравним со спектром СШП сигнала.

В стандарте МЭК 61000-2-13 рассматриваются мощные электромагнитные воздействия (НРЕМ – High power electromagnetic). Более определенно: к НРЕМ относятся электромагнитные излучения искусственного происхождения с пиковым электрическим полем с напряженностью 100 В/м в частотном диапазоне от сотен мегагерц до нескольких гигагерц. Выбор такого частотного диапазона связан с тем, что достаточно интенсивные сигналы в диапазоне от 200 МГц до 5 ГГц вызывают повреждения во многих системах [26, 53]. Данный стандарт рассматривает СШП электромагнитный импульс как часть НРЕМ, куда входят также и другие виды воздействий в том же частотном диапазоне, например, узкополосные излучения (НРМ – High power microwave).

Таким образом, согласно стандарту МЭК 61000-2-13 под СШП электромагнитным импульсом понимаются импульсные электромагнитные поля искусственного неядерного происхождения с параметрами: $rbw > 25 \%$; амплитуда электрического поля – 100 В/м и более; частотный диапазон от сотен МГц до нескольких ГГц.

1.2.4 Оценка потенциального влияния сверхкороткого электромагнитного импульса на системы радиосвязи

Исходя из специфики сверхкороткого электромагнитного импульса, для оценки потенциального влияния необходим подход, анализирующий перекрытие областей спектра воздействующего импульса и спектра сигнала в точке приема. Потенциально влияние может быть оказано при перекрытии большей площади спектра полезного сигнала. На рис. 1.2 условно изображены спектр сверхширокополосного, широкополосного, узкополосного сигналов связи и сверхкороткого электромагнитного импульса [51]

Сверхкороткий электромагнитный импульс, ввиду своей широкополосности и относительно постоянной спектральной

плотности мощности, может оказывать различное влияние на разные системы связи при одних и тех же энергетических характеристиках. С учетом сопоставления спектров можно сделать вывод о следующих степенях влияния сверхкороткого электромагнитного импульса на средства связи, в порядке убывания:

1. Сверхширокополосные средства связи.
2. Широкополосные средства связи.
3. Узкополосные средства связи.

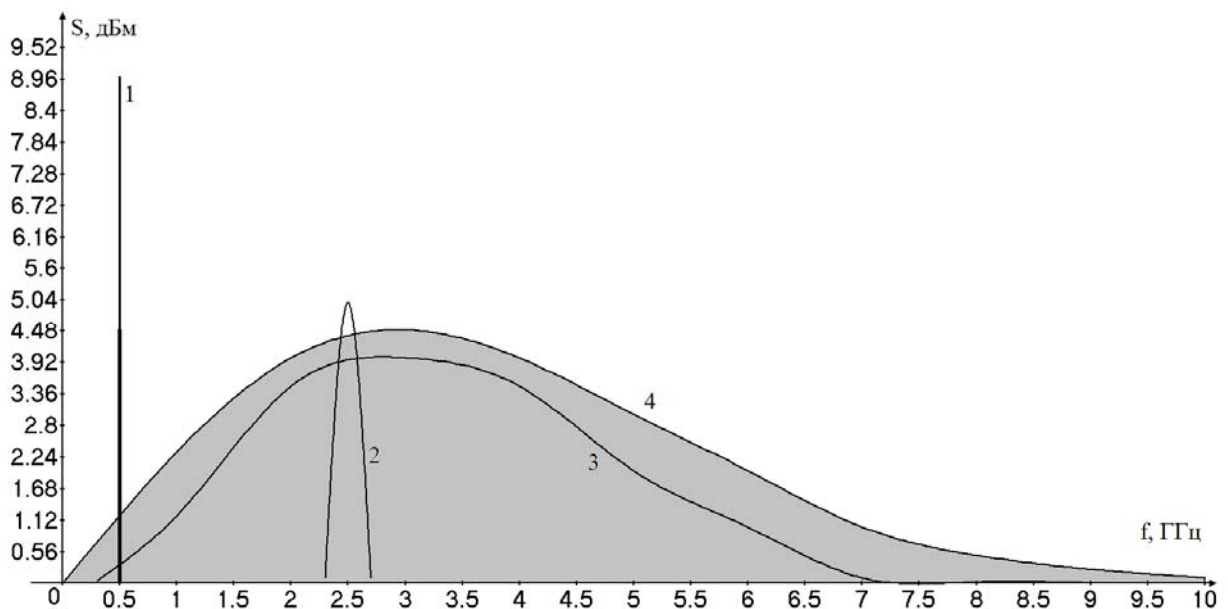


Рис. 1.2. – Условные спектры сигналов: 1 - узкополосная связь, 2 - широкополосная связь, 3 – сверхширокополосная связь, 4 – сверхкороткий электромагнитный импульс.

Принимая во внимание дискретный характер последовательности сверхкоротких электромагнитных импульсов, потенциальная степень влияния на цифровые средства связи выше чем на аналоговые, при этом необходимо учитывать кроме степени спектрального перекрытия перекрытие во временном интервале.

Дело в том, что при частоте следования импульсов широкополосной помехи ниже, чем символьная последовательность модулированного сигнала, оказываемое влияние будет ниже, чем при соизмеримой или более высокой частоте следования импульсов широкополосной помехи. Это обусловлено интегрированными возможностями большинства средств связи сохранять канал передачи информации с возможностью повторной отправки поврежденных пакетов информации, при прохождении минимального процента неповрежденных пакетов.

Что касается влияния на аппаратную часть рассматриваемых средств радиосвязи, то здесь необходимо руководствоваться общеизвестными правилами оценок качества экранирования, заземления. Расчет уровней наводок не зависит от типа системы радиосвязи. Различие во влиянии может зависеть только от качества экранирования и внутренних тактовых частот систем обработки информации.

Путем оценки степени перекрытия спектров и временных интервалов следования полезного и мешающего сигнала можно сделать приблизительную оценку влияния. Необходимо учитывать, что немаловажную роль может сыграть способ модуляции и обработки информации при ее передаче по каналу радиосвязи, который может исключить полную потерю связи при искажении и уничтожении части передаваемых пакетов. Следует так же отметить высокий потенциал устойчивости сверхширокополосных каналов связи к воздействию сверхкороткого электромагнитного импульса при правильно организованном способе модуляции и обработки передаваемой информации.

1.3 Обзор технических средств электромагнитного воздействия

1.3.1 Средства силового воздействия

Средства электромагнитного воздействия используются для преднамеренного ухудшения характеристик радиоэлектронных устройств, вплоть до полного их выхода из строя, путем воздействия на элементы этих устройств электромагнитным полем. Средства электромагнитного воздействия можно условно разделить на силовые (электромагнитные воздействия большой мощности) и интеллектуальные.

Согласно ГОСТ Р 51317.1.5-2009 электромагнитные воздействия большой мощности (high power electromagnetics, НРЕМ): Общий термин, характеризующий область деятельности или технологию, связанную с созданием интенсивных электромагнитных полей или кондуктивных напряжений и токов, способных повредить электронные системы или нарушить их функционирование. В общем случае уровни электромагнитных воздействий большой мощности превышают уровни электромагнитных помех, действующих на системы при обычных условиях эксплуатации (например, превышают 100 В/м или 100 В). При таком воздействии основным эффектом становятся значительные наводки в цепях устройств приводящие к их физическому выходу из строя, вследствие поражения элементной базы. В отдельных случаях напряженности электромагнитного поля может не хватить для поражения элементной базы, но атакуемое устройство в период воздействия может значительно ухудшить свои рабочие характеристики вплоть до блокирования работы, но после снятия воздействующего поля полностью восстановить работу, возможно при помощи оператора [4, 5, 29, 38]. Силовые средства электромагнитного воздействия можно разделить на средства

узкополосного воздействия и средства широкополосного (сверхширокополосного) воздействия.

1.3.2 Средства силового узкополосного воздействия

Средства узкополосного воздействия генерируют и излучают в пространство электромагнитные колебания определенной частоты с высокой напряженностью электромагнитного поля. Использование узкой полосы делает воздействие наиболее энергоэффективным. Подбор частоты воздействия происходит исходя из оценки экранирования объектов воздействия, их топологии, размеров внутренних проводящих линий (сигнальных, приемных трактов, питания и пр.) с целью формирования на них максимальных наводимых токов и напряжений. Такое воздействие приводит к превышению регламентируемых токов и напряжений в радиоэлектронных устройствах, что может привести к сбоям, искажению передаваемой и обрабатываемой информации, а также при более высоких напряженностях может привести к физическому выходу из строя радиоэлектронных устройств из-за поражения их элементной базы [22, 28, 50, 57, 68].

1.3.3 Средства силового широкополосного воздействия

Средства широкополосного (сверхширокополосного) воздействия генерируют одиночные либо последовательности сверхкоротких электромагнитных импульсов, порождающие в пространстве сверхширокополосные помехи со спектром от сотен МГц до единиц ГГц. Порождение такого спектра происходит на основе сверхширокополосного переходного процесса, которым является сверхкороткий электромагнитный импульс с длительностью фронта порядка сотен пикосекунд [62-64]. Энергия такого излучения не сконцентрирована на одной частоте, а распределена по всему спектру. Энергоэффективность такого излучения исходя из понятия

спектральной плотности энергии ниже, чем у узкополосного излучения, но учитывая одновременную генерацию в широкой полосе спектра можно говорить о высокой эффективности влияния за счет возможности проникновения помехи и, следовательно, наведения напряжения и токов, через уязвимости в фильтрах, экранировании. На рис. 1.3 изображена форма сверхкороткого электромагнитного импульса.

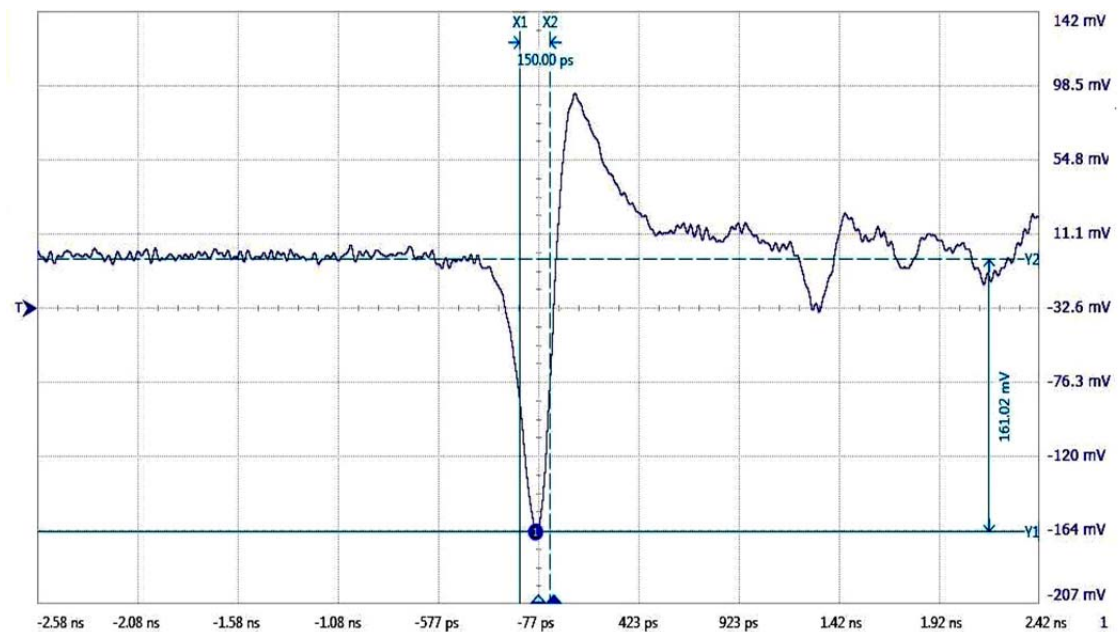


Рис. 1.3. Типовая форма сверхкороткого электромагнитного импульса.

От крутизны фронта (переходного процесса) зависит ширина генерируемого спектра, чем короче длительность фронта, тем шире спектр. Так при СКИ ЭМИ с длительностью фронта 150 пс ширина спектра будет от единиц МГц до единиц ГГц. Следует отметить, что как при воздействии узкополосным сигналом так и последовательностью сверхкоротких электромагнитных импульсов возможно формировать сигналы различной продолжительности и повторяемости.

В настоящее время в разных странах создано большое количество излучателей

СКИ ЭМИ, амплитудно-временные характеристики которых варьируются в широком диапазоне. При решении ряда задач по оценке стойкости технических средств (ТС) к их воздействию оказалось удобным использовать типовую форму СКИ ЭМИ, показанную на рис. 1.3

При узкополосном, широкополосном (сверхширокополосном) силовом воздействии, также следует отметить характер возникновения сбоев в радиоэлектронной аппаратуре и аппаратуре обработки данных. При сравнительно малых напряженностях воздействующего поля, которой не хватает для поражения элементной базы, но достаточной для наведения токов и напряжений в цепях управления и обработки информации, соизмеримых с регламентными уровнями устройств, могут возникать ложные срабатывания, ложные биты при обработке информации. Для такого воздействия без поражения аппаратной части, частоту воздействующего узкополосного электромагнитного поля следует выбирать исходя из анализа скорости обработки информации атакуемых устройств (скорости опроса состояний сопряженных блоков). При соизмеримой частоте воздействующего поля и частоте обработки информации атакуемого устройства вероятность сбоев увеличивается.

1.3.4 Средства интеллектуального электромагнитного воздействия

Системы интеллектуального электромагнитного воздействия основной своей целью ставят влияние на АФС, без упора на силовое воздействие на аппаратные части этих устройств. Средство воздействия генерирует сигналы с несущей частотой, модуляцией, кодированием, которые аналогичны полезному сигналу. При этом

сгенерированный сигнал может быть, как имитирующим полезный, но с иным содержанием, так и помехопостановочным значительно снижающим пропускную способность канала радиосвязи вплоть до его блокирования. Важной частью таких средств является устройство перехвата и анализа полезного сигнала. Следует отметить, что такие средства эффективны только при известных анализатору кодировках и алгоритмах модуляции, а учитывая широкое распространение на сегодняшний день новейших защищенных алгоритмов кодирования сигнала имитация определенной информации будет крайне затруднительна.

1.3.5 Особенности построения генераторов СКИ ЭМИ

Ниже приведены особенности построения средств генерации СКИ ЭМИ как основного исследуемого в данной работе способа воздействия. Новый тип мощного электромагнитного воздействия сверхкоротким электромагнитным импульсом появился в 90-х годах. Форма этих импульсов близка к униполярной или двуполярной. Подобных излучателей было разработано достаточно много, как в России, так и за рубежом. Существует несколько вариантов антенн для излучения СКИ ЭМИ. Для всенаправленного излучения могут применяться излучатели по типу конического/биконического вибратора. Длительность излучаемого ЭМИ равна при этом времени распространения сигнала вдоль вибратора ℓ/c , где ℓ – длина образующей конуса, c – скорость света. Через время ℓ/c возбуждающий ток отражается от конца вибратора с обратным знаком, и начинает излучаться сигнал обратного знака [58]. Таким образом, для излучателя СКИ ЭМИ с подобной антенной достаточно выбрать генератор с необходимым фронтом и установить необходимое значение параметра ℓ . При длительности СКИ 300 пс длина ℓ составит всего 9 см. Очевидно, что излучатель этого типа

целесообразен только для задач, требующих всенаправленного излучения СКИ ЭМИ. Для формирования направленного излучения СКИ ЭМИ такой тип антенны не пригоден из-за нерационального расхода излучаемой энергии.

Если в такой биконической антенне вырезать из 360° азимутальный сектор с угловой шириной в несколько десятков градусов, то мы получаем ТЕМ рупор. Очевидно, что при увеличении числа рупоров и, соответственно, площади решетки диаграмма направленности антенны (ДНА) сужается, одновременно с приблизительно арифметическим сложением напряженностей индуцированного электромагнитного поля от каждого ТЕМ рупора. Ширину диаграммы направленности при этом целесообразно выбирать в пределах 20° – 30° .

Еще один тип антенны, реально используемой в СШП излучателях - антенна с параболическим рефлектором. Впервые антенну с параболическим рефлектором для излучения сверхширокополосных ЭМИ предложил К.Баум в 1989 году. На ее основе была сделана Impulse Radiating Antenna – IRA. Возбуждение антенны осуществляется с помощью двух скрещенных ТЕМ рупоров или, в более высоковольтном варианте, двух скрещенных биконусов. В обоих случаях входное сопротивление облучающей антенны составляет 200 Ом. Точка возбуждения антенны совпадает с фокусом параболического зеркала. При этом условии сферическая волна возбуждающей антенны, отражаясь от поверхности зеркала, преобразуется в плоский фронт в раскрыве зеркала.

Излучатель с параболическим рефлектором обладает низкой эффективностью использования энергии генератора. Во-первых, часть энергии отраженной волны рассеивается на облучателе. Во-вторых, при ступенчатом переходе генератор-возбудитель от 50 до 200 Ом

отражается около 30% энергии генератора. И, наконец, основная потеря энергии (около 50%) происходит за счет излучения возбудителя в сторону, противоположную зеркалу.

Преимуществом антенны с рефлектором по сравнению с решеткой из ТЕМ рупоров является простота конструкции, а также возможность получить более узконаправленный сигнал СКИ ЭМП за счет более плоского фронта импульса поля в раскрытии антенны.

Что касается генераторов, возбуждающих антенны излучателей СКИ ЭМП, то в настоящее время используются генераторы двух типов – полупроводниковые и искровые с масляной и газовой изоляцией. Результаты зарубежных работ, а опыт разработки ВНИИОФИ мощных однократных масляных искровых генераторов нано- и субнаносекундного диапазона с выводом сигнала на антенное устройство (имитаторы ЭМИ «Репер-Р» 1978г. и «Актив» 1992г.) позволили Всероссийскому НИИ оптико-физических измерений приступить в 1996г. к разработке серии частотных излучателей СШП ЭМИ на основе масляных искровых проточных разрядников [62, 63]. Основные трудности масляных искровых генераторов – разложение масла и эрозия электродов. Преимущества – компактность и идеальное охлаждение электродов, что позволяет реализовать передвижные и непрерывно работающие излучатели.

Для достижения тех же результатов по фронту и амплитуде сигнала газовые искровые генераторы должны работать при давлении газа до 100 атм. Преимущества – отсутствие эрозии электродов и деградации изоляционной среды (при использовании водорода). Недостатки – отсутствие эффективного теплосъема и массивность конструкции.

Очевидно, что синхронизация искровых генераторов с точностью порядка 10^{-11} с, необходимой для суммирования

напряженностей излучателей СКИ ЭМИ, невозможна из-за нестабильностей искрового разряда.

Полупроводниковые генераторы в настоящее время быстро прогрессируют. Импульсная мощность генератора на основе одного полупроводникового ключа приближается к значению 0,2 ГВт, а фронт при использовании полупроводникового обострителя составляет 0,2нс. Второе чрезвычайно важное достижение – на уровне выходного напряжения 10 – 15 кВ удалось синхронизовать между собой 81 независимый генератор с разбросом 30 пс в интервале частот 0 –10 кГц. Массогабаритные характеристики также замечательны. Генератор на 100 МВт с рабочим напряжением 60 -70 кВ и частотой 1 кГц имеет вес 1 кг при габаритах 40 × 200 × 100 мм [58]. Приведенные данные свидетельствуют о возможности создания излучателей гигаваттного уровня на основе решетки из ТЕМ рупоров с электронным поворотом максимума излучения.

В данной работе будут рассмотрены, а также проведены экспериментальные исследования с использованием излучателей построенных с использованием полупроводниковых технологий и решеткой, состоящей из ТЕМ рупоров. Преимуществами такой излучающей системы являются:

- высокое КПД по сравнению с параболическим отражателем;
- узкая ДНА;
- непрерывность работы и высокая ресурсоемкость ввиду равномерного распределения общей выходной мощности по количеству полупроводниковых ключей равному количеству ТЕМ рупоров в решетке;
- гибкость управления напряженностью создаваемого СКИ ЭМИ
- возможностью формирования высокой частоты повторения импульсов, с возможностью пакетирования импульсов;

- возможность высокоточной синхронизации импульсов для формирования суммарной мощности излучения от всех ТЕМ рупоров в заданной точке пространства.

1.4 Анализ способов воздействия

Радиоэлектронное подавление (РЭП) входит в состав мероприятий радиоэлектронной борьбы (РЭБ) – и представляет собой радиоэлектронное подавление либо поражение радиоэлектронных объектов. При воздействии на средства связи различают функциональное поражение и радиоэлектронное подавление.

Функциональное поражение заключается в разрушении (повреждении) элементов и узлов радиоэлектронных средств и в нарушении целостности информации.

Радиоэлектронное подавление заключается в снижении эффективности (качества) функционирования радиоэлектронных объектов путем воздействия на их приемные устройства активными и пассивными радиоэлектронными помехами.

1.4.1 Классификация помех

Радиоэлектронные помехи – это непоражающие электромагнитные излучения, которые ухудшают качество функционирования радиоэлектронных средств (РЭС), помехи имитируют или искажают наблюдаемые и регистрируемые оконечной аппаратурой сигналы, затрудняют или исключают выделение полезной информации, снижают их дальность действия и точность работы автоматических систем управления. Под действием помех РЭС и системы могут перестать быть источниками информации несмотря на их полную исправность и работоспособность.

Так как подавить разнообразные РЭС помехами одного вида невозможно, то применяют специальные виды, соответствующие тем или иным атакуемым средствам.

С учетом тематики настоящей работы будут рассматриваться в качестве объектов воздействия средства широкополосной радиосвязи, и соответствующие им методы воздействия РЭБ. По эффекту (характеру) воздействия на РЭС различают маскирующие и имитирующие помехи/

Маскирующие помехи ухудшают характеристики приемного устройства РЭС, что увеличивает количество принятых символов, снижающих информативность сообщения, создают фон, на котором затрудняется или полностью исключается обнаружение, распознавание, выделение полезных сигналов или отметок целей. При увеличении мощности помех их маскирующее действие возрастает.

Имитирующие (дезинформирующие) помехи – это сигналы, излучаемые станцией помех для внесения ложной информации на атакуемые средства. По структуре они близки к полезным сигналам и поэтому создают в оконечном устройстве РЭС сигналы ложных содержаний, подобные реальным, снижают пропускную способность системы, приводят к ложным реакциям атакуемой системы. При воздействии имитирующих помех характеристики приемного устройства не ухудшаются. Частным случаем имитирующей помехи является ретрансляционная помеха, полностью повторяющая полезный сигнал.

Эффект воздействия помех ухудшает качество обрабатываемой информации в результате ее разрушения либо старения, что увеличивает степень неопределенности при принятии решений. В зависимости от способа наведения помех, соотношения ширины спектров помех и полезных сигналов [43] (рис. 1.4, а) маскирующие помехи подразделяют на **заградительные** (рис. 1.4, в) и **прицельные** (рис. 1,4, б; 1 – помеха совпадает по частоте с сигналом; 2 – помеха не совпадает по частоте с сигналом РЭС)..

Заградительные помехи имеют ширину спектра частот, значительно превышающую полосу, занимаемую полезным сигналом, что позволяет подавлять одновременно несколько РЭС без точного наведения передатчика помех (ПП) по частоте. Их можно создавать, не имея полных данных о параметрах сигналов подавляемых РЭС. Особенностью заградительных помех является то, что при неизменной мощности ПП их спектральная плотность мощности $G_{\text{п}}$ (Вт/МГц) уменьшается по мере расширения спектра излучения. При равномерном спектре она представляет собой отношение энергетического потенциала передатчика помех $P_{\text{пп}}G_{\text{пп}}$ к ширине спектра частот помехи $\Delta f_{\text{п}}$.

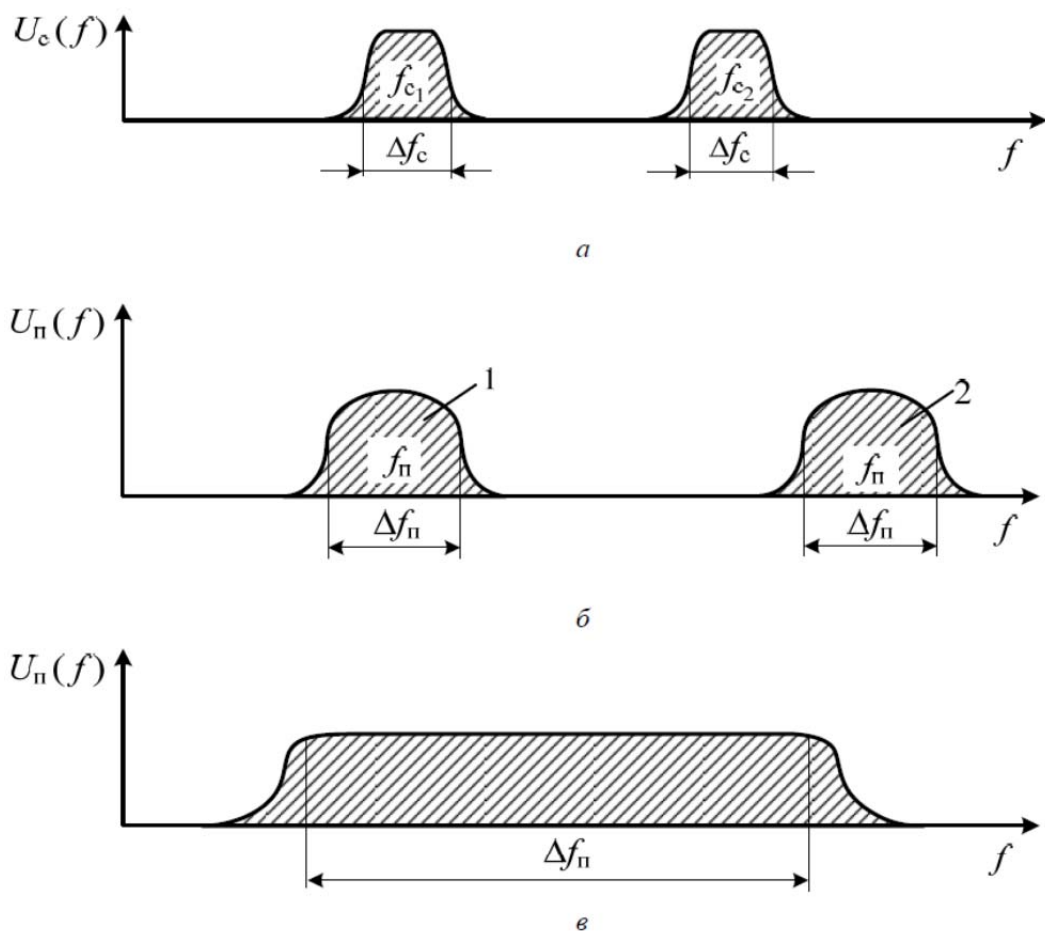


Рис. 1.4. Виды помех в зависимости от ширины спектра. *а* – полезный сигнал, *б* – прицельные помехи, *в* – заградительная помеха.

Для сплошной заградительной помехи

$$G_{\text{п}} = P_{\text{пп}} G_{\text{пп}} / \Delta f_{\text{п}}. \quad (1.1)$$

. Например, если ПП, имеющий эквивалентную мощность 5 000 Вт, создает заградительные помехи в диапазоне частот от $f_1 = 9\,500$ МГц до $f_2 = 10\,000$ МГц ($\Delta f_{\text{п}} = 500$ МГц), то $G_{\text{п}} = 5\,000/500 = 10$ Вт/МГц.

Прицельные помехи имеют ширину спектра, соизмеримую (равную или в 1,5–2 раза превышающую) с шириной спектра сигнала, подавляемого РЭС. Эффективность их воздействия зависит от точности совмещения по частоте с полезным сигналом. Прицельные помехи характеризуются высокой спектральной плотностью мощности. Поскольку они излучаются в узкой полосе частот, то могут быть реализованы маломощными ПП., Например, передатчик радиопомех имеющий мощность излучения всего лишь 150 Вт и коэффициент усиления антенны $G_{\text{пп}} = 100$, способен создать в полосе 5 МГц плотность мощности, равную 3 000 Вт/МГц, а в полосе 0,5 МГц – 30 кВт/МГц.

Одним из способов формирования заградительных помех является применение скользящих по частоте помех, образуемых при быстрой перестройке передатчика узкополосных помех в широкой полосе частот. Благодаря этому в полосе частот каждого канала многоканального РЭС или нескольких станций последовательно сосредоточивается достаточно высокая плотность мощности, необходимая для их подавления. Однако при наличии схем защиты эффективность этих помех может оказаться ниже, чем заградительных, создаваемых передатчиком, не имеющим перестройки по частоте. Недостатком прицельных помех является то, что они одновременно могут подавлять только одно РЭС, работающее в данном диапазоне волн.

По временной структуре излучения радиоэлектронные помехи подразделяют на непрерывные и импульсные. Непрерывные помехи представляют собой непрерывные электромагнитные излучения, модулированные по амплитуде, частоте или фазе. Импульсные помехи имеют вид немодулированных или модулированных радиоимпульсов.

Несинхронные хаотические импульсные помехи (ХИП) представляют собой последовательности радиоимпульсов, параметры которых (длительность, амплитуда, временные интервалы между импульсами) изменяются случайным образом. В системах радиосвязи эти помехи маскируют передаваемые сообщения. Объектом воздействия помех, создаваемых радиопомехами радиосвязи, является приемное устройство.

1.4.2 Радиоподавление линий радиосвязи с повышенной помехозащищенностью

Повышение помехозащищенности, как правило, происходит путем искусственного расширения спектра путем дополнительных модуляций исходного сигнала, при этом спектр результирующего сигнала увеличивается, переводя его в класс широкополосных сигналов. Существует несколько видов искусственного расширения спектра.

Радиотехнические системы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) (FHSS) эффективны в условиях мощных сосредоточенных помех, в борьбе с замираниями при многолучевом распространении радиоволн. В таких системах используются частотно-временной сигнал (ЧВС), представляющие собой последовательность следующих друг за другом радиоимпульсов длительностью τ . Эти импульсы передаются на различных частотах, причем полоса частот каждого импульса составляет $\Delta F\tau$ и возможна одновременная

передача нескольких импульсов на разных частотах. ЧВС обычно изображают с помощью частотно-временной матрицы, определяющей закон кодирования импульсов по частоте и времени. ЧВС применяют также для селекции сигналов (по форме) при работе большого количества многоадресных систем связи в общей полосе частот.

Для подавления систем ППРЧ необходимо иметь либо определенное количество прицельных по частоте передатчиков помех, либо создавать мощную заградительную помеху, имеющую ширину спектра, перекрывающую диапазон перестройки частоты подавляемого приемника. Возможно применение скользящей по частоте помехи, образуемой при быстрой перестройке передатчика узкополосных помех в широкой полосе частот. Однако при наличии схем защиты эффективность скользящих по частоте помех может оказаться ниже, чем заградительных.

Широкополосные (ШПС) фазоманипулированные сигналы (QPSK, BPSK), являются сложными сигналами с большой величиной базы, т. е. сигналами, у которых произведение ширины спектра на длительность много больше единицы. Такие сигналы часто называют шумоподобными. Часто в системах широкополосной радиосвязи можно встретить использование обратной связи (ОС), для коррекции способов кодирования и модуляции в случае обнаружения помехи. Системы радиосвязи с ОС отличаются тем, что происходит проверка качества передаваемых сообщений с коррекцией на передающем конце. Наличие каналов ОС позволяет повысить помехозащищенность за счет увеличения времени передачи. В какой-то степени это эквивалентно введению корректирующих кодов (избыточности).

Для подавления систем радиосвязи с ОС необходимо ставить мощную заградительную помеху. Отсюда следует вывод: для

подавления таких систем нужно ставить заградительные по коду помехи, или хаотически импульсная помеха (ХИП) , или ретрансляционные помехи. [43]

Таким образом СКИ ЭМИ имеет большой потенциал в качестве помехообразующих средств. СКИ ЭМИ можно рассматривать как средство постановки помех относящихся к заградительным, маскирующим и импульсным, при воздействии на широкополосные средства связи, а при воздействии на сверхширокополосные средства связи помехи потенциально можно отнести к прицельным, имитирующим помехам.

Выводы по главе 1

1. Проведенный обзор современных телекоммуникационных систем с использованием широкополосных беспроводных технологий передачи данных показал их распространенность в различных сферах. Отмечена схожесть видов модуляции при построении широкополосных сетей радиодоступа различных масштабов, что говорит о том, что в случае электромагнитной атаки, механизмы, происходящие в различных средствах ШРД, будут схожими.

2. Сравнительный анализ уязвимостей различных систем радиосвязи при воздействии СКИ ЭМИ выявил высокий уровень уязвимости систем широкополосной и сверхширокополосной радиосвязи такому воздействию, чем узкополосных систем связи.

3. Сравнительный анализ ТС воздействия выявил отличительные особенности воздействия СКИ ЭМИ на средства ШРД, как в качестве силового (поражающего) воздействия, так и в качестве помехообразующего воздействия.

4. Обзор методов воздействия РЭБ позволил классифицировать СКИ ЭМИ как средство постановки помех, которые можно отнести, при воздействии на широкополосные средства связи к

заградительным, маскирующим и импульсным.

5. Из проведенного анализа следует необходимость исследования механизмов воздействия СКИ ЭМИ на устойчивость функционирования средств ШРД, с выявлением зависимости изменения характеристик исследуемых устройств от временных параметров следования воздействующих импульсов СКИ ЭМИ и разработки способа управления степенью влияния их воздействия за счет изменения временных параметров последовательности СКИ ЭМИ.

ГЛАВА 2 МЕТОД ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ СКИ ЭМИ НА ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СРЕДСТВА БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Для оценки воздействия на аппаратные части устройств существует ряд методов и решений [6, 15, 23, 27, 30, 39 61]. Принимая во внимание механизмы влияния СКИ ЭМИ, мы будем рассматривать влияние на АФУ и приемные тракты средств связи.

2.1 Методы модуляции применяемые в распространенных средствах ШРД

Рассмотрим наиболее часто встречающиеся виды модуляций, применяемые в системах беспроводной передачи данных. Как было отмечено в главе 1, существуют несколько видов модуляций высшего уровня, оперирующие исходной битовой последовательностью для дополнительного ее кодирования, шифрования, разделения на несколько параллельных потоков информации для последующего наложения на несколько несущих частот.

Наличие нескольких потоков передачи информации, модуляция псевдослучайной последовательностью и применение фазовой манипуляции расширяют спектр, позволяют упаковывать большое количество независимых потоков информации, имея многопользовательский доступ.

Следует отметить причины высокой популярности использования в современных средствах беспроводной передачи данных цифровую модуляцию (модуляцию высшего уровня) с ортогональным разделением каналов (OFDM). Отмечается высокая эффективность использования радиочастотного спектра, объясняемая почти прямоугольной формой огибающей спектра при большом количестве поднесущих частот, простой аппаратной реализацией, где базовые операции реализуются методами цифровой обработки,

хорошее противостояние межсимвольным помехам и интерференции между поднесущими и, как следствие, нечувствительность к многолучевому распространению, возможность применения различных схем модуляции для каждой поднесущей, что позволяет адаптивно варьировать помехоустойчивость и скорость передачи информации. К минусам такой модуляции следует отнести, необходимость высокой синхронизации частоты и времени, чувствительность к эффекту Доплера, ограничивающая применение OFDM в мобильных системах, защитный интервал, используемый в OFDM для борьбы с многолучевым распространением, снижает спектральную эффективность сигнала. На рис.2.1 изображен спектр OFDM сигнала [84].

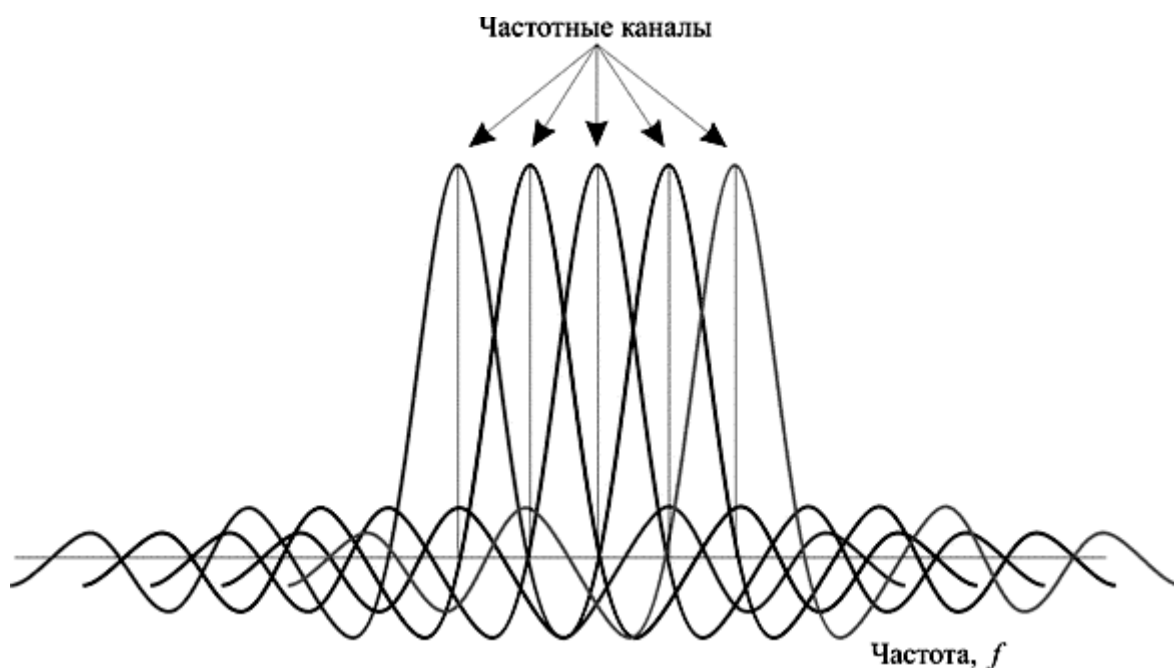


Рис. 2.1. Спектр OFDM сигнала.

Для непосредственного наложения на несущие частоты часто используются модуляции по типу фазовой манипуляции, фазовоамплитудной манипуляции, частотной модуляции.

Двоичная фазовая манипуляция (англ. Binary Phase Shift Keying

– BPSK) представляет собой метод скачкообразного изменения фазы несущего сигнала, которая может принимать два значения отстоящих друг от друга на 180° . На рис. 2.2 изображены сигнальное созвездие (а) и форма модулированного сигнала (б) [80].

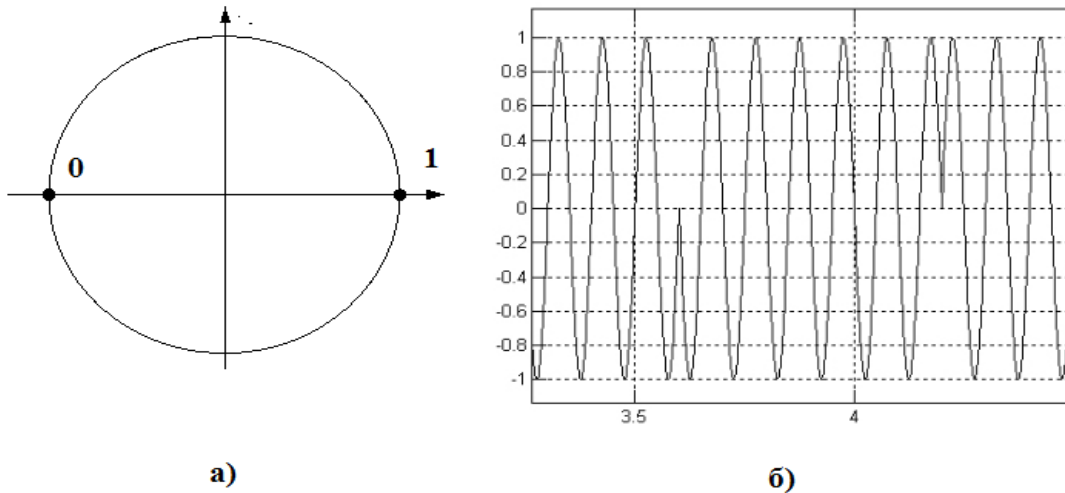


Рис. 2.2. Двоичная фазовая манипуляция, а - сигнальное созвездие, б –форма модулированного сигнала.

Квадратурная фазовая манипуляция (англ. Quadrature Phase Shift Keying – QPSK) представляет собой метод скачкообразного изменения фазы несущего сигнала, которая может принимать 4 - значения отстоящих друг от друга на 90° . На рис. 2.3 изображены сигнальное созвездие (а) и форма модулированного сигнала (б).

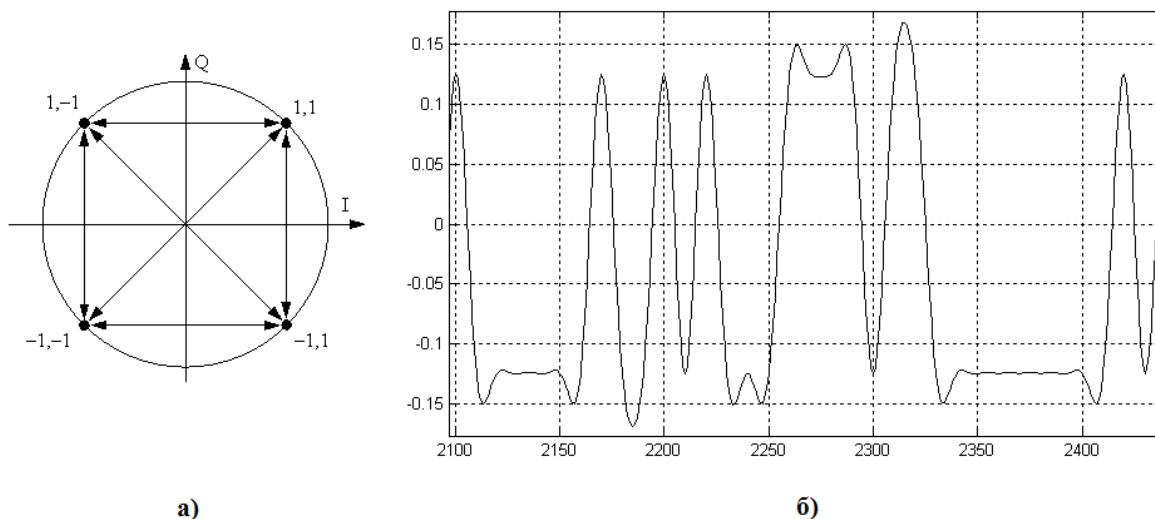


Рис. 2.3. Квадратурная фазовая манипуляция, а - сигнальное созвездие, б –форма модулированного сигнала.

Квадратурная амплитудная манипуляция, часто ее же называют квадратурной модуляцией (англ. Quadrature Amplitude Modulation - QAM), бывает 16, 64 и более позиционная.

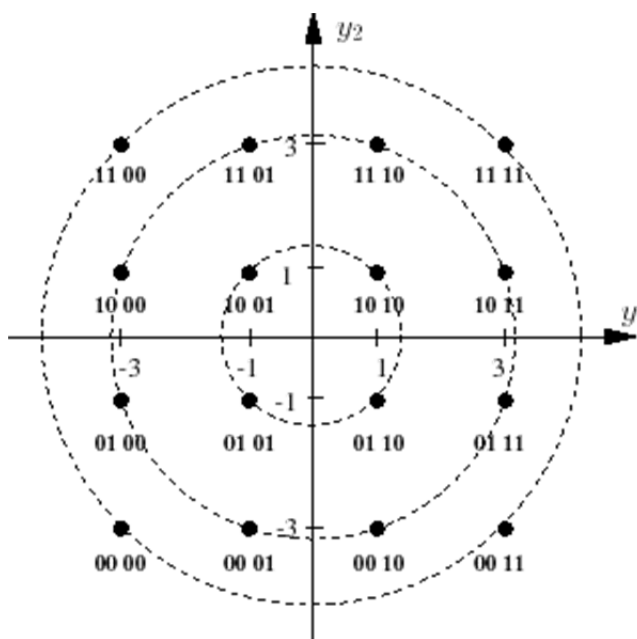


Рис. 2.4. Квадратурная амплитудная модуляция.

При анализе цифровых каналов связи необходимо различать два понятия: битовая и символьная скорость.

Сигнал может принимать не только несколько значений фазы но и амплитуды. Иными словами это тот же сигнал QPSK с но большим

количеством фаз и амплитуд. На рис. 2.4. изображена сигнальная звезда 16-QAM. Следует отметить что помехоустойчивость зависит от расстояния между соседними точками на сигнальной звезде. Чем это расстояние меньше, тем ниже помехоустойчивость. Исходя из этого, расположение точек состояния сигнала, как правило, выбирают на максимальном удалении от соседних.

Битовая скорость, иными словами скорость передачи информации, выражается в битах в секунду (бит/с) Иногда ее называют валовой скоростью. Это фактически переданная информация.

Символьная скорость измеряется в бодах в секунду. (Bd/c) Каждый символ может представлять или передавать один или несколько бит данных [86]. В передающем устройстве существует фиксированное количество символов на канале при фиксированной и известной символьной скорости, а на приемном устройстве происходит выявление этой последовательности символов с целью восстановления передаваемых данных. Здесь может быть прямое соответствие между символом и набором данных (например, каждый символ может кодировать один или несколько двоичных разрядов или "бит"), либо символы могут означать смену бита на противоположный, либо целые многобитовые последовательности, как, к примеру, в 16-QAM модуляции, где один символ содержит 4 бита информации.

Длительность символа, может быть измерена как промежуток времени между переходами. Продолжительности времени символа T_c может быть рассчитана как:

$$T_c = \frac{1}{f_c} \quad (2.1)$$

где f_c является символьною скоростью.

Здесь мы можем определить связь символьной скорости с валовым битрейтом. Символьная скорость на примере 16-QAM в 4 раза меньше чем валовая скорость передачи информации. Если передается N битов на символ, а валовой битрейт R , включая издержки канального кодирования, символьная скорость может быть рассчитана как:

$$f_c = \frac{R}{N} \quad (2.2)$$

При распределении потоковых данных по некоторому количеству K несущих частот символьная скорость на каждой несущей частоте будет определяться выражением

$$f_c = \frac{R}{N * K} \quad (2.3)$$

Например символьная скорость на каждой из несущих частот при модуляции OFDM при модуляции каждой из 11 поднесущих 16-QAM при скорости передачи данных 1 Мбит/с, будет рассчитываться используя (2.3):

$$f_c = \frac{1000000}{4 * 11} \approx 22 \text{кГц}$$

Именно с такой скоростью сигнал на несущей частоте будет изменять свое состояние (амплитуду, фазу).

Следует отметить, что наиболее часто используемым диапазоном для организации беспроводных сетей передачи данных является диапазон в районе 2,4 ГГц, из-за отсутствия лицензирования. Встречаются и другие рабочие частоты 3.6, 5, 60 ГГц и пр.

Как правило, при увеличении пропускной способности радиоканала, увеличивается количество символов на бит, сокращаются амплитудно временные расстояния между состояниями сигнала, что снижает помехозащищенность.

Модуляция с разделением исходного потока данных на несколько поднесущих позволяет рассматривать сигнал как множество медленно модулируемых узкополосных сигналов (в подстандарте IEEE802.11a таких каналов 52), вместо одного быстро модулируемого широкополосного сигнала. При этом отмечается, что такая модуляция хорошо справляется со сложными условиями в среде передачи, например с узкополосными помехами, частотно избирательным затуханием [84].

2.2 Анализ механизма воздействия СКИ ЭМИ на средства ШРД

Механизм воздействия на средства ШРД можно охарактеризовать двумя основными путями:

- влияние на аппаратную часть устройств;
- влияние на приемные тракты устройств.

Влияние на аппаратную часть средств ШРД, как правило, происходит [32-36, 60] при воздействии СКИ ЭМИ поля с напряженностью выше 70 В/м, при наличии уязвимостей в экранировании конструкции этих средств. При таких уровнях могут наблюдаться ухудшение показателей функционирования устройств вплоть до блокирования работы. Это объясняется тем, что СКИ ЭМИ вызывает кондуктивные помехи в цепях устройств, которые могут быть приняты за ложные биты, команды. При высоких уровнях напряженностей воздействующего поля возможны необратимые изменения в устройствах за счет поражения элементной базы (в основном полупроводниковые элементы). Было проведено много экспериментальных исследований воздействия СКИ ЭМИ на различные электронно-вычислительные машины, средства построения локальных вычислительных систем и прочее.

Более подробно мы рассмотрим влияние СКИ ЭМИ на приемные тракты средств ШРД. Очевидно, что для ухудшения показателей функционирования этих устройств может потребоваться более низкие напряженности воздействующего поля, но при определенных обстоятельствах. Для определения таких обстоятельств нам необходимо проанализировать механизм такого воздействия. Как было отмечено в разделе 2.1 модулированный сигнал меняет свое состояние с определенной символьной скоростью, при чем, это может происходить на нескольких несущих частотах. При воздействии СКИ ЭМИ за счет ширины спектра происходит влияние на приемный тракт на рабочих частотах, они могут беспрепятственно пройти минуя заградительные фильтры, при этом может произойти так что некоторые символы полезного сигнала могут быть не приняты из-за такой заградительной помехи, а некоторые могут исказиться и приобрести ошибочное значение.

Как правило современные телекоммуникационные средства ШРД при потере принимаемых пакетов информации из-за отсутствия части символов, ввиду наличия ОС [43] способны повторно отправлять и обрабатывать поврежденные пакеты. В некоторых системах предусмотрено изменение модуляции сигнала на более помехоустойчивый, т.е. с более низкой символьной скоростью и применением малопозиционной модуляции низшего уровня.

Механизм влияния СКИ ЭМИ на BPSK сигнал выглядит следующим образом: импульс СКИ ЭМИ порождает в приемном модуле сигнал, который может заблокировать прием полезного сигнала из-за сравнительно высокой амплитуды, либо при более низком уровне, на несущей частоте может симитировать для демодулятора смену фазы полезного сигнала. Графически это изображено на рис. 2.5.

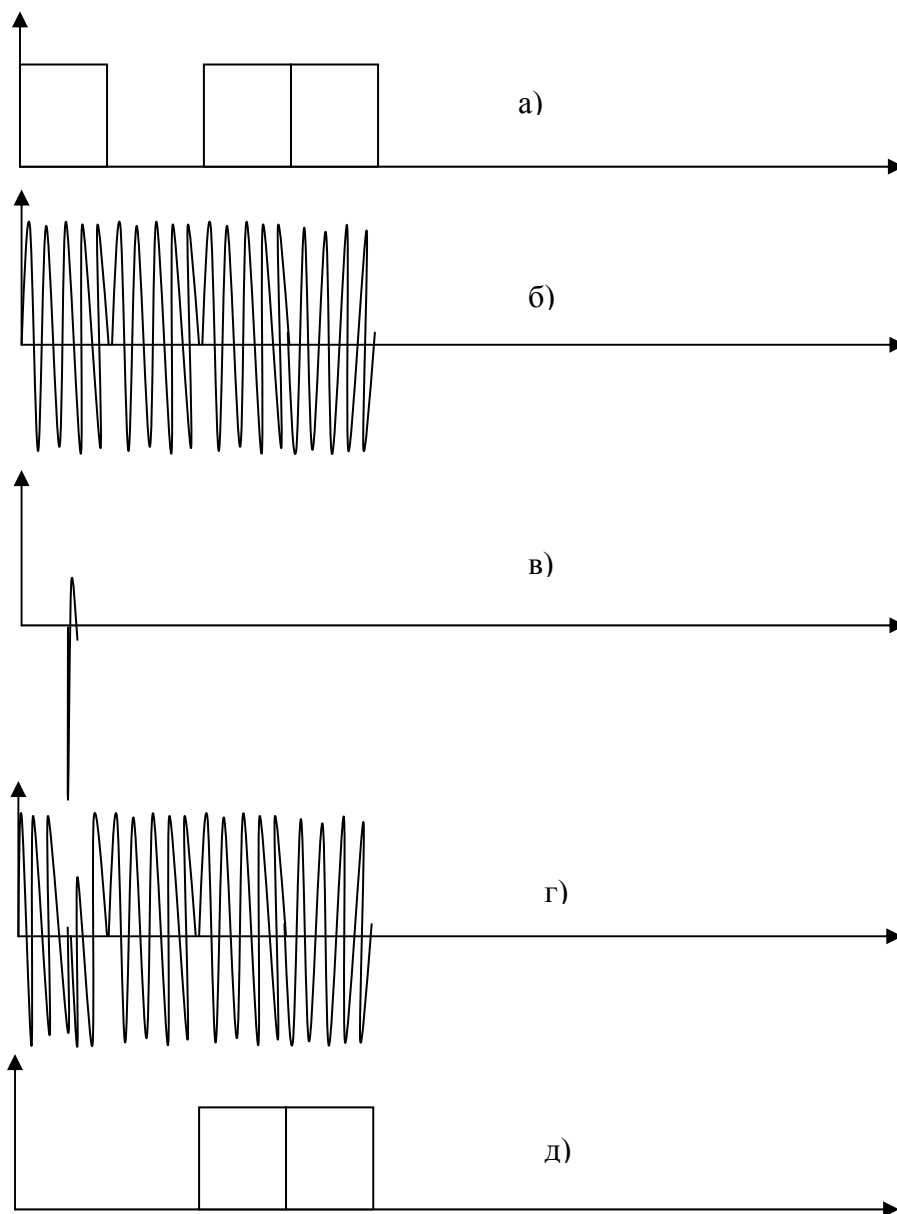


Рис.2.5 Механизм влияния СКИ ЭМИ на средство ШРД использующее BPSK модуляцию. а – импульс СКИ ЭМИ, б полезный сигнал, в- модулированный полезный сигнал, г – результирующий сигнал, д - сигнал на выходе демодулятора.

Несложно сделать вывод, что при соизмеримой частоте следования импульсов СКИ ЭМИ с символьной скоростью на несущей частоте таких ошибочно принятых фаз может быть больше. Другие модуляции типа PSK будут менее стойки к СКИ ЭМИ за счет большего количества состояний модулированного сигнала и

дополнительного применения амплитудной модуляции, как например, в QAM-16.

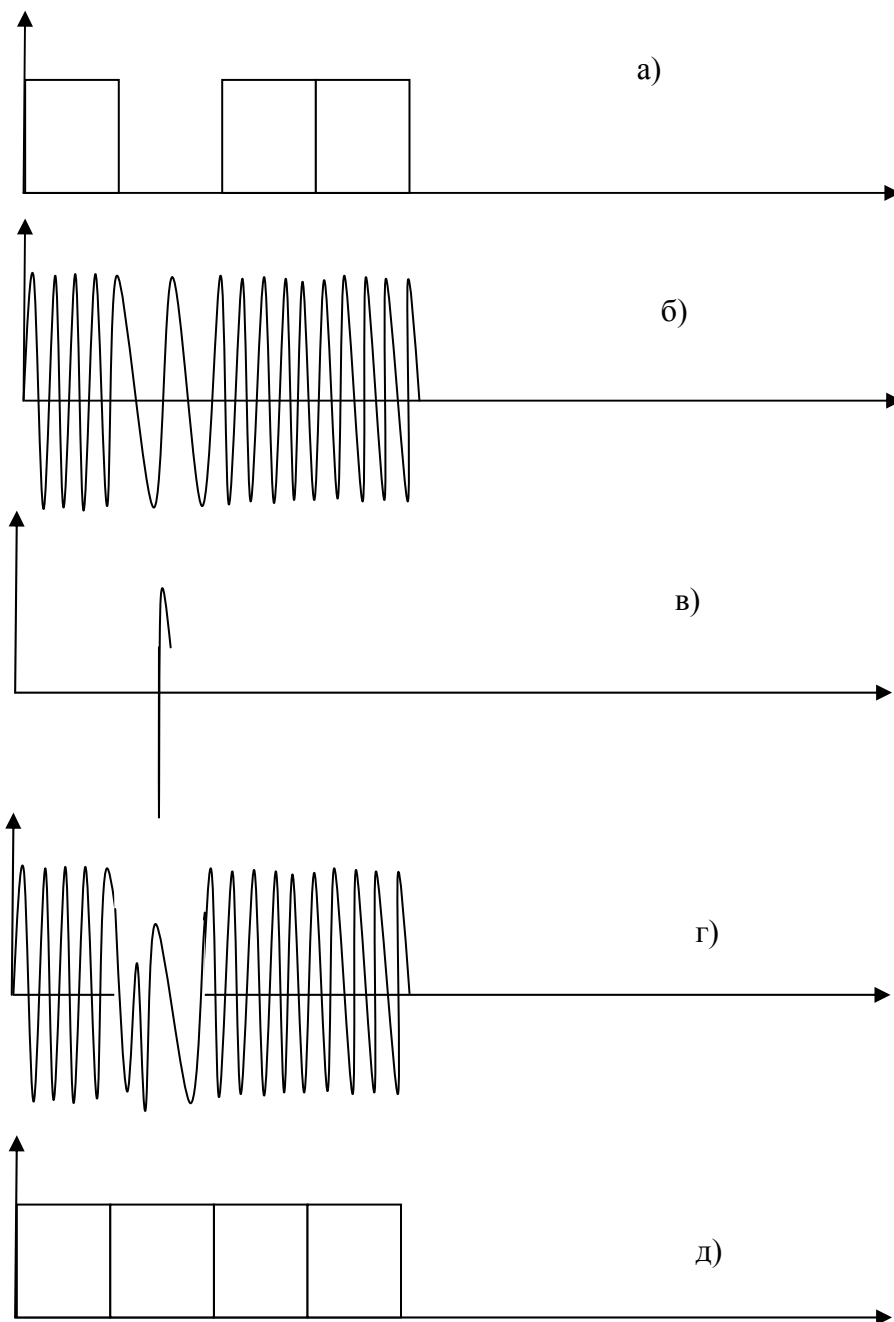


Рис. 2.6. Механизм влияния СКИ ЭМИ на средство ШРД использующее GMSK модуляцию. а – импульсы СКИ ЭМИ, б - полезный сигнал, в - модулированный полезный сигнал, г – результирующий сигнал, д - сигнал на выходе демодулятора

Влияние СКИ ЭМИ на устройства принимающие сигналы модулированные FHSS, использующую технологию FSK (frequency shift keying) частотное манипулирование так же может заблокировать прием некоторых бит информации во время прохождения СКИ ЭМИ за счет блокирования в приемном тракте высокой амплитудой, а при воздействии нескольких импульсов низко сравнительно низкой амплитудой в течении следования одного бита (одного частотного импульса) может вызвать ошибочную идентификацию, тем самым вызвав определение ложного сигнала в демодуляторе. На рис. 2.6 изображен механизм влияния нескольких, импульсов на средство ШРД принимающее сигнал с FSK модуляцией.

Определено, что воздействие СКИ ЭМИ за счет генерируемой в пространстве широкой полосы частот может заблокировать приемные тракты устройств при энергетических характеристиках на рабочих частотах превышающих пороговые уровни приема полезного сигнала, либо при сравнительно низких уровнях вызвать имитацию ложных состояний сигнала при демодуляции.

2.3 Разработка критерия эффективности воздействия СКИ ЭМИ на средства ШРД

Прямым методом оценки эффективности воздействия является оценка энергетических затрат для достижения результатов воздействия. Результатами воздействия ставится снижение скорости передачи информации, выражаемое в процентах по отношению к номинальной. Снижение скорости передаваемой информации является прямым следствием количества потерянных пакетов информации. Повышением эффективности будет являться улучшение результатов при сохранении энергетических характеристик. Одним из способов повышения эффективности воздействия может быть способ формирования определенной последовательности импульсов,

перекрывающей по временным моментам наибольшее количество передаваемых символов, а также некоторое количество импульсов в период следования символа. При этом принимая во внимание особенность СК ЭМИ равномерности спектра, можем сделать заключение о возможности одновременного влияния импульса на близкорасположенные модулированные частоты, например как при OFDM модуляции.

Критерием эффективности воздействия будем считать количество потерянных пакетов приемным устройством ШРД при воздействии СК ЭМИ по сравнению с количеством потерянных пакетов за тот же промежуток времени и при тех же условиях но при отсутствии воздействия.

Численную оценку эффективности можно выразить в процентном отношении, как разница процента потерянных пакетов средства радиосвязи при воздействии измененной последовательностью импульсов и процента потерянных пакетов при воздействии простой последовательностью (базовой) с заданной частотой. Методика измерений должна предполагать неизменные положения излучателей относительно исследуемого устройства и напряженность поля образуемого импульсом. При этом оценку эффективности можно проводить как в зависимости от частоты следования импульсов, так и в зависимости от пакетирования импульсов. При оценке эффективности при формировании пакетов, расчет следует проводить относительно базовой частоты следования импульсов, с которой формируются пакеты. В общем виде формула оценки повышения эффективности принимает следующий вид

$$E_{отн} = N_{изм} - N_{баз}, \quad (2.4)$$

где $N_{баз}$ процент потерянных пакетов при воздействии базовой последовательности, $N_{изм}$ процент потерянных пакетов при воздействии измененной последовательностью импульсов.

$E_{отн}$ может принимать значения от 0 до 100.

С целью определения максимальной эффективности следует находить такие граничные условия (напряженность воздействующего поля в точке и пр.) при которых наблюдается минимальный либо нулевой процент потерянных пакетов при воздействии базовой последовательностью [54].

2.4 Анализ помехоустойчивости распространенных видов модуляции к воздействию СКИ ЭМИ

Широко применяемые в современных радиорелейных линиях (РРЛ) связи цифровые методы модуляции QAM-16, 32,64,128 имеют слабую защищенность от интерференционной помехи. QAM-16 при отношении сигнал/интерференционная помеха 10dB полностью теряет работоспособность. Более защищена QPSK, но она требует значительного добавочного увеличения требуемого отношения сигнал/шум (5-6 dB) для обеспечения той же вероятности, что и без влияния интерференционной помехи. Совсем другое дело происходит при использовании шумоподобного широкополосного сигнала (ШШС). Антиинтерференционный порог систем связи с ШШС примерно равен безе сигналов (выигрышу при обработке), что значительно превышает антиинтерференционный порог приведенных выше сигналов (на 20 dB и более). При широкополосной помехе требуется значительное превышение ее мощности над мощностью сигнала, чтобы она могла подавлять сигнал. ШШС обеспечивают работоспособность при превышении мощности помехи в базу раз мощности сигнала. ШШС на базе развертывания спектра с помощью прямой последовательности (DSSS) как правило используются с

немодулированным пилот-сигналом. Это позволяет системам с ШШС работать в условиях большой нестабильности частоты, например, из-за эффекта Доплера. По указанным причинам связь с использованием ШШС является хорошо известной технологией, применяющейся в военных системах десятилетиями. В период конверсии она начала применяться в коммерческих системах. Этому способствовало также обнаруженное вновь известное свойство ШШС эффективно использовать спектр частот в условиях его сильной загруженности, при анархии и неуправляемости работой абонентов, а также в условиях замираний сигнала из-за многолучевости.

При широкополосной помехе требуется значительное превышение ее мощности над мощностью ШШС сигнала, чтобы она могла подавлять сигнал. Широкополосные системы связи обеспечивают работоспособность при превышении мощности помехи в B раз мощности сигнала, где B - база полезного сигнала равная произведению ширины спектра на длительность образующего его сигнала [3].

2.5 Определение критериальных параметров СКИ ЭМИ, влияющих на эффективность воздействия

Принимая во внимание особенности видов модуляции, зависимость помехоустойчивости от размера базы полезного сигнала, можно констатировать, что для повышения эффективности воздействия СКИ ЭМИ, необходимо чтобы база СКИ ЭМИ была соизмерима или больше базы полезного сигнала. Увеличение базы в данном случае возможно за счет формирования последовательности нескольких СКИ ЭМИ с общей длительностью соизмеримой с длительностью полезного сигнала. С другой стороны получается что мы выполняем условия, описанные в п.п. 2.3 о перекрытии временных моментов следования импульсов СКИ ЭМИ и временных

моментов следования символов на несущей (поднесущей) частоте, при этом импульсы в пакете будут перекрывать период следования одного символа на модулированной частоте.

Форма сверхкоротких импульсов описывается моноциклом Гаусса, то есть первой производной от известной кривой распределения Гаусса:

$$A(t) = A_0 \frac{\sqrt{2e}}{\tau} \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \quad (2.5)$$

где τ — длительность импульса, A_0 — его амплитуда. Ширина ΔF спектра мощности импульса обратно пропорциональна длительности импульса τ . Форма спектра мощности Рис. 2.6. такого импульса описывается соотношением:

$$S(f) = A_0 \sqrt{2\pi e} f \tau^2 \exp\left(-\frac{f^2 \tau^2}{2}\right) \quad (2.6)$$

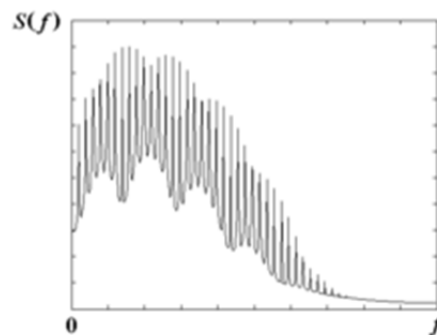


Рис. 2.6. Спектр сверхкороткого импульса.

База сверхкороткого импульса $B = \tau \Delta F \approx 1$. При использовании импульсов длительностью τ от 2,0 нс до 0,1 нс ширина полосы спектра мощности составляет соответственно от 500 МГц до 10 ГГц. Спектр сигнала занимает полосу частот от 0 до $\Delta F \approx 1/\tau$.

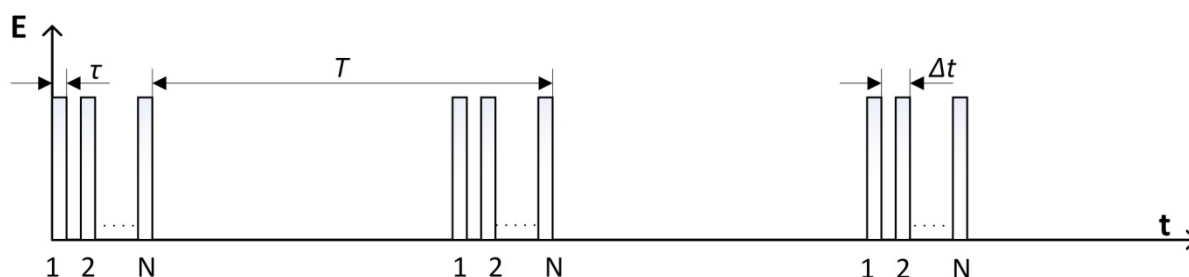
Свойством как одиночных сверхкоротких импульсов, так и пачек таких импульсов является то, что спектр этих сигналов

начинается практически от нулевой частоты. Эта затрудняет выполнение условий спектральной маски для нелицензируемого использования СШП сигналов [82].

В литературе [20] так же можно встретить следующие характеристики импульса, влияющие на степень воздействия - соотношением между характеристиками первого и второго полупериодов $E1/E2, T1/T2$, где $E1, E2, T1, T2$ амплитуды и длительности первого и второго полупериодов импульса соответственно. Учитывая, что это уже амплитудные характеристики импульса, а в данной работе мы оперируем только временными характеристиками, они рассматриваться не будут.

Исходя из выше изложенного можем выделить следующие критериальные параметры влияющие на эффективность воздействия СКИ ЭМИ на средства ШРД [47]:

- 1) период следования импульсов (пакетов импульсов), T ;
- 2) количество импульсов в пакете, N ;
- 3) интервал между импульсами в пакете, Δt ;
- 4) длительность сверхкороткого импульса τ .



На рис. 2.7 изображена последовательность пакетов, состоящих из N сверхкоротких электромагнитных импульсов с периодом следования пакетов T длительностью сверхкороткого электромагнитного импульса τ , с задержкой между импульсами в пакете Δt .



Рис.2.8 Схема влияния последовательности влияния сверхкоротких электромагнитных импульсов на прием и демодуляцию поднесущей частоты.

Схема влияния (рис. 2.8) последовательности сверхкоротких электромагнитных импульсов на сигналы широкополосной радиосвязи поясняет, что длительность сверхкороткого электромагнитного импульса τ влияет на ширину спектра помехи, что приводит к перекрытию несущих (поднесущих) частот полезного сигнала, частота следования пакетов сверхкоротких электромагнитных импульсов $1/T$ имитирует символьную скорость передачи информации полезного сигнала $f_{симв}$, а временные интервалы Δt между импульсами в пакете влияют на состояние модулированного сигнала, точнее на состояние несущей частоты в момент прохождения символа (фаза, амплитуда...), важным параметром для последующего анализа здесь будет число периодов несущей частоты на символ n_T .

2.6 Разработка метода оценки степени влияния СКИ ЭМИ на средства ШРД

Степень влияния СКИ ЭМИ на средства ШРД может быть оценена только при учете совокупности ряда параметров сигналов СКИ ЭМИ и полезного сигнала. Традиционные методы оценки

степени влияния учитывающие соотношение мощностных параметров не будут отражать полной картины, т.к. нет учета временных и спектральных параметров.

2.6.1 Оценка энергетических характеристик СКИ ЭМИ поля на расстоянии от станции

Основным физическим параметром, определяющим эффективное воздействие ЭМП на наземные СШП линии радиосвязи, является энергия поля. Основной энергетической характеристикой поля является плотность потока мощности,

$$P = \frac{PG}{4\pi r^2}, \quad (2.6)$$

где P - мощность подводимая к антенне, G - коэффициент усиления передающей антенны.

С другой стороны плотность мощности характеризуется вектором Умова-Пойнтинга:

$$P = [E \times H] = E (E / 120 \pi) = E^2 / 120 \pi, \quad (2.7)$$

где E и H – напряжённости электрической и магнитной составляющих поля соответственно, $120 \pi = 377$ Ом – волновое сопротивление свободного пространства.

Расчёт энергии импульсного поля в виде последовательности СКИ ЭМИ основан на учете длительности импульса и частоты повторения СКИ ЭМИ [55]:

$$P_{ски} = P \tau f_{ски}, \quad (2.8)$$

где $f_{ски}$ – частота повторения (следования) СКИ.

при формировании поля пакетами импульсов с количеством N в пакете, с частотой следования пакетов $f_{след}$, формула примет вид

$$P_{ски} = P \tau N f_{ски} \quad (2.9)$$

Величина $P_{ски}$ характеризует энергию импульсного поля в единицу времени.

Учитывая, что характер нашей помехи относится к заградительной, для оценки степени влияния следует оперировать величиной спектральной плотности энергии при сравнении параметров помех.

Формула расчета спектральной плотности энергии принимает вид

$$P_{ски} = \Pi \tau N f_{ски} / \Delta f, \quad (2.10)$$

где Δf ширина спектра образуемого импульсом

а с учетом (2.7) формула принимает вид:

$$P_{ски} = \frac{E^2 \tau N f_{ски}}{\Delta f 120\pi} \quad (2.11)$$

Данная формула учитывает спектральные, амплитудные, и временные характеристики последовательности СКИ ЭМИ, что позволяет проводить более сообразную оценку степени влияния на средство ШРД сравнивая данный параметр с этим же параметром средства ШРД.

Для расчета формулы (2.11) требуется определение напряженности поля СКИ ЭМИ.

Приравнивая значения Π :

$$\frac{E^2}{120\pi} = \frac{PG}{4\pi r^2}, \quad (2.12)$$

получаем напряженность электрического поля на расстоянии r от источника излучения:

$$E = \frac{\sqrt{30PG}}{r},$$

В технике СКИ ЭМИ вводят энергопотенциал комплекса воздействия сверхкороткоимпульсным электромагнитным излучением (КВ СКИ ЭМИ)

$FOM = \sqrt{30PG}$, так что

$$E = \frac{FOM}{r} = \frac{E_0}{r} \quad (2.13)$$

$E_0 = FOM$ (Field On Metre), где FOM можно определить как напряженность электрического поля на расстоянии $r = 1$ м от источника излучения, т.е. как напряженность электрического поля в месте расположения источника излучения E_0 .

Таким образом зная FOM станции можем вычислить спектральную плотность энергии СКИ ЭМИ на расстоянии r :

$$P_{ски} = \frac{FOM^2 \tau N f_{ски}}{r^2 \Delta f 120\pi} \quad (2.14)$$

спектральная плотность мощности СКИ ЭМИ при этом будет равна

$$P_{ски} = \frac{FOM^2}{r^2 \Delta f 120\pi} \quad (2.15)$$

2.6.2 Оценка степени влияния по сопоставлению энергетических характеристик поля СКИ ЭМИ и полезного сигнала

Особенностью заградительных помех является то, что при неизменной мощности ПП их спектральная плотность мощности G_p (Вт/МГц) уменьшается по мере расширения спектра излучения.

Учитывая, что ширина спектра СКИ ЭМИ значительно превышает ширину спектра средств ШРД, традиционные расчеты по оценке количественных характеристик по подавлению такие как коэффициент подавления по мощности и коэффициент подавления по напряжению малоинформативны, так как не учитывают доли мощности рассеянной в неиспользуемую полезным сигналом часть спектра.

Принимая во внимание равномерность спектра СКИ ЭМИ, для более точной оценки мы можем оперировать соотношением спектральной плотности энергии мешающего и полезного сигнала. Следовательно задача сводится к оценке спектральной плотности энергии средства ШРД вблизи приемного устройства, на которое в свою очередь происходит воздействие СКИ ЭМИ и сопоставлением этих величин для полезного и воздействующего сигнала.

Оценка спектральной плотности мощности полезного сигнала может проводиться с учетом (2.6):

$$P_{уст} = \frac{PG}{4\pi r_{уст}^2 \Delta f_{уст}}, \quad (2.16)$$

Оценка спектральной плотности энергии полезного сигнала вычисляется аналогично:

$$P_{уст} = \frac{PG}{4\pi r_{уст}^2 \Delta f_{уст}}, \quad (2.17)$$

При превышении этой величины сигналом СКИ ЭМИ есть основания полагать о возможном ухудшении характеристик приемного устройства ШРД.

Здесь так же следует отметить встречаемую в литературе оценку по возможности блокирования ШШС сигналов. Мощность сигнала блокирования который для сигналов ШШС исходя из [10, 11], необходимая для достижения антиинтерференционного порога.

Пусть сигнал блокирования представляет собой некий сигнал, частота которого не обязательно совпадает с частотой несущей полезного сигнала, но находится внутри полосы частот приёмника. На выходе согласованного приёмника интерференционная помеха подавляется в базу раз, то есть среднеквадратичное значение мощности помехи равно: $P_{бл.вых} = P_{бл.вх}/B$, где B – выигрыш при обработке, равный базе сигнала.

В данной оценке применима к модуляциям с применением искусственного расширения спектра, например с использованием псевдослучайной последовательностью, путем создания нескольких несущих частот.

Оценка по базе сигнала ориентировочная, другими словами здесь учитываются только мощности сигналов, без учета временных параметров образующих их импульсов, в случае с СКИ ЭМИ, которые влияют на спектральную плотность энергии.

На примере используемой модуляции DSSS в стандарте IEEE 802.11 [73] приблизительно оценим эту величину.

Исходные данные:

Скорость передачи информации – 1 МБит/с

Число несущих частот – 11

Полоса сигнала 22 МГц

Центральная частота порядка 2,4 ГГц

Как известно $B = \Delta f T$, где Δf – ширина спектра, T – длительность сигнала.

Ширина спектра такого сигнала 22 МГц. Длительность такого сигнала можно оценить приняв за элементарную часть этого сигнала длительность одного символа передаваемой информации и при скорости передачи 2Мбит/с и будет равна 0,5 мкс. Таким образом, приблизительная оценка показывает, что величина базы сигнала с распространенным типом модуляции составляет $0,5 \cdot 10^{-6} * 22 \cdot 10^6 = 10$. Для обеспечения условий блокирования средства ШРД при воздействии СКИ ЭМИ среднеквадратичная мощность помехообразующего сигнала должна быть в 10 раз больше мощности полезного сигнала.

Для более детального сопоставления помехи с полезным сигналом необходимо оперировать величинами спектральной

плотности энергии учитывающими усредненную временную заполненность.

Таким образом введя параметр $K_{эисп}$ отражающий отношение спектральных плотностей энергии создающего СКИ ЭМИ и полезного сигнала, мы можем оценить степень влияния:

$$K_{эисп} = P_{ски} / P_{ист} \quad (2.18)$$

Чем выше указанная величина, тем выше вероятность сбоя в работе средств ШРД. Но следует учесть, что вышеприведенный метод учитывает усредненную заполненность единичных интервалов времени, без учета сопоставления моментов времени наступления событий. Об учете этого параметра будет рассказано в следующем параграфе.

2.6.3 Оценка перекрытия временных параметров последовательности СКИ ЭМИ и полезного сигнала.

Учет усредненной временной заполненности при оценке степени влияния СКИ ЭМИ на средства ШРД более правильно позволяет оценить эту величину, чем по соотношению только мощностных характеристик, но не учитывает соотношения временных моментов событий, таких как смена символа полезного сигнала и излучение импульса СКИ ЭМИ.

Все современные средства беспроводной передачи данных объединяет одна основополагающая особенность относящаяся к большинству цифровых модуляций - это синхронизация по времени. Данная мера делает возможным обработку огромнейшего массива модулированных сигналов. Устройства беспроводной передачи данных засинхронизированные на одно и то же время используя для обработки одинаковые промежутки времени без сложностей

определяют фазы, частоты, сегменты пакетов и других параметров сигнала.

В данной работе мы оперируем параметрами низшего уровня, такими как символьная скорость модуляции на несущей частоте $f_{\text{симв}}$ и введем понятие количества периодов несущей частоты для передачи одного символа $f_{\text{нес}}/f_{\text{симв}}$.

Уже отмечалось, что совпадение момента излучения импульса СКИ ЭМИ каждый раз с моментом прохождения модулированного символа на несущей частоте увеличивает вероятность искажения, блокирования передаваемой информации, при увеличении частоты следования, например в 2 раза, на один модулированный символ на несущей частоты будет приходится уже 2 импульса СКИ ЭМИ. Если количество периодов одного символа велико, а несущая частота низкая, то увеличение количества импульсов СКИ ЭМИ в 2 раза не окажет существенного эффекта в передаче символа. Дело в том, что длительность СКИ ЭМИ будет сравнительно мала с периодом несущей частоты, к тому же длительность символа не позволит демодулятору принять эти две короткие помехи принять как основание для некорректной демодуляции сигнала. В данном случае для повышения эффективности следует расположить второй импульс СКИ ЭМИ на расстоянии от первого на расстоянии соизмеримом с периодом несущей частоты сигнала, при этом вероятность искажения будет выше т.к. мы выбиваем целый период, вместо двух всплесков на символе.

Таким образом, мы можем ввести еще два оценочных параметра. Степень совпадения скорости следования импульсов (пакетов импульсов) СКИ ЭМИ с символьной скоростью, и степень совпадения импульсов в пакетах импульсов СКИ ЭМИ с периодами несущей частоты. Данные параметры так же улучшают традиционную

грубую оценку по соотношению мощностных характеристик полезного и мешающего сигналов, за счет учета степени адресности распределения мощности.

Сформируем приблизительную оценку через зависимости параметров. Имеем входные данные:

- символьная скорость полезного сигнала: $f_{симв}$
- частота следования импульсов (пакетов импульсов) СКИ ЭМИ: $f_{ски}$
- центральная (средняя) несущая частота сигнала: $f_{нес}$
- число импульсов в пакете СКИ ЭМИ: $N_{ски}$

Если рассматривать соотношение символьной скорости и частоты следования импульсов СКИ ЭМИ то при их совпадении будет оказано влияние на каждый символ. Если частота следования СКИ ЭМИ в 2 раза меньше чем символьная скорость то будут перекрыты в 2 раза меньше символов, следовательно оказано в 2 раза меньшее влияние.

$$K_{симв\ ск} = f_{ски}/f_{симв}, \quad (2.19)$$

Если рассматривать влияние пакетов СКИ ЭМИ импульсов на несущей частоте, то следует учитывать количество импульсов СКИ ЭМИ N приходящихся на один символ по отношению к количеству периодов несущей частоты на один символ $f_{нес}/f_{симв}$, таким образом получаем:

$$K_{пакет} = \frac{Nf_{симв}}{f_{нес}},$$

$$\text{где } N = N_{ски} + f_{ски}/f_{симв},$$

тогда выражение для оценки перекрытия количества периодов несущей частоты на символ принимает вид:

$$K_{пакет} = \frac{N_{ски}f_{симв} + f_{ски}}{f_{нес}} \quad (2.20)$$

соответственно чем выше это значение, тем эффективней используется излученная энергия при рассмотрении влияния импульсов на несущую частоту передаваемого символа.

Таким образом, обобщая и резюмируя все вышеприведенные выкладки приведем условную формулу для учета степени влияния:

$$K_{общ} = K_{симв ск} * K_{пакет} * K_{эисп}, \quad (2.21)$$

$K_{симв ск}$ – коэффициент адресности влияния по символьной скорости, $K_{пакет}$ – коэффициент адресности влияния по пакету, $K_{эисп}$ – коэффициент влияния по энергетическим характеристикам с учетом спектра. Коэффициенты адресности $K_{симв ск}$, $K_{пакет}$ условны, необходимы для общего понимания механизма влияния и не будут использоваться в дальнейших расчетах согласно формулы (2.21). Согласно этим коэффициентам будут выработаны условия применимости расчета $K_{эисп}$,

С учетом 2.18, а так же принимая $\Delta f = 1/\tau$ получаем:

$$K_{эисп} = \frac{(FOM r_{исп} \tau)^2 N_{ски} f_{ски} \Delta f_{исп}}{30 P G r_{ски}^2} \quad (2.22)$$

Следует отметить, что формула 2.22 больше применима при временном интервале Δt между импульсами СКИ ЭМИ в пакете много большем, чем период несущей частоты сигнала. Это обстоятельство заключается в том, что приемное устройство может отсечь одиночный импульс, восприняв, только кусок его спектральной составляющей, попадающей в полосу рабочих частот.

При формировании пакета СКИ ЭМИ импульсов с межимпульсным интервалом Δt соизмеримым с периодом несущей частоты происходит несколько другой механизм восприятия импульсов СКИ ЭМИ, дело в том, что приемное устройство может воспринять такой пакет, как фрагмент несущей частоты, при этом амплитуда возмущения в приемном тракте будет большей, чем в

случае при одиночном импульсе, где воспринимается его спектральная составляющая.

Приблизительную оценку по величине FOM комплекса СКИ ЭМИ, необходимой для влияния на средство ШРД путем воздействия последовательностью СКИ ЭМИ с $\Delta t \approx 1/f_{нес}$, следует оценивать исходя из соотношения плотностей потока мощностей источника сигнала и источника СКИ ЭМИ исходя из (2.16) и (2.15), но без учета отношения к спектру.

$$K_{эн} = \frac{(FOM r_{ист})^2 \tau N_{ски} f_{ски}}{30PGr_{ски}^2} \quad (2.23)$$

Выводы по главе 2

1. Анализ различных типов модуляций выявил взаимосвязь временных параметров воздействующей последовательности импульсов СКИ ЭМИ на средства ШРД и степени ее влияния, так, высокая степень влияния будет наблюдаться при максимальном перекрытии количества периодов на несущей частоте, приходящихся на один передаваемый символ полезного сигнала.

2. Длительность импульса СКИ ЭМИ влияет на ширину, а, следовательно, на спектральную плотность мощности импульса, частота следования СКИ ЭМИ и длительность между импульсами СКИ ЭМИ в пакете должны учитываться, как параметры для оценки временной адресности направленной СКИ ЭМИ энергии.

3. Оценка степени влияния по мощности с учетом, спектральных и временных характеристик позволяет более полно произвести оценку.

4. Критерием оценки степени влияния взята динамика изменения количества потерянных пакетов средств ШРД.

5. Разработанный метод оценки степени влияния СКИ ЭМИ на средства ШРД, по оценке энергетических и временных характеристик СКИ ЭМИ и полезного сигнала в точке расположения средства ШРД и оценке поправочных коэффициентов учитывающих адресность направленной энергии с учетом скорости следования символов и несущей частоты полезного сигнала позволяет произвести более полную оценку.

6. Определен иной механизм влияния последовательности пакетов импульсов СКИ ЭМИ при соизмеримой задержке между СКИ ЭМИ импульсами в пакете и периодом несущей частоты полезного сигнала. Анализ оценки степени влияния при таких параметрах, показал более высокие показатели.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЭФФЕКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СКИ ЭМИ НА СРЕДСТВО ШРД

3.1 Выбор и обоснование объекта исследования

В качестве объекта исследования выбрана система широкополосная система беспроводного доступа стандарта IEEE 802.16,. Внешний вид системы изображен на рис. 3.1. В состав системы могут входить базовые и абонентские станции, комплектующиеся антеннами разной диаграммы направленности. При использовании антенны с узкой диаграммой направленности система позволяет организовать беспроводной канал связи на расстоянии порядка 20 км. В данной системе используется распространенная цифровая модуляция OFDM с применением временного разделения прямого и обратного канала, и нескольких дополнительных решений обеспечивающих мобильность связи. Возможно гибкое управление и настройка типов модуляции. В таблице 3.1. указаны более подробные характеристики системы.



Рис.3.1 Внешний вид средства широкополосного радиодоступа (базовая и абонентская станции)

Таблица 3.1

Частотные диапазоны:	2.40 – 2.50 ГГц 5.47 – 5.725 ГГц 5.725 – 5.850 ГГц	
Метод радио доступа	OFDM	
Режим работы	Time Duplex Division	
Ширина канала	20 МГц	
Выходная мощность AU (в порту антенны)	от -10 до 21дБм, с шагом 1 дБ	
Антенны	SU-RA	21dBi, 10.5° в горизонтальной х 10.5° в вертикальной, совместима с EN 302 085, класса TS 1,2,3,4,5
	Секторная антенна	16dBi, 60° в горизонтальной х 10° в вертикальной, совместима с EN 302 085, класса CS 3 17dBi, 90° в горизонтальной х 6° в вертикальной, совместима с EN 302 085, класса CS 3 15dBi, 120° в горизонтальной х 6° в вертикальной, совместима с EN 302 085, класса CS 3
Модуляция	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	
Битовая скорость	3, 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Мбит/с	
Передача данных		
Соответствие стандартам	IEEE 802.3 CSMA/CD	
Поддержка VLAN	IEEE 802.1Q	

Трафик 2 уровня	Мостовое соединение
Безопасность	a. Протокол ассоциации – ESSID
	b. WEP 128
	c. VLAN согласно IEEE 802.1Q
	d. Уровень IP фильтрации для адресов пользователей или протоколов
	e. Определение прав доступа и фильтрация IP адресов для управления
Конфигурация и управление	
Параметры управления	Telnet, использую программу эмуляции монитора
	FTP, использую утилиту upload/download для Windows
	SNMP
Доступ удаленного управления	Через проводную ЛВС или беспроводную связь
Защита доступа управления	a. Многоуровневый пароль
	b. Конфигурация направления удаленного доступа (только из Ethernet сети, только из беспроводного соединения или с обеих сторон)
	c. Конфигурация IP адресов авторизованных станций
Распределение IP параметров	Конфигурируемое или автоматическое (DHCP клиент)
Обновление программного обеспечения	Загрузка через TFTP
Разъемы	
Абонентское устройство	

Модуль	Разъем	Описание
SU-NI	ETH	10/100Base-T Ethernet (RJ-45) , 2 встроенных светодиода
	AC IN	3 контактный разъем входного напряжения
SU-RA	ETH	10/100Base-T Ethernet (RJ-45) , 2 встроенных светодиода
Оборудование модульной Базовой станции		
Модуль	Разъем	Описание
AU-E-BS: AU-BS	ETH	10/100Base-T Ethernet (RJ-45) , 2 встроенных светодиода Кабель для подключения к PC: Кроссовый
		Кабель для подключения к хабу: Прямой
AU-RE	ETH	10/100Base-T Ethernet (RJ-45) , 2 встроенных светодиода Кабель для подключения к PC: Кроссовый
	ANT	Гнездо N - типа , 50 Ом, защищенный от молнии
BS-PS-AC	AC IN	3 контактный разъем входного напряжения
Индикаторы		
Абонентское устройство		
Модуль	Название и Цвет	Описание
SU-NI	Power	Источник питания 54 В пост. Тока

	LINK	Ethernet соединение IDU-ODU
SU-RA	Status	Индикатор самопроверки ODU
	Ethernet	Индикатор Ethernet IDU-ODU
	W-LINK	Активность беспроводной связи
	RSSI	Индикатор силы полученного сигнала (светодиодная 10 разрядная шкала)
Оборудование модульной Базовой станции		
Модуль	Название и Цвет	Описание
AU-E-BS: AU-BS	Power	Обнаружение IDU источника питания
	Alarm	Индикатор тревоги IDU
	Ethernet	Индикатор Ethernet IDU
	Current Consumption	Текущее потребление ODU в пределах допустимого
	Status	Индикатор самопроверки ODU
	ODU Link	Индикатор Ethernet IDU-ODU
	W-LINK	Активность беспроводной связи
AU-RE	Status	Индикатор самопроверки ODU
	ODU Link	Индикатор Ethernet IDU-ODU
	W-LINK	Активность беспроводной связи
BS-PS-AC	54V	Источник питания 54 В функционирует нормально
	3.3V	Источник питания 3,3 В функционирует нормально (в настоящее время не используется в BreezeACCESS)
	OVER TEMP	Индикатор превышения

		температуры в модуле источника питания
Электрические характеристики		
Абонентское устройство		
Модуль	Детали	
Основные	Потребляемая мощность: 25Вт	
SU-NI	Входное напряжение питания: 85-256В перем. тока, 47-63 Гц	
SU-RA	54 В (пост) от внутреннего модуля через EТН кабель	
Оборудование модульной Базовой станции		
Модуль	Детали	
Основные	Потребляемая мощность: 240 Вт максимум для полностью оборудованного шасси (1 PS, 6 AU)	
BS-PS-AC	Входное напряжение перем. тока: 85-256В, 47-65 Гц, Выходное напряжение пост. тока: 54В; 3.3В	
BS-AU	3.3В, 54В от модуля (ей) питания через соединительную плату	
AU-RE	54 В (пост) от внутреннего модуля BS-AU через EТН кабель	
AU-BS (BS-AU модуль плюс AU-RE наружный модуль)	Потребляемая мощность: 30Вт	
Механические характеристики		
Абонентское устройство		
Модуль	Размеры	Структура
SU-NI	15.4x8.4x5.6 см	Металлическая коробка,

		устанавливаемая на стене или рабочем столе.
SU-RA	30x30x7.2 см	Металлическая коробка плюс интегрированная антенна в пластмассовом корпусе, устанавливаемая на мачте или стене
Оборудование модульной Базовой станции		
Модуль	Размеры	Структура
BS-SH	13 x 48.2 x 25.6 см	Предназначен для установки в 19" (3U) стойке или на столе
BS-PS-AC	12.9 x 7 x 25.3 см	Модуль питания от сети переменного тока
BS-AU	13 x 3.5 x 105 см	Внутренний модуль устройства доступа AU-BS
Условия окружающей среды		
Рабочая температура	Indoor модули:	от 0° C до 40° C
	Outdoor модули:	от -40° C до 55° C
Рабочая влажность	Indoor модули:	от 5% до 95%, без конденсата
	Outdoor модули:	от 5% до 95%, Outdoor модуль защищен от непогоды
Согласие со стандартами		
ЭМС	FCC часть 15 класс BCE EN55022 класс B	
Безопасность	UL 1950, EN 60950	
Защита от молнии (Антенна и IF соединения)	61000-4-5, Класс 3 (2КВ)	

Окружающей среды	Работа	ETS 300 019 части 2-3 класс 3.2E для внутреннего модуля
		ETS 300 019 части 2-4 класс 4.1E для наружного модуля
	Транспортировка	ETS 300 019-2-2 класс 2.3
	Хранение	ETS 300 019-2-1 класс 1.2E

3.2 Характеристики комплекса воздействия СКИ ЭМИ на средство ШРД

В данной работе в качестве КВ СКИ ЭМИ рассматривается опытный образец «комплекса воздействия сверхкороткоимпульсного электромагнитного излучения», разработанного ОАО «МНИРТИ». Данный комплекс является многоканальным, излучающая система с изменяемыми параметрами формирует в пространстве направленное СКИ ЭМИ. Особенностью данной системы является гибкость управления с возможностями изменения напряженности излучаемого СКИЭМИ, синхронизации всех каналов, формирования задержек между каналами и группами каналов. В комплексе реализовано 64 независимых излучающих канала, которые могут генерировать импульсы как синхронно, так и по выставленным оператором правилам. Каждый из 64 излучающих каналов реализован для излучения антенным модулем, состоящим из сборки генератора и ТЕМ-антенного рупора. Каждый антенный модуль в свою очередь дифференцирован четырьмя синхронными каналами излучения.

Основные характеристики комплекса приведены в Таблице 3.2.

Таблица 3.2

1	Количество каналов излучения	64
2	Частота повторения выходных импульсов запуска	От 1 до 12,5 МГц
4	Параметры выходных импульсов: <ul style="list-style-type: none"> • Амплитуда • Длительность 	550 В x 4 0,15 – 0,25 нс
5	Шаг подстройки задержки выходных импульсов запуска	0,01 нс
7	Параметры FOM (напряженность поля на метре от установки): <ul style="list-style-type: none"> • Одна из 64 ячеек, не менее • Суммарно 64 ячейки, не менее 	1,6 кВ 100 кВ
9	Способ управления системой (Дистанционный, с помощью управляющего ПК, с адаптером USB с оптическим выходом и удовлетворяющего следующим требованиям:	<ul style="list-style-type: none"> • ОС – Windows XP/7 • Core I3, I5, I7 • ОЗУ – 1024 Мб • HDD – свободное место на диске не менее 1 Гб
	Ширина диаграммы направленности излучающего модуля, не более град <p style="text-align: right;">по вертикали</p> <p style="text-align: right;">по горизонтали</p>	<p style="text-align: right;">± 20</p> <p style="text-align: right;">± 20</p>
10	Тип интерфейса связи	«Оптическая пара»

11	Режимы генерации выходных импульсов запуска	1) Непрерывный на фиксированной частоте. 2) Непрерывный на фиксированной частоте с межканальной модуляцией задержки 3) По заданной пользователем последовательности и импульсов.
12	Питание: • Переменное напряжение • Мощность потребления, не более	380 В 30 кВт
13	Рабочий интервал температур	-10 – +30 °С
14	Тип соединительных разъемов	TNC
15	Тип оптических разъемов	SC

Следует отметить, что данная система позволяет сгенерировать поле с возможностью регулирования FOM, с шагом 1,6 кВ, включая необходимое число синхронизированных каналов. При включении всех каналов одновременно при их синхронизации происходит пространственное сложение FOM, а следовательно и напряженности поля, максимальная частота следования импульсов при этом будет 12,5 МГц. Имеется возможность увеличения частоты следования импульсов за счет последовательного включения групп модулей, при этом напряженность поля в заданной точке будет уменьшено в

пропорциональное количество этих групп, а частота следования увеличится во столько же раз. Таким образом, частота повторения $f_{результ}$ импульсов при последовательном включении каждого из модулей рассчитывается по формуле (3.1):

$$f_{результ} = N_m * f_{след}, \quad (3.1)$$

где N_m – число синхронизированных групп модулей, $f_{след}$ – частота следования задаваемая системой управления (макс 12,5 МГц). Максимальная частота при этом будет равна $f_{результ макс} = 64 * 12,5 = 800$ МГц,

При этом FOM комплекса рассчитывается по формуле (3.2):

$$FOM_{результ} = FOM_{64}/N_m, \quad (3.2)$$

где FOM_{64} показатель при синхронном включении всех 64 модулей комплекса. При максимальной частоте 800МГц $FOM_{результ} = 100кВ / 64 \approx 1,5кВ$

На рис. 3.2 изображен антенный модуль комплекса, состоящий из генератора формирующего выходной импульс по четырем синхронизированным ТЕМ – рупорам. На рис. 3.3 изображена сборка из 64 антенных модулей [55,56].

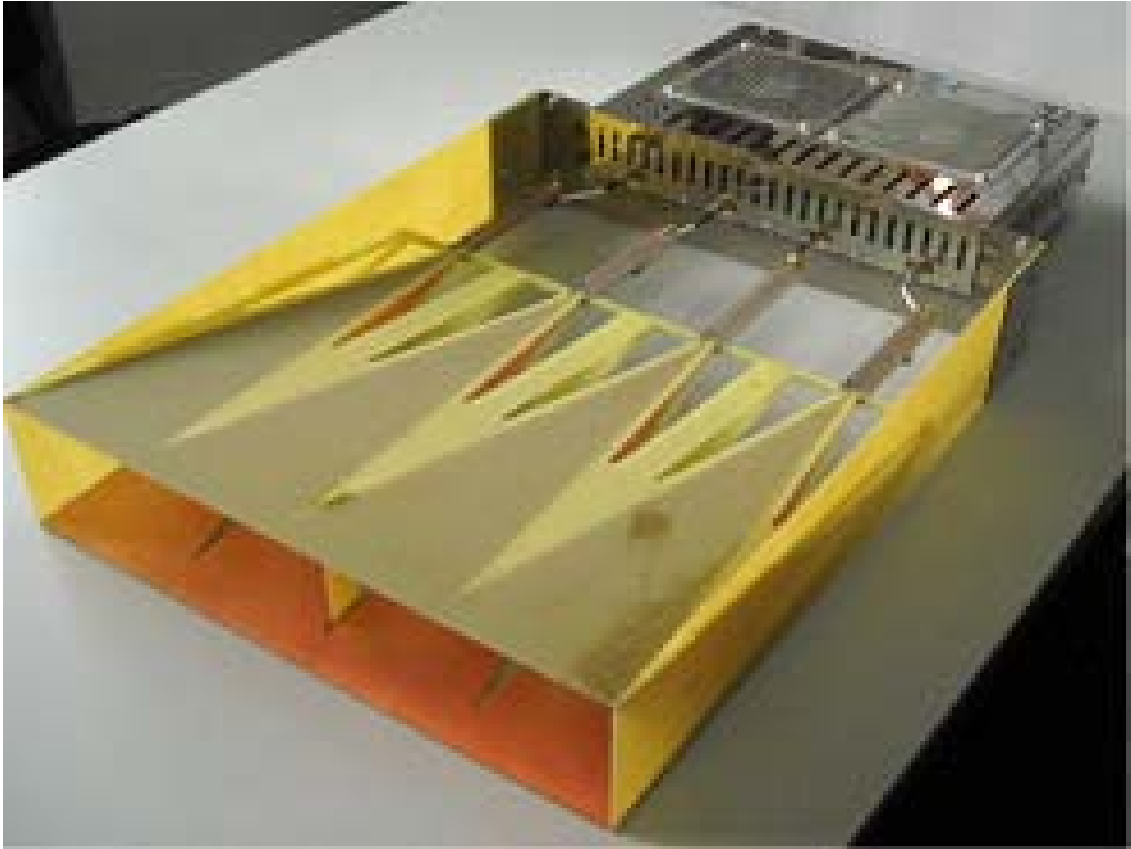


Рис. 3.2. Антенный модуль комплекса



Рис. 3.3. Сборка из 64 антенных модулей.

3.3 Анализ влияния СКИ ЭМИ при различной символьной скорости модуляции полезного сигнала

Рассмотрим механизмы влияния СКИ ЭМИ на средства ШРД с разной скоростью модуляции несущей частоты. Скорость модуляции, иными словами, символьная скорость может быть искусственно понижена в средствах беспроводной передачи данных путем применения многопозиционной модуляции, например QAM-16, где при передаче одного символа передается 4 бита данных, либо путем формирования нескольких параллельных потоков данных, которые модулируются на несколько несущих частот, символьная скорость при этом снижается в то же количество раз, сколько было сформировано потоков, либо с одновременным применением этих методов. Сигналы модулированные низкой символьной скоростью обладают более высокой помехоустойчивостью. Низкая символьная скорость делает возможным использование защитного интервала между символами, что позволяет справляться с временным рассеянием и устранять межсимвольную интерференцию. Существуют средства беспроводной передачи данных, которые обладают ОС, с гибким саморегулированием скорости передачи данных, изменением типа модуляции при ухудшении условий приема. Как правило, при ухудшении условий приема автоматически меняется тип модуляции, к примеру, происходит переход от 16-QAM к QPSK, снижается скорость потока передаваемой информации. Данная мера предохраняет такие системы беспроводной связи от полной потери связи, при этом сохраняется канал передачи данных, но со сниженной пропускной способности.

Модулированные сигналы с высокой символьной скоростью модуляции обладают высокой плотностью загрузки несущей частоты во времени, тем самым каждый передаваемый символ

промодулирован на несущую частоту таким образом, что на каждый символ приходится всего несколько целых периодов несущей частоты. Таким образом при воздействии единичными импульсами СКИ ЭМИ следующими с частотой сопоставимой с символьной скоростью модуляции эффект будет тем выше, чем меньше будет приходится полных периодов несущей частоты на один символ полезного сигнала. При этом для приблизительной оценки степени воздействия по временному признаку будет более актуальна формула (2.19), чем (2.20), хотя конечно же при добавлении дополнительных импульсов к пакету СКИ ЭМИ степень влияния возрастет, но не значительно.

Модулированные сигналы с низкой символьной скоростью модуляции обладают низкой плотностью загрузки несущей частоты во времени, тем самым каждый передаваемый символ может быть промодулирован на несущую частоту таким образом, что на каждый символ будет приходится несколько порядков целых периодов несущей частоты. Таким образом при воздействии единичными импульсами СКИ ЭМИ следующими с частотой сопоставимой с символьной скоростью модуляции эффект будет тем ниже чем больше будет приходится полных периодов несущей частоты на один символ полезного сигнала. При этом для приблизительной оценки степени воздействия по временному признаку будет ключевой формула (2.20), чем (2.19). Здесь степень влияния можно эффективно повысить формированием пакетов импульсов СКИ ЭМИ, чем большее количество таких импульсов будет сформировано на расстоянии сравнимом с периодом несущей частоты, тем большая степень влияния будет наблюдаться на средство ШРД.

Таким образом, при анализе степени влияния СКИ ЭМИ на средства ШРД следует учитывать в первую очередь каково отношение

символьной скорости средства ШРД к несущей частоте передаваемого сигнала. При соизмеримости скорости следования пакетов СКИ ЭМИ с символьной скоростью модуляции несущей частоты, наличия пакетов импульсов СКИ ЭМИ с количеством, необходимым для перекрытия части последовательных периодов несущей частоты полезного сигнала при расположении этих символов на расстоянии соизмеримом с периодом несущей частоты степень влияния будет максимальной.

При несущей частоте $f_{нес} \ll 1/\tau$, где τ длительность импульса СКИ ЭМИ, следует отметить возможный низкий эффект влияния одиночных СКИ ЭМИ импульсов даже при высокой символьной скорости и для повышения степени влияния так же следует формировать пакеты импульсов на расстоянии соизмеримом с периодом несущей частоты.

Следует так же рассмотреть возможное блокирование полезного сигнала при превышении уровня помехи требуемых в приемном устройстве значений. Это проявляется в уменьшении его коэффициента усиления во входном тракте приемника или в изменении отношения сигнал-шум при действии мешающего сигнала, частота которого находится вне основного канала приема [82].

Чтобы характеризовать свойство приемника принимать полезный сигнал в присутствии сильного мешающего сигнала до порога блокирования, пользуются понятием «динамический диапазон по блокированию» (в децибелах);

$$D = 20 \lg \frac{U_{\text{бл}}}{U_{\text{мин}}}, \quad (3.1)$$

где $U_{\text{бл}}$ — максимально допустимое напряжение мешающего сигнала соответствующее порогу блокирования; $U_{\text{мин}}$ — минимальное

напряжение полезного сигнала, соответствующее чувствительности приемника.

Блокирование полезного сигнала, в том числе импульсного, наиболее ощутимо, если мешающий сигнал непрерывный. Степень блокирования полезного сигнала интенсивным импульсным сигналом зависит не только от мощности этого сигнала, но и от времени его действия, что подтверждает необходимость формирования пакетов импульсов.

Схематично влияние последовательности пакетов СКИ ЭМИ импульсов на средства ШРД с различной символьной скоростью модуляции и различной несущей частотой изображено на рис.3.4.

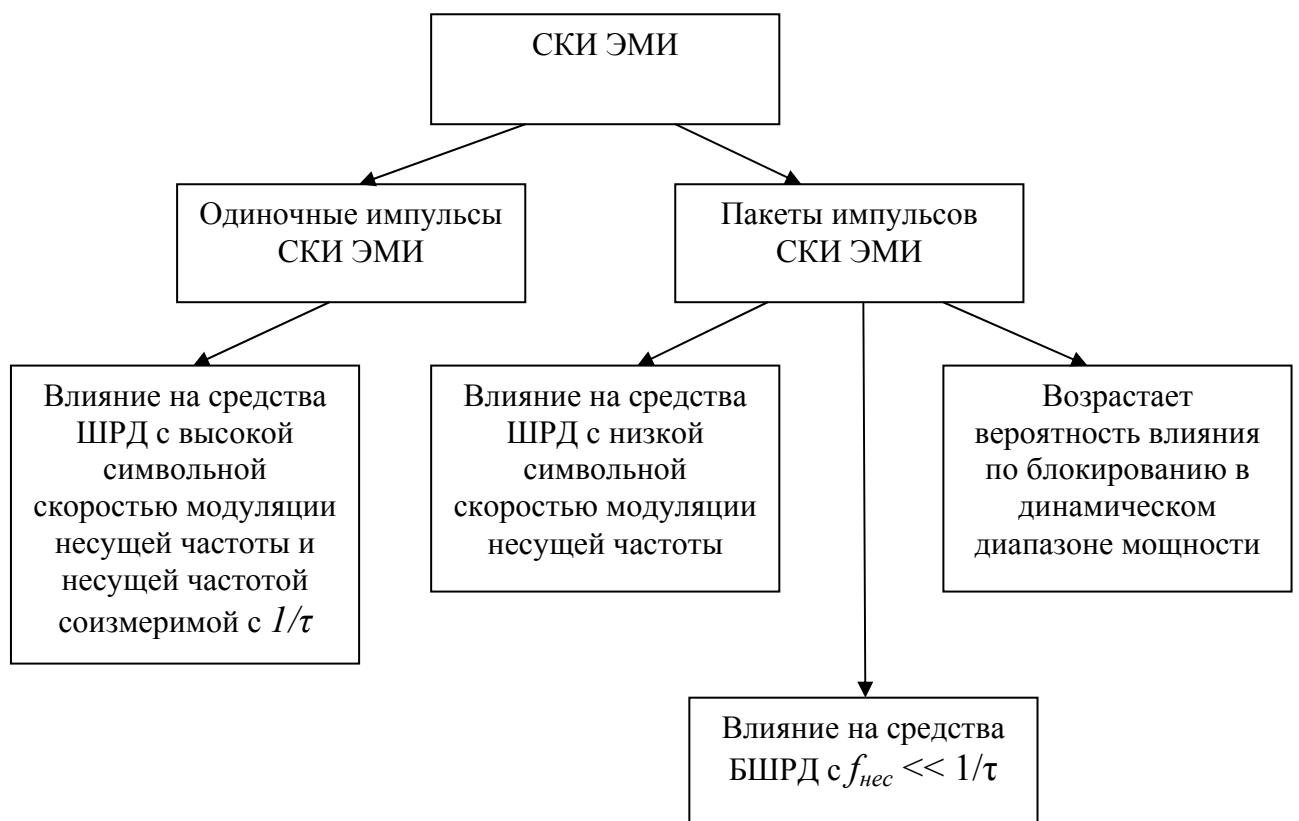


Рис.3.4 Сравнительное влияние одиночных и пакетов импульсов СКИ ЭМИ.

Таким образом, формирование пакетов СКИ ЭМИ импульсов оказывает большее влияние при воздействии на средства ШРД в

целом. При тех же энергетических затратах на формирование, к примеру частоты следования импульсов СКИ ЭМИ в 2 раза большей мы можем сформировать пакет из 2 импульсов без увеличения общей частоты следования, степень влияния при этом будет выше.

3.4 Метод, обеспечивающий эффективное воздействие СКИ ЭМИ на средства ШРД на основе выбора параметров последовательности импульсов

Рассматриваемое нами средство излучения СКИ ЭМИ обладает характеристикой $FOM = 100$ кВ/м, и максимальной частотой повторения импульсов порядка 10 МГц. Многоканальность данного средства позволяет генерировать пакеты импульсов, которые могут следовать с той же частотой. Временной промежуток между импульсами может быть выставлен практически любой. Особенность средства излучения СКИ ЭМИ такова, что при работе в пакетном режиме напряженность поля в точке будет меньше в то же количество раз, что и генерируемое количество импульсов на один пакет [48,87].

3.4.1 Определение перечня характеристик средства ШРД и средства СКИ ЭМИ для расчета

Для примера рассмотрим следующие входные характеристики:

несущая частота - 2.4 ГГц

R - скорость передачи данных - 54Мбит/с

n – количество бит на символ (64-QAM) - 6

P - выходная мощность - 21дБм (0,13 Вт)

G - усиление антенны - 15 дБи (32)

Δf - ширина спектра – 20 МГц

$N_{уст}$ - количество несущих частот (согласно стандарту WirelessMAN) - 128

$r_{ски}$ - расстояние от комплекса СКИ ЭМИ до средства ШРД - 1 км

$r_{уст}$ - расстояние от средства ШРД до базовой станции - 5 км

$f_{ски}$ - частота следования СКИ ЭМИ - 1 МГц

3.4.2 Определение символьной скорости модуляции ШРД

Символьная скорость модуляции несущей частоты определяется ранее приведенной формулой (2.3)

$$f_c = \frac{R}{n * N_{уст}}$$

где R - валовой битрейт, $N_{уст}$ – количество несущих частот, n – количество бит на символ.

$$f_c = \frac{54 * 10^6}{6 * 128} = 70312 \text{ Гц}$$

С такой символьной скоростью одновременно модулируется массив из 128 несущих частот.

3.4.3 Определение необходимого количества импульсов СКИ ЭМИ в пакете.

Учитывая низкую символьную скорость отличающуюся на 6 порядков необходимо уделять внимание формированию пакетов импульсов. В нашем случае с периодом несущей частоты соизмеримой с периодом колебания импульса СКИ ЭМИ минимальное количество импульсов можно определить количеством 2, и далее при анализе расчета и экспериментальном исследовании определить динамику изменения степени влияния при увеличении их количества.

3.4.4 Расчет величины FOM комплекса СКИ ЭМИ для эффективного воздействия

Для ожидаемого эффекта воздействия примем $K_{общ} = 1$, используя формулу (2.22) учитывающую спектральные плотности энергий исследуемых устройств:

$$K_{эн} = \frac{(FOM r_{уст} \tau)^2 N_{ски} f_{ски} \Delta f_{уст}}{30 P G r_{ски}^2}$$

получаем:

$$FOM1 = \frac{r_{ски}}{r_{уст} \tau} \sqrt{\frac{30PG}{N_{ски} f_{ски} \Delta f_{уст}}} \quad (3.3)$$

Принимая данные в параграфе 3.4.1 и получаем:

$$FOM1 = \frac{1000}{5000 * 150 * 10^{-12}} \sqrt{\frac{30 * 0,13 * 100}{2 * 10^6 * 20 * 10^6}} \approx 4,7кВ$$

При увеличении количества символов СКИ ЭМИ необходимая величина FOM будет уменьшаться пропорционально квадратному корню количества символов СКИ.

При формировании пакета СКИ ЭМИ импульсов с межимпульсным интервалом соизмеримым с периодом несущей частоты $\Delta t \approx 1/f_{нес}$ для расчета необходимой величины FOM, следует воспользоваться формулой (2.23), а с учетом ограниченной мощности ввести коэффициент $B = 128$. Таким образом, получаем приблизительную оценку FOM, при тех же исходных данных, но при воздействии пакетов импульсов СКИ ЭМИ с $\Delta t \approx 1/f_{нес}$:

$$FOM2 = \frac{r_{ски} \sqrt{30PGB}}{r_{уст} \sqrt{\tau N_{ски} f_{ски}}} \quad (3.4)$$

$$FOM2 = \frac{1000 \sqrt{30 * 0,13 * 100 * 128}}{5000 * \sqrt{150 * 10^{-12} * 2 * 1000000}} \approx 2,6кВ$$

Следует учесть, что FOM1 и FOM2 отражают величину без учета коэффициента поляризации прочих коэффициентов ослаблений и не учитывают зависимости от временной адресности. Временная адресность будет рассмотрена в следующем параграфе.

3.4.5 Анализ временной адресности СКИ ЭМИ импульсов

Анализ временной адресности СКИ ЭМИ импульсов проводится применением формулы (2.20):

$$K_{пакет} = \frac{N_{ски} f_{симв} + f_{ски}}{f_{нес}}$$

Данная формула применима как поправочный коэффициент для расчета как FOM1, так и FOM2.

При рассмотренных в предыдущем параграфе данных и принимая $N_{ски} = 2$, $K_{пакет} = 4,75 * 10^{-3}$

Для максимальной эффективности FOM должно быть увеличено в $\sqrt{1/K_{пакет}}$, в нашем случае, приблизительно в 14 раз. Следует отметить, что поправка по временной адресности условна, она лишь учитывает соотношение количества импульсов в пакете и количества периодов несущей частоты с соотношением длительностей временных промежутков между символами и длительностью одного периода несущей частоты. Приемная аппаратура не идеальна и она может ухудшить свои характеристики без 100 % перекрытия несущих частот по времени, либо из-за не симметричности первого и второго полупериода импульса СКИ ЭМИ не воспринимать импульсы от установки с расчетным FOM. Данная формула полезна для проведения экспериментальных исследований и оценки минимально требуемого количества символов в пакете в ряде условий.

3.5 Алгоритм формирования последовательности импульсов СКИ ЭМИ, обеспечивающей эффективное воздействие

Алгоритм применим к рассматриваемому в данной работе комплексу СКИ ЭМИ содержащий 64 канала излучения с FOM = 1600В/м каждый. При синхронизации всех каналов излучения происходит сложение напряженностей поля от каждого элемента таким образом, что суммарная величина FOM всего комплекса составляет порядка 100кВ/м.

Алгоритм отражает принцип управления рассматриваемым комплексом СКИ ЭМИ в целях генерации последовательности импульсов СКИ ЭМИ для эффективного воздействия на средства ШРД [88]. Определен механизм гибкого использования

многоканального ресурса комплекса начиная от приоритета с высокой заполненностью импульсов СКИ ЭМИ во временной области до приоритета высокой импульсной мощности. Определен механизм оценки напряженности поля на расстоянии от комплекса СКИ ЭМИ.

Алгоритм может применяться оператором для выставления задающих параметров работы комплекса вручную, а также для перспективной разработки программной оболочки управления комплексом.

Алгоритм предусматривает обработку первичных данных включающих характеристики ШРД, расстояния между средствами ШРД, средством ШРД и комплексом излучения (рис 3.5). На выходе обработки первичных данных формируются требуемые параметры СКИ ЭМИ поля. Требуемые параметры СКИ ЭМИ поля обрабатываются алгоритмом формирования задающих параметров для комплекса (рис. 3.6, рис. 3.7).

Требуемые параметры СКИ ЭМИ поля:

$f_{след}$ – результирующая частота следования импульсов (пакетов)

$N_{ски}$ – число импульсов в пакете

FOM_{mp} – требуемый энергопотенциал станции

Параметры настройки комплекса:

$f_{ген}$ - частота задающего генератора комплекса

Δt – задержка между группами каналов (импульсами в пакете)

n – число синхронизированных групп (64/n – число модулей в группе)

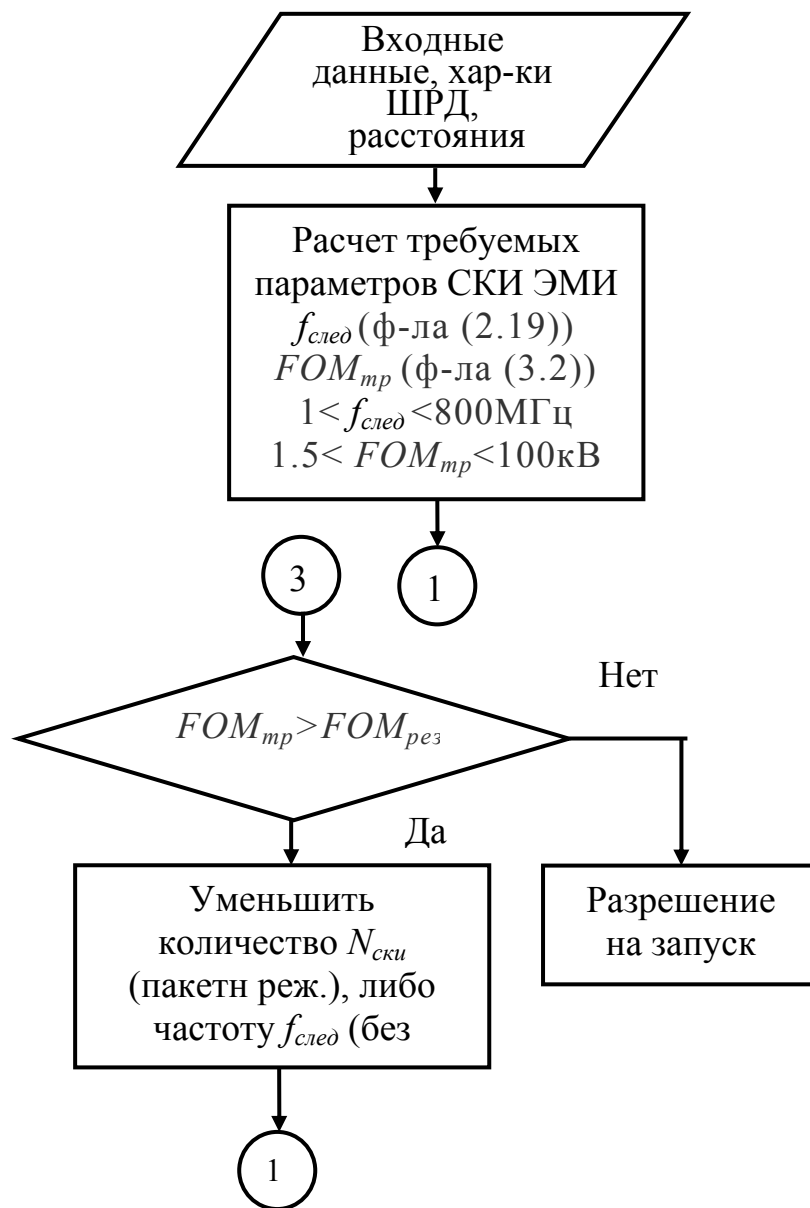


Рис. 3.5. Блок – схема алгоритма первичной обработки данных.

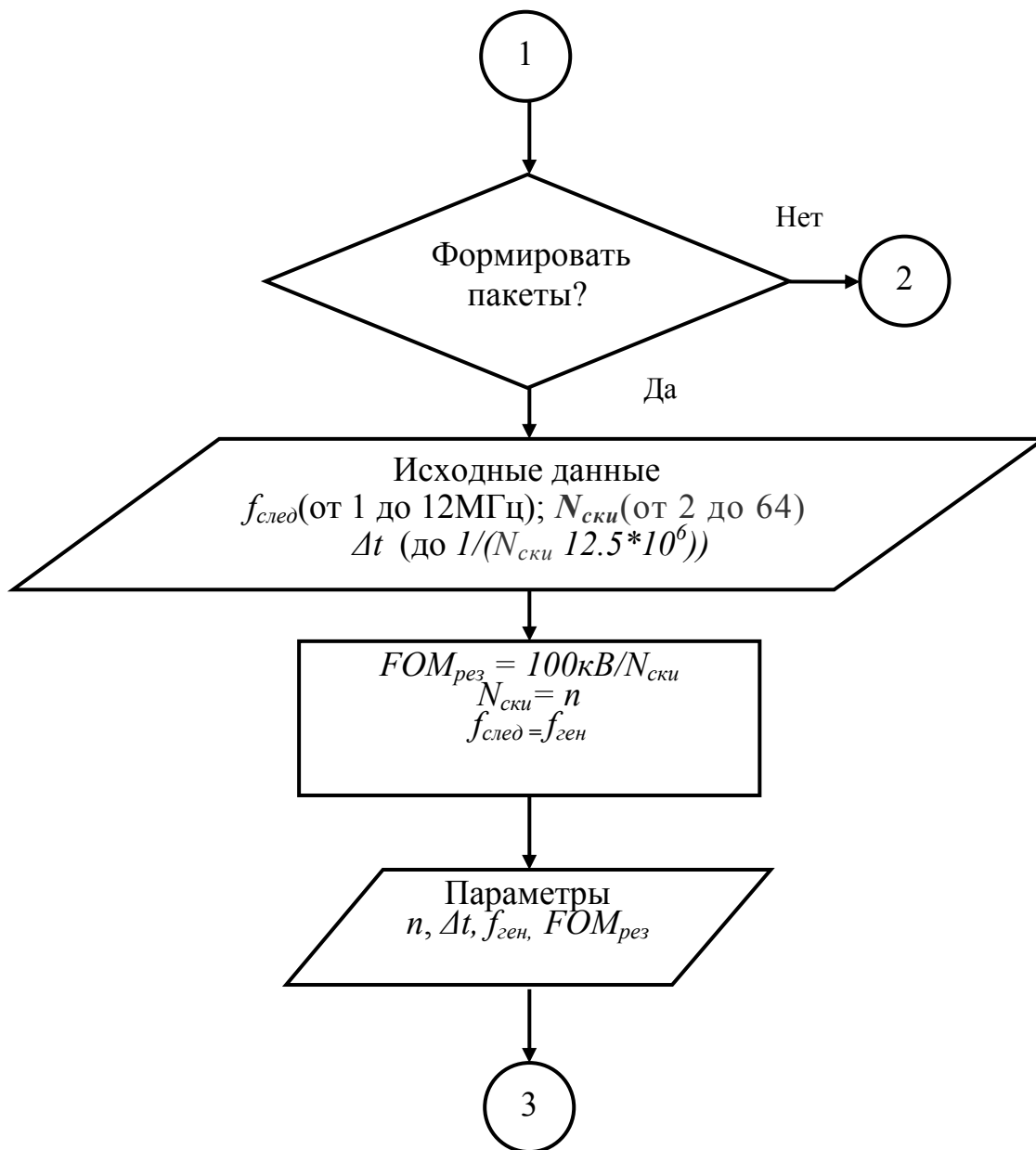


Рис. 3.7. Блок - схема алгоритма ветви определения характера излучения и формирования пакетов.

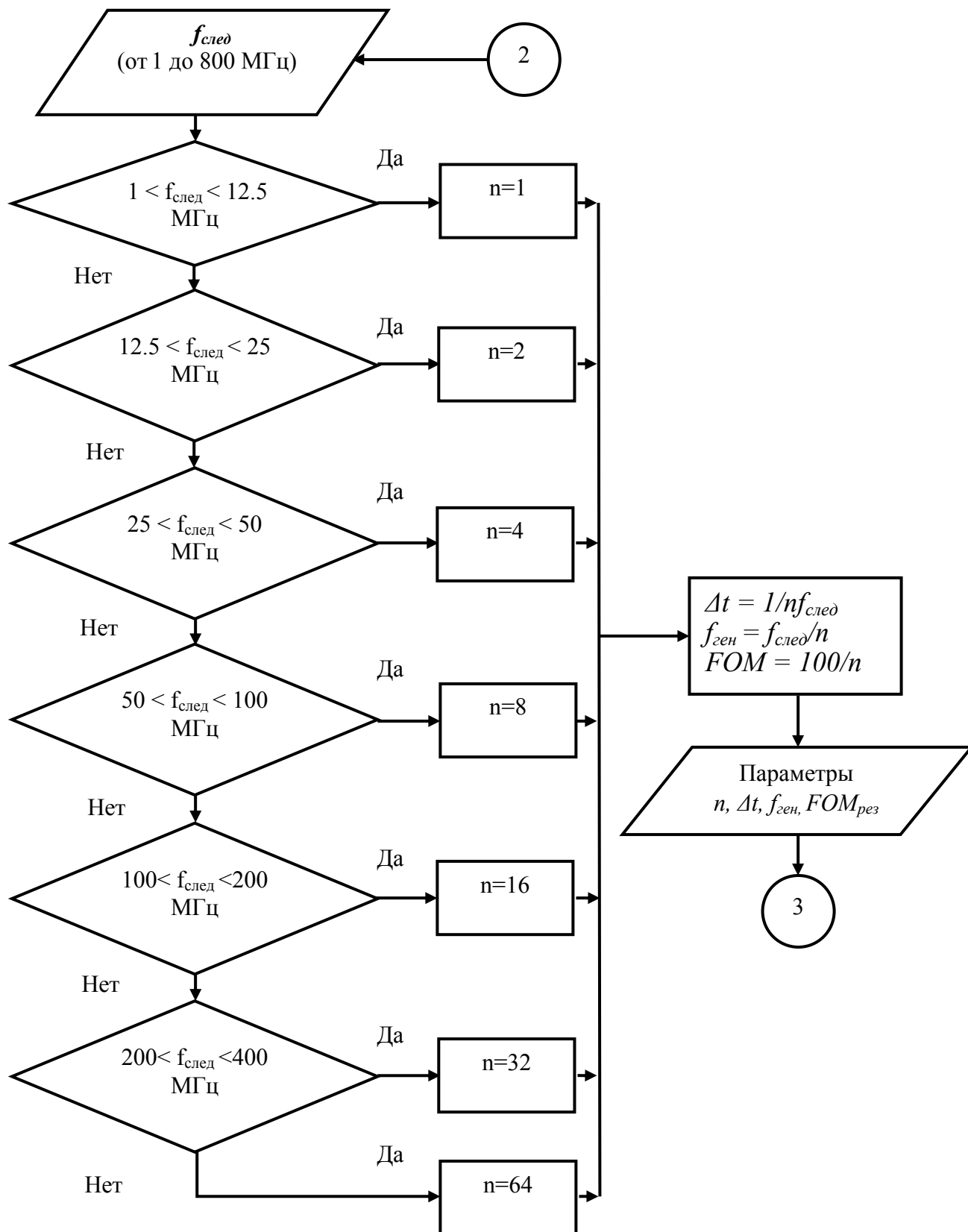


Рис. 3.6. Блок - схема алгоритма ветви формирования частоты излучения

3.6 Оценка эффективности воздействия СКИ ЭМИ на средство ШРД

Исходя из выше изложенного ориентировочную оценку степени влияния следует производить с использованием следующих формул:

(2.22) при $\Delta t \gg 1/f_{нес}$

$$K_{эсп} = \frac{(FOM r_{уст} \tau)^2 N_{ски} f_{ски} \Delta f_{уст}}{30 P G r_{ски}^2}$$

(2.23) при $\Delta t \approx 1/f_{нес}$

$$K_{эн} = \frac{(FOM r_{уст})^2 \tau N_{ски} f_{ски}}{30 P G B r_{ски}^2},$$

Дополнительная оценочная формула (2.24), учитывающая временную адресность:

$$K_{пакет} = \frac{N_{ски} f_{симв} + f_{ски}}{f_{нес}}$$

Анализ формул показывает, что увеличение числа импульсов в пакете более эффективно при сопоставимом кратном увеличении частоты в том случае, если символьная скорость будет больше чем частота следования импульсов СКИ ЭМИ, напротив, при символьной скорости меньшей, чем частота следования импульсов СКИ ЭМИ, предпочтительней кратно увеличивать частоту следования пакетов.

При формировании пакетов с импульсами, отстоящими друг от друга на расстоянии соизмеримыми с несущей частотой, выигрыш в степени влияния составляет величину пропорциональную отношению ширины спектра СКИ ЭМИ к ширине спектра полезного сигнала.

Выводы по главе 3

1. Анализ цифровых видов модуляций и сопоставление пакетного режима генерации импульсов СКИ ЭМИ показал

преимущество при определенных условиях такого вида воздействия с точки зрения эффективности.

2. Разработанный метод определения параметров СКИ ЭМИ для воздействия на средство ШРД позволяет рассчитать необходимую характеристику *FOM* комплекса излучения СКИ ЭМИ и временные характеристик последовательности СКИ ЭМИ для эффективного воздействия на требуемом расстоянии.

3. Пример расчета параметров последовательности СКИ ЭМИ на основе использования характеристик рассматриваемых устройств продемонстрировал более низкую величину требуемого энергопотенциала комплекса излучения СКИ ЭМИ.

4. Разработанный алгоритм формирования последовательности импульсов СКИ ЭМИ позволяет расширить характеристики КВ СКИ ЭМИ по частоте следования импульсов до 800 МГц, а так же сформировывать последовательности импульсов до 64 в пакете.

5. Сформирован ряд оценочных выражений, который позволит определять степень влияния последовательности СКИ ЭМИ на средство ШРД.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ СКИ ЭМИ НА СРЕДСТВО ШРД

4.1 Разработка методики проведения экспериментальных исследований.

Целью эксперимента является определение и сопоставление степени влияния последовательности СКИ ЭМИ на средство ШРД и других типов связи в зависимости от изменения временных параметров следования импульсов при неизменных энергетических характеристиках поля СКИ ЭМИ.

4.1.1 Порядок проведения испытаний

Для оценки воздействия СКИ ЭМИ необходимо:

- определить зависимость изменения рабочих характеристик исследуемых объектов от характеристик воздействующего поля;
- обеспечить требуемые параметры излучения на малых расстояниях исследования;
- обеспечить защиту системы диагностики и средства ШРД образующего канал связи с испытуемым средством ШРД, от воздействия СКИ ЭМИ поля [17].

Контрольно измерительная аппаратура (КИА) включает в себя:

- средство измерения уровней напряженности СКИ ЭМИ поля и его временных характеристик;
- средства оценки относительных показателей функционирования исследуемых устройств;
- средства обработки результатов;
- средства управления комплексом воздействия СКИ ЭМИ поля.

Средством измерения СКИ ЭМИ поля служит преобразователь напряженности импульсного электрического поля измерительный

ИППЛ-Л [58] с линией связи в комплекте и осциллограф цифровой с диапазоном измерения не ниже 13ГГц.

Средства оценки относительных показателей функционирования исследуемых устройств предусматривают специальное программное обеспечение для проведения нагрузочного тестирования канала связи [37], установленное на персональный компьютер (ПК). В определенных случаях относительные показатели функционирования исследуемых устройств возможно штатными средствами исследуемых устройств, а так же органолептическими методами. В качестве средства обработки результатов может использоваться специальное программное обеспечения для проведения нагрузочного тестирования, позволяющее формировать временные протоколы и усредненные показатели.

При проведении оценки воздействия СКИ ЭМИ поля, обеспечение оперативного и гибкое изменение параметров воздействующего поля, проводится с помощью ПК со специальным программным обеспечением (СПО).

Структурная схема диагностической системы представлена на рисунке 4.1

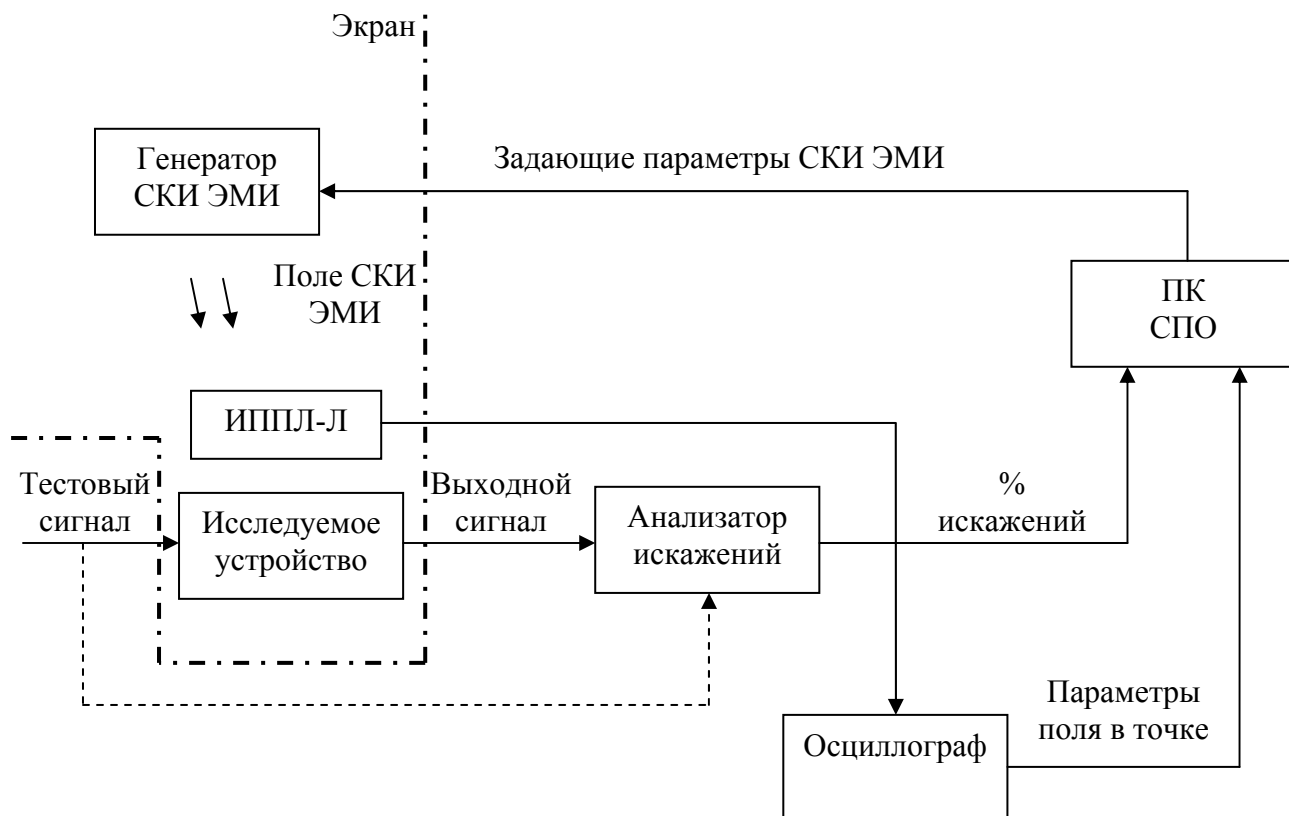


Рисунок 4.1 Структурная схема диагностической системы

Объекты испытаний: средства организации каналов радиосвязи связи.

Целью испытаний является оценка степени влияния последовательности СКИ ЭМИ на объекты испытаний.

Задачи испытаний - определение влияния характеристик последовательности СКИ ЭМИ на изменение параметров функционирования каналов радиосвязи с целью формирования эффективной последовательности СКИ ЭМИ.

Для проведения испытаний используются:

- многоканальный комплекс излучения СКИ ЭМИ (КВ СКИ ЭМИ) и элементы из состава контрольно-измерительной аппаратуры амплитудно-временных параметров комплекса;

- средства радиосвязи, рабочие частоты которых лежат в пределах диапазона частот от 0,03 до 3 ГГц, включая средства ШПС связи;

- специальное программное средство измерения скорости в сетях передачи данных.

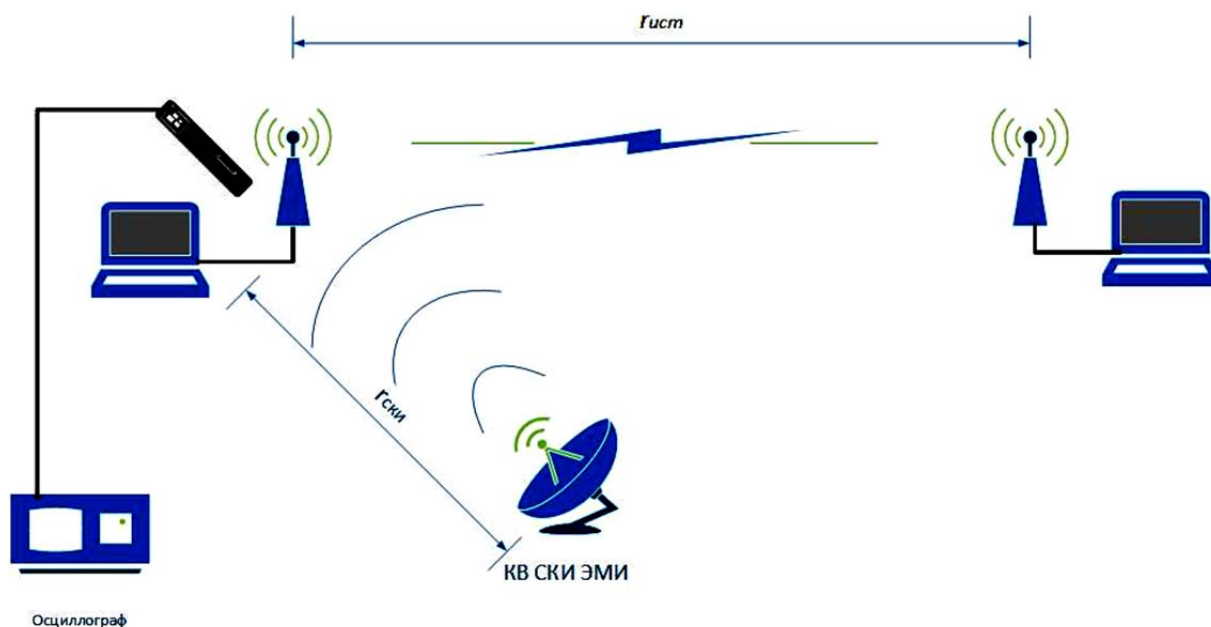


Рис.4.2 Схема проведение экспериментальных исследований влияния СКИ ЭМИ на средства радиосвязи.

Организовывается канал связи между средствами радиосвязи, которые расположены на расстоянии $r_{уст}$ друг от друга. Комплекс СКИ ЭМИ располагается на расстоянии $r_{ски}$ от приемного средства радиосвязи, в случае организации дуплексного канала передачи данных приемным можно считать любое из средств. При тестировании канала передачи данных к средству ШРД не подверженному воздействию СКИ ЭМИ подключается ПК с программой нагрузочного тестирования канала передачи данных. К средству ШРД подверженному воздействию СКИ ЭМИ подключается ПК с необходимыми настройками для ответа на направляемый тестовый трафик.

Испытания выполняются в три этапа.

На первом этапе расчетным путем определяются такие условия, при которых формула (2.22) принимает значение приблизительно равное 1. С помощью диагностической системы (рис.4.1) и согласно схемы проведения эксперимента (рис. 4.2) создаются необходимые параметры по FOM, частоте следования СКИ ЭМИ и расстояниями до объектов (рис. 4.2).

Производится измерение параметров организованного канала без воздействия поля СКИ ЭМИ:

- процент потерянных пакетов;
- скорость канала связи.

При испытании каналов передачи голосовой информации:

- органолептическая оценка разборчивости речи.

На втором этапе проводится увеличение скорости следования СКИ ЭМИ импульсов в 2 раза при воздействии сверхкоротких электромагнитных импульсов, но при сохранении всех параметров указанных в первом этапе. Производятся замеры тех же показателей.

На третьем этапе проводится увеличение количества импульсов в пакете следования СКИ ЭМИ импульсов с 1 до 2 при воздействии сверхкоротких электромагнитных импульсов, но при сохранении всех параметров указанных в первом этапе. Производятся замеры тех же показателей.

Полученные результаты фиксируются.

Следует отметить, что в случае полного блокирования канала уже при экспериментах на первом этапе необходимо уменьшить величину FOM комплекса излучения до такого значения, при котором будет наблюдаться минимальное ухудшение характеристик канала. И последующие этапы эксперимента необходимо проводить отталкиваясь от этих значений.

Значения следует фиксировать в таблице по форме таблицы 4.1

Таблица 4.1

Эксперимент № ____			
FOM , В	$f_{ски}$, МГц	$r_{ски}$, М	$r_{ист}$, М
Исследуемое средство	Характер влияния, процент потерянных пакетов, (скорость канала связи)		
	Воздействие с $f_{ски}$	Воздействие с $2f_{ски}$	Воздействие с $N_{ски} = 2, \Delta t \approx 1/f_{нес}$

Для контроля величины энергетического потенциала FOM оценивается величина напряженности электрического поля СКИ ЭМИ излучаемая комплексом. Зная расстояние от точки измерения до комплекса и измеренную напряженность, FOM рассчитывается согласно (2.13).

Напряженность электрического поля определяется по зарегистрированным осциллограммам амплитуды импульса напряжения на входе преобразователя напряженности импульсного электрического поля измерительного (ИППЛ-Л) и рассчитывается по формуле

$$E = U_{oc} / K_{np},$$

где E – напряженность импульсного электрического поля;

U_{oc} – амплитуда импульса напряжения на входе осциллографа;

$K_{пр}$ – коэффициент преобразования измерительного преобразователя ИППЛ-Л, согласно руководству по эксплуатации на преобразователь.

Эксперимент проводился в нормальных климатических условиях, соответствующих требованиям ГОСТ 15150. Параметры окружающей среды должны удовлетворять следующим требованиям:

- температура окружающего воздуха, °С 20±5
- относительная влажность, %, не более 80
- атмосферное давление, кПа 87-

107

- напряжение питающей электросети, В 220±22
- частота, Гц 50±1

Отношение спектральных плотностей энергий маскирующей заградительной помехи и сигнала в точке расположения средства ШРД, при котором проводится экспериментальное исследование, необходимо рассчитывать по формуле (2.22) принимая $K_{общ} = 1$. Исходя из этого определяется граничное значение FOM комплекса излучения СКИ ЭМИ при фиксированных расстояниях между средствами беспроводной связи и расстоянием от комплекса до средства связи в точке приема по формуле (3.3):

$$FOM = \frac{r_{СКМ}}{r_{ист} \tau} \sqrt{\frac{30PG}{N_{ски} f_{ски} \Delta f_{ист}}}$$

Проверка воздействия СКИ ЭМИ на линии радиосвязи проводится в соответствии со схемой на рис. 3.2. Проверка проводится на открытой площадке при соблюдении условия достаточного удаления излучателя СКИ ЭМИ и объектов исследований от окружающих конструкций, для исключения влияния

переотражённых электромагнитных излучений поля. Испытуемые радиоэлектронные средства (РЭС) подготавливаются к работе в соответствии с их Руководством по эксплуатации.

Максимальная длительность воздействия для фиксирования результата составляет 15 с. Минимальное допустимое расстояние между плоскостью комплекса излучения СКИ ЭМИ и РЭС составляет 1 м. Это расстояние характеризует начало дальней волновой зоны для излучателя СКИ ЭМИ.

Комплекс СКИ ЭМИ располагается на расстоянии $r_{ски}$ относительно радиостанции приема информации, РЭС располагаются относительно друг друга на дистанции связи $r_{ист}$, при которой обеспечивается уверенный сигнал в точке приема. $r_{ски}$ выбирается исходя из возможностей комплекса СКИ ЭМИ по энергопотенциалу FOM из расчета по формуле (3.3)

Первоначально на выходе излучателя СКИ ЭМИ устанавливается простая последовательность СКИ ЭМИ импульсов с частотой $f_{ски}$ большей или равной символьной скорости модуляции $f_{симв}$.

РЭС и сопутствующее оборудование включают в режим тестирования канала связи.

Включая комплекс СКИ ЭМИ в режим генерации с требуемой величиной FOM , фиксируют изменение количества потерянных пакетов и скорость передачи данных в беспроводном канале связи. В случае блокирования канала связи при воздействии СКИ ЭМИ с требуемой величиной FOM , необходимо уменьшить FOM до граничного значения, при котором наблюдается минимальное количество потерянных пакетов. Фиксируют значения по форме 4.1. Сохраняя все параметры испытуемых устройств и величину FOM увеличивают частоту следования импульсов $f_{ски}$ до $2 f_{ски}$, фиксируют

значения процента потерянных пакетов, и скорости передачи данных. Сохраняя все параметры испытуемых устройств и величину FOM при частоте следования импульсов $f_{ски}$, формируют пакет из двух импульсов СКИ ЭМИ, с расстоянием между импульсами $\Delta t \approx 1/f_{нес}$, где $f_{нес}$, центральная несущая частота испытуемых средств, фиксируют значения процента потерянных пакетов, и скорости передачи данных.

По вышеуказанной методике проводят аналогичные измерения для других режимов работы исследуемых устройств, а так же устройств с другими характеристиками.

4.1.2 Обработка, анализ и оценка результатов испытаний

Обработке подлежат следующие экспериментальные данные:

- зарегистрированные значения, FOM ;
- зарегистрированные расстояния, $r_{ист}$, $r_{ски}$;
- частоту следования импульсов (пакетов импульсов), $f_{ски}$;
- количество импульсов в пакете, $N_{ски}$;
- процент потерянных пакетов;
- скорость канала связи.

Обработка первичной информации для сопоставления с расчетными данными производится с использованием программного обеспечения «Mathcad».

4.1.3 Материально-техническое обеспечение испытаний

При проведении работ используются средства измерений, прошедшие метрологическую аттестацию.

В качестве многоканального комплекса излучения СКИ ЭМИ используется опытный образец комплекса СКИ ЭМИ излучения разработанный в ОАО «МНИРТИ» в комплекте с элементами из состава контрольно-измерительной аппаратуры амплитудно-временных параметров комплекса, а так же со средствами управления и контроля работы комплекса.

В качестве программного обеспечения для измерения параметров скорости в сетях передачи данных, используется программа JPERF версии 2.0.5 разработанной The Board of Trustees of the University of Illinois. Тестируется организованный беспроводный канал связи по протоколу передачи TCP/IP.

В качестве средств радиосвязи, рабочие частоты которых лежат в пределах диапазона частот от 0,03 до 3 ГГц, включая средства ШПС связи являются:

а) Средство ШРД, включающие базовую и абонентскую станцию.

Описание и технические характеристики средства приведены в параграфе 3.1

б) Kenwood ТК-UVF10 – двухдиапазонная (UNF+VHF) портативная радиостанция.

Технические характеристики:

- частотный диапазон – от 136 до 174 МГц, от 400 до 470 МГц;
- количество каналов – 2x128;
- шаг частотной сетки – 5/6,25/10/12,5/25/50/100 кГц;
- ширина канала – 12,5кГц/25кГц;
- передатчик:
 - выходная мощность – 0,5/7 Вт;
 - модуляция – узкополосная FM (тип F3E);
 - уровень внеполосных излучений (соседний канал) – больше 65 дБ (полоса 25 кГц), больше 60 дБ (полоса 12,5 кГц)
 - паразитные излучения – меньше 7 мкВ.
- приемник:

- подавление по соседнему/зеркальному каналу – 65 дБ (полоса 25 кГц), 60 дБ (полоса 12,5 кГц);

- нелинейные искажения – меньше 10 %;

- выходная мощность НЧ – 1 Вт.

в) Цифровой беспроводной телефон Panasonic KX-TG2512RU

Технические характеристики:

- стандарт – DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunication – Технология улучшенной цифровой беспроводной связи);

- диапазон частот – от 1,88 до 1,9 ГГц;

- мощность радиочастотной передачи – средняя - 10 мВт, максимальная - 250 мВт;

- источник питания – от 220 до 240 В переменного тока, 50/60 Гц.

4.2 Результаты экспериментальных исследований влияния СКИ ЭМИ на средство ШРД

Результатом экспериментального исследования становятся характер изменения количества потерянных пакетов данных, скорости передачи данных и изменения качества передаваемой голосовой информации в зависимости от параметров последовательности импульсов СКИ ЭМИ. Ввиду ограниченности расстояний при проведении исследований все измерения проводились на 1/64 мощности КВ СКИ ЭМИ.

Результаты экспериментальных исследований приведены в Таблицах 4.2, 4.3.

Таблица 4.2

Эксперимент № 1			
$FOM, В$	$f_{ски}, МГц$	$r_{ски}, М$	$r_{ист}, М$
1500	1	15	30

Исследуемое средство	Характер влияния, процент потерянных пакетов, (скорость канала связи)		
	Воздействие с $f_{ски}$	Воздействие с $2f_{ски}$	Воздействие с $N_{ски}=2, \Delta t \approx 1/f_{нес}$
ШРД	0%, (36Мбит/с)	0%, (36Мбит/с)	10%,(24Мбит/с)
ДЕСТ	Блокирование	Блокирование	Блокирование
FM (F3E)	Легкий шум	Легкий шум	Блокирование

Таблица 4.3

Эксперимент № 2			
$FOM, В$	$f_{ски}, МГц$	$r_{ски}, М$	$r_{ист}, М$
1500	1	30	30

Исследуемое средство	Характер влияния, процент потерянных пакетов, (скорость канала связи)		
	Воздействие с $f_{ски}$	Воздействие с $2f_{ски}$	Воздействие с $N_{ски}=2, \Delta t \approx 1/f_{нес}$
ШРД	0%, (36Мбит/с)	0%, (36Мбит/с)	0%, (36Мбит/с)
ДЕСТ	Нет	Нестабильность	Блокирование
FM (F3E)	Легкий шум	Легкий шум	Блокирование

4.3 Расчетная оценка степени влияния при параметрах экспериментальных исследований и сопоставление экспериментальных и расчетных результатов

Расчетная оценка производится согласно формул (2.22), (2.23)

4.3.1 Расчет степени влияния СКИ ЭМИ поля с $FOM = 1500$ В, частотой следования импульсов $f_{ски}$ 1 МГц, расстояние до объекта $r_{ски} = 15$ м. Расстояние между средствами связи $r_{ист} = 30$ м:

Таблица 4.4

Исследуемое средство	Степень влияния, К		
	Воздействие $c f_{ски}$	Воздействие $c 2 f_{ски}$	Воздействие с $N_{ски}=2, \Delta t \approx 1/f_{нес}$
ШРД	0,032	0,065	0,17
ДЕСТ	0,98	1,836	$7,2 \cdot 10^3$
FM (F3E)	$1,35 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	288

4.3.2 Расчет степени влияния СКИ ЭМИ поля с $FOM = 1500$ В, частотой следования импульсов $f_{ски}$ 1 МГц, расстояние до объекта $r_{ски} = 30$ м. Расстояние между средствами связи $r_{ист} = 30$ м:

Таблица 4.5

Исследуемое средство	Степень влияния, К		
	Воздействие $c f_{ски}$	Воздействие $c 2 f_{ски}$	Воздействие с $N_{ски}=2, \Delta t \approx 1/f_{нес}$
ШРД	0,008	0,016	0,042
ДЕСТ	0,23	0,46	$1,8 \cdot 10^3$
FM (F3E)	$3,375 \cdot 10^{-5}$	$6,75 \cdot 10^{-5}$	36

Проводя сопоставление с экспериментальными исследованиями делаем вывод о схожести характера изменения расчетной степени влияния и экспериментальных результатов для всех случаев. Для исследования средства ШРД, при влиянии последовательностью импульсов с $N_{ски}=2$, $\Delta t \approx 1/f_{нес}$ следует отметить учет коэффициента B , как коэффициента характеризующего пропорциональное превышение мощности помехи над мощностью полезного сигнала при ограниченной мощности помехи в диапазоне спектра.

4.3.3 Расчет зависимости степени влияния объектов исследования от расстояния до КВ СКИ ЭМИ

Принимаем, как и выше $FOM = 1500$ В, частота следования импульсов 1 МГц и 2 МГц, расстояние между средствами связи $r_{ист} = 30$ м.

Расчетная оценка при воздействии простой последовательностью с учетом перекрытия спектральных частей:

- цифровой беспроводной телефон стандарта DECT Panasonic KX-TG2512RU

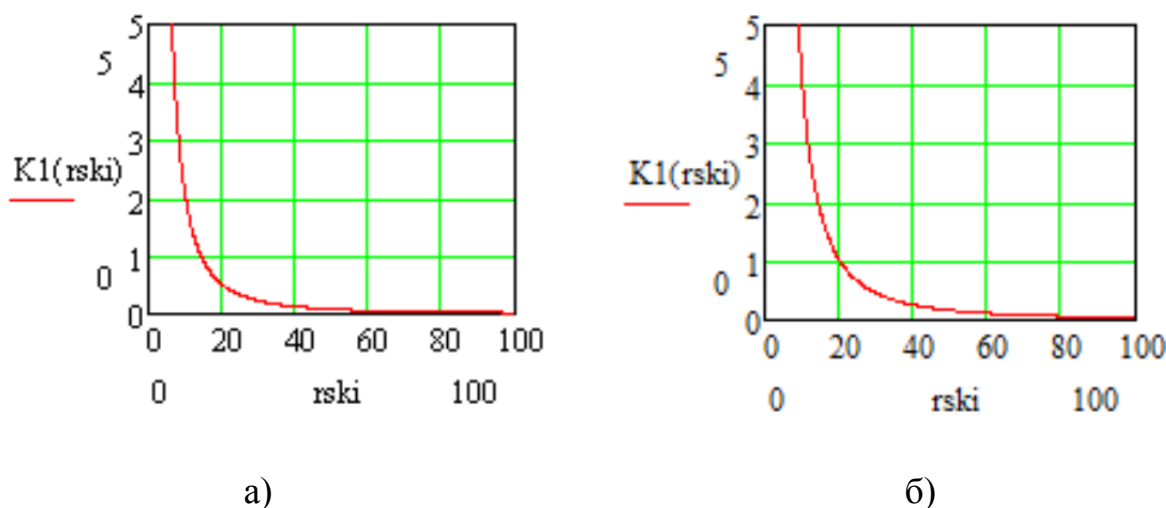


Рис.4.3. Зависимость степени влияния $K1$ с учетом перекрытия спектральных частей от расстояния $r_{ски}$ (м) источника излучения КВ СКИ ЭМИ на цифровой беспроводной телефон, а – 1 МГц, б – 2 МГц.

- двухдиапазонная (UNF+VHF) портативная радиостанция
Kenwood ТК-UVF10 –на частоте 433МГц.

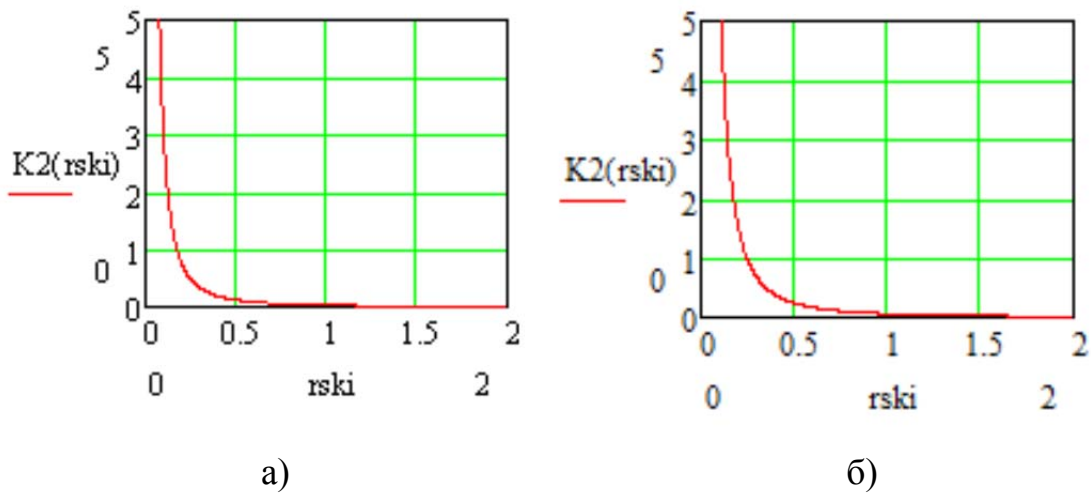


Рис.4.4. Зависимость степени влияния $K1$ с учетом перекрытия спектральных частей от расстояния $rski$ (м) источника излучения КВ СКИ ЭМИ на двухдиапазонную портативную радиостанцию,
а – 1 МГц, б – 2МГц.

- средство ШРД Режим 36 Мбит/с, 2,4ГГц, направленная антенна.

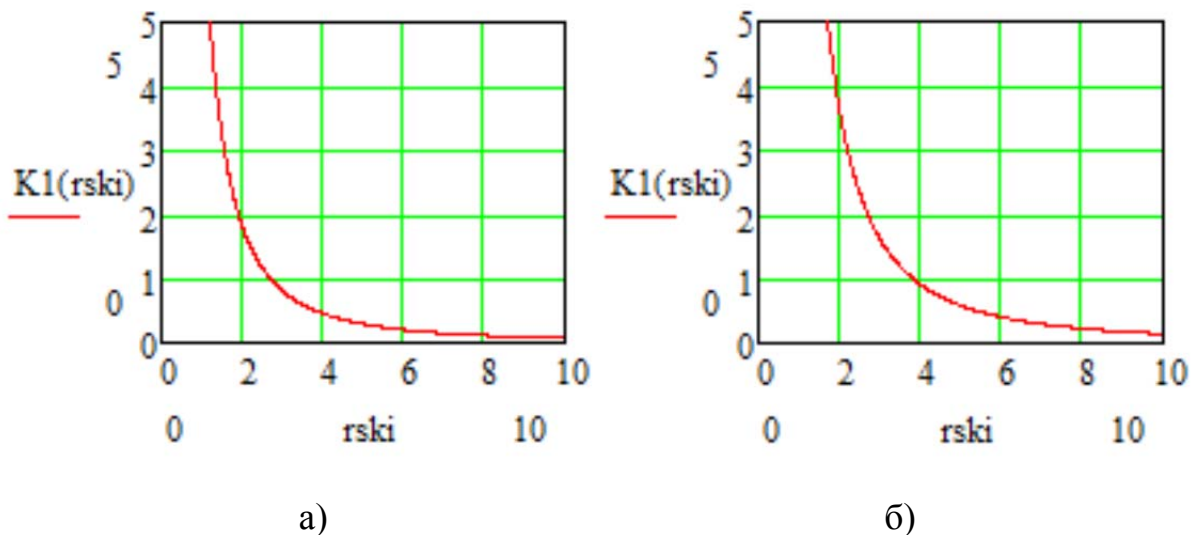


Рис.4.5. Зависимость степени влияния $K1$ с учетом перекрытия спектральных частей от расстояния $rski$ (м) источника излучения КВ СКИ ЭМИ на средство ШРД, а – 1 МГц, б – 2МГц

Расчетная оценка при воздействии последовательностью пакетов $N_{ски}=2$, $\Delta t \approx 1/f_{нес}$ без учета перекрытия спектральных частей:

- цифровой беспроводной телефон стандарта DECT Panasonic КХ-TG2512RU

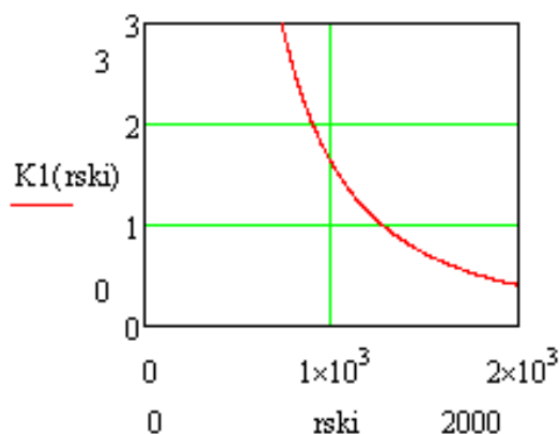


Рис.4.6. Зависимость степени влияния К1 без учета перекрытия спектральных частей от расстояния rski(м) источника излучения КВ СКИ ЭМИ на цифровой беспроводной телефон

- двухдиапазонная (UNF+VHF) портативная радиостанция Kenwood ТК-UVF10 –на частоте 433МГц.

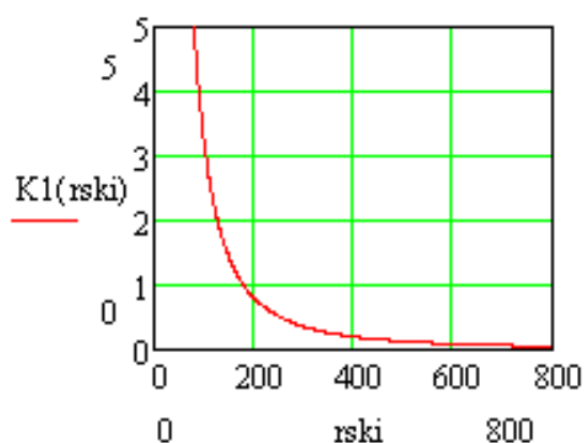


Рис.4.7 Зависимость степени влияния К1 без учета перекрытия спектральных частей от расстояния rski(м) источника излучения КВ СКИ ЭМИ на двухдиапазонную портативная радиостанция

- средство ШРД. Режим 54 Мбит/с, QAM 64 2,4ГГц,
направленная антенна.

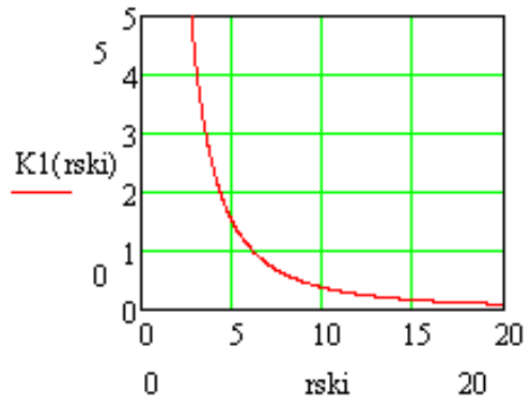


Рис.4.8 Зависимость степени влияния $K1$ без учета перекрытия спектральных частей от расстояния $rski(m)$ источника излучения КВ СКИ ЭМИ на средство ШРД

4.3.4 Расчетная оценка дальности воздействия КВ СКИ ЭМИ при максимальных уровнях мощности КВ СКИ ЭМИ

r_{ski} – расстояние от КВ СКИ ЭМИ до ШРД в метрах

$$r_{уст} = 30м, f_{ски} = 12.5 МГц$$

Максимальная дальность при $FOM = 50\ 000$, $N=2$, при воздействии на ШРД, $\Delta t > 1/f_{нес}$.

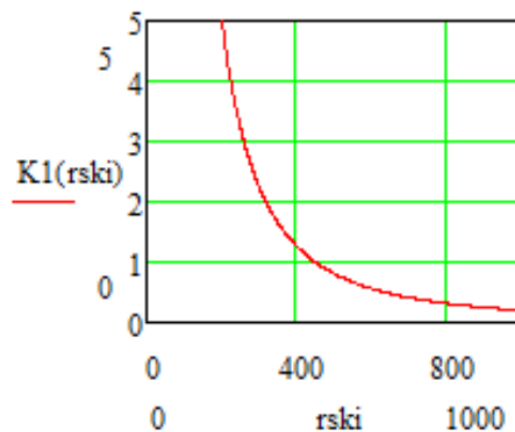


Рис.4.9 Зависимость степени влияния $K1$ с учетом перекрытия спектральных частей от расстояния $rski(m)$ источника излучения КВ СКИ ЭМИ на средство ШРД

Максимальная дальность при FOM = 50 000, $N=2$, $\Delta t \approx 1/f_{нес}$ при воздействии на ШРД.

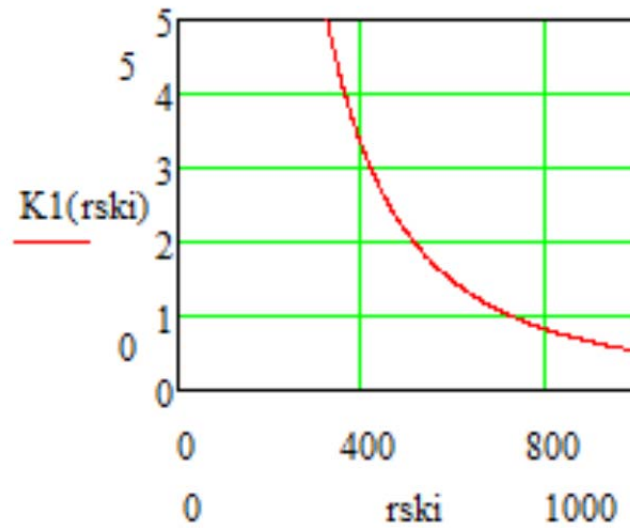


Рис.4.10 Зависимость степени влияния K1 без учета перекрытия спектральных частей от расстояния rski(м) источника излучения КВ СКИ ЭМИ на средство ШРД

Оценка при увеличении расстояния $r_{ист} = 1000$ м.

Максимальная дальность при FOM = 50 000, $N=2$, при $\Delta t > 1/f_{нес}$ при воздействии на ШРД.

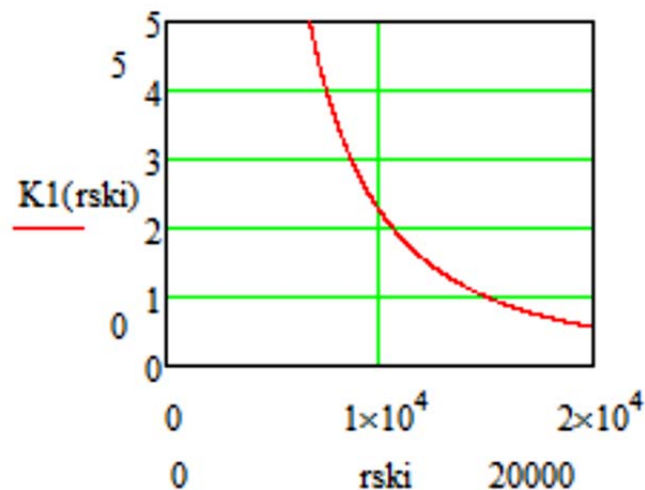


Рис.4.11 Зависимость степени влияния K1 с учетом перекрытия спектральных частей от расстояния rski(м) источника излучения КВ СКИ ЭМИ на средство ШРД

Максимальная дальность при $FOM = 50\ 000$, $N=2$, при $\Delta t \approx 1/f_{нес}$ при воздействии на ШРД.

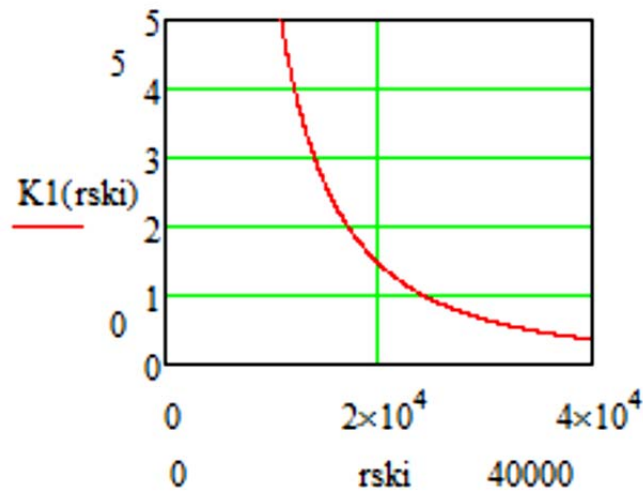


Рис.4.12 Зависимость степени влияния К1 без учета перекрытия спектральных частей от расстояния rski(м) источника излучения КВ СКИ ЭМИ на средство ШРД

Анализ полученных экспериментальных и расчетных результатов показывает, что формирование последовательности СКИ ЭМИ целесообразно при ширине спектра полезного сигнала $\Delta f_{ист}$ много меньшем спектра СКИ ЭМИ $\Delta f_{ски}$, при этом для наибольшего эффекта, интервал Δt между импульсами в пакете должен быть соизмерим с периодом $1/f_{нес}$ центральной несущей частоты. Дальность действия при формировании таких пакетов увеличивается пропорционально $\sqrt{(N_{ски}\Delta f_{ски}/\Delta f_{ист})}$ при сохранении частоты следования $f_{ски}$ и FOM , без учета выигрыша при обработке сигнала.

Следует отметить условный характер вышеприведенных зависимостей, который отражает лишь изменения, диапазонов потенциального влияния от менее эффективного влияния, участком спектра, до более эффективного влияния, наводимыми токами, при этом не учитываются разного рода потери в антенных устройствах, и

несинусоидальность формы импульсов СКИ ЭМИ при генерации пакетов.

4.4 Разработка рекомендаций для эффективного воздействия

Для повышения эффективности воздействия СКИ ЭМИ на средства ШРД необходимо формировать пакеты импульсов с величиной задержки между импульсами соизмеримой с периодом центральной несущей частоты. Это обеспечит прохождение создаваемых наводок в антенне в приемные тракты устройств, что может привести к блокированию по динамическому диапазону. Частота следования пакетов будет влиять на степень перекрытия во времени. Число импульсов в пакете будет определять степень имитации несущей частоты

Учитывая огромный спектр средств ШРД и заведомо неизвестные их параметры, для обеспечения универсальности эффективного влияния могут потребоваться алгоритмы для формирования хаотически изменяемых параметров последовательности СКИ ЭМИ импульсов. Случайным образом меняя временную задержку между импульсами в пакете, возможно оказывать воздействие наводимыми токами в приемных трактах средств ШРД при совпадении интервала следования импульсов с периодом частот принимаемого диапазона.

При формировании пакетов импульсов с расстояниями между импульсами большими, чем период центральной несущей частоты, ощутимой разницы между воздействием пакетами и просто последовательностью импульсов не будет. В данном случае эффективность будет снижена за счет того, что активной составляющей воздействия будет проходимая в приемные тракты устройств часть спектра создаваемого сверхкоротким импульсом, а не

прямые наводимые токи. При таком режиме воздействия при тех же энергетических характеристиках вероятность блокирования по динамическому диапазону будет ниже, но при этом велика вероятность искажений за счет перекрытия спектров. Количество потерь будет приблизительно пропорционально количеству искаженных периодов несущей частоты на один передаваемый символ.

В общем виде выигрыш в формировании пакетов СКИ ЭМИ можно приблизительно оценить без учета различного рода потерь как отношение ширины спектра СКИ ЭМИ сигнала к ширине спектра полезного сигнала.

Выводы по главе 4

1. Результаты эксперимента подтвердили предположение о том, что воздействие пакетами импульсов СКИ ЭМИ при расстояниях между импульсами в пакете соизмеримыми с периодом несущей частоты оказывает большее влияние на средства ШРД, чем при воздействии последовательностью импульсов СКИ ЭМИ.

2. При воздействии пакетами СКИ ЭМИ импульсов, с интервалами между импульсами много большими периода несущей частоты полезного сигнала, изменение количества импульсов в пакете будет равносильно кратному изменению частоты следования импульсов СКИ ЭМИ.

3. Проведенные эксперименты подтвердили характер зависимости степени влияния СКИ ЭМИ на средства радиосвязи от расстояния воздействия, проиллюстрированный в расчетах.

4. Экспериментальные исследования проводились на сравнительно малых расстояниях при пропорционально малой напряженности поля СКИ ЭМИ, что позволяет аппроксимировать результаты на большие расстояния и уровни напряженности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом, определяющим научную и практическую значимость работы, является решение задачи повышения эффективности воздействия СКИ ЭМИ на средства ШРД путем разработки метода оценки помехоустойчивости средств широкополосного радиодоступа к воздействию СКИ ЭМИ на основе анализа механизма влияния временных параметров последовательности СКИ ЭМИ на устойчивое функционирование ШРД.

В результате решения поставленных задач получены следующие результаты, определяющие научную и практическую значимость работы:

1. Проведен аналитический обзор исследований по теме диссертации, выполненных ранее отечественными и зарубежными авторами, показавший, что существует потенциальная угроза проведения поражающих электромагнитных атак с использованием источников СК ЭМИ. В связи с этим в России и за рубежом ведется активная деятельность по разработке стандартов и рекомендаций по защите информационных и телекоммуникационных объектов от СКИ ЭМИ.

2. Проведен аналитический обзор методов и средств оценки влияния СКИ ЭМИ на информационные и телекоммуникационные системы, в том числе средства ШРД, который показал, что существующие методы априорной оценки их устойчивости к воздействию СКИ ЭМИ в основном носят общий постановочный характер или недостоверны из-за несовершенства имеющегося математического аппарата.

Кроме того, обзор показал, наличие результатов исследований по критическим значениям напряженности электрического поля и частоты повторения импульсов СКИ ЭМИ, приводящих к обратимым и

необратимым отказам аппаратной части различных радиоэлектронных средств, но при этом отсутствие результатов по исследованию влияния временных параметров последовательности импульсов СКИ ЭМИ на средства ШРД.

В связи с этим назрела необходимость пересмотра существующих подходов к обеспечению устойчивого функционирования ШРД при воздействии СКИ ЭМИ, а также разработки методов для анализа и оценки эффективного воздействия полей СКИЭМИ на ШРД, позволяющих прогнозировать устойчивость такого класса систем при различных уровнях воздействия СКИ ЭМИ.

3. Проведен анализ характеристик средства ШРД и многоканального комплекса воздействия СКИ ЭМИ позволяющий определить механизм влияния последовательности СКИ ЭМИ на средства ШРД и другие типы радиосвязи с учетом неизменных энергетических характеристик поля СКИ ЭМИ при изменении временных параметров следования импульсов.

4. Проведен сравнительный анализ построения беспроводных широкополосных сетей различных масштабов, который позволил выявить схожесть используемых видов модуляции, что обуславливает идентичность механизмов воздействия СКИ ЭМИ на различные средства ШРД.

5. Разработан метод оценки степени влияния СКИ ЭМИ на основе анализа механизма его воздействия на средства ШРД с учетом их мощностных характеристик, вида воздействующей последовательности, спектральных и временных характеристик, позволяющий рассчитать необходимую величину энергopotенциала КВ СКИ ЭМИ и временные характеристики последовательности СКИ ЭМИ обеспечивающие эффективное воздействие на требуемом расстоянии.

Получены расчетные формулы, позволяющие оценить степень влияния последовательности СКИ ЭМИ на средства ШРД.

6. Проведена оценка влияния СКИ ЭМИ на средство ШРД при различной символьной скорости модуляции несущей частоты. Показано, что для управления степенью влияния на средство ШРД необходимо оперировать, частотой следования пакетов импульсов СКИ ЭМИ и межимпульсным интервалом.

7. Разработан алгоритм управления многоканальным КВ СКИ ЭМИ, расширяющий возможности данного комплекса в части формирования пакетов импульсов СКИ ЭМИ и увеличения диапазона частоты повторения импульсов путем адресного использования ресурсов комплекса с расчетом матрицы задержек. Алгоритм позволяет проводить исследования влияния последовательности импульсов СКИ ЭМИ в широком диапазоне изменяемых временных характеристик последовательности импульсов.

8. Разработан метод генерации последовательности импульсов СКИ ЭМИ, обеспечивающий эффективное воздействие на средства ШРД, отличающийся формированием пакетов импульсов с интервалами соизмеримыми с периодом центральной несущей частоты полезного сигнала, и частотой следования пакетов не меньшей символьной скорости модуляции несущей частоты.

9. Разработана методика проведения экспериментальных исследований воздействия преднамеренных СК ЭМИ на средство ШРД, позволяющая формировать программу проведения испытаний и критерии оценки устойчивости с учетом требований к характеристикам различных излучателей воздействия.

10. Получены новые экспериментальные данные воздействия СКИ ЭМИ на различные средства ШРД (базовая и абонентская станции), которые подтвердили большую эффективность воздействия

пакетами импульсов СКИ ЭМИ при расстояниях между импульсами в пакете соизмеримыми с периодом несущей частоты, чем при воздействии простой последовательностью импульсов СКИ ЭМИ.

11. Результаты экспериментальных исследований, на основе сравнительного анализа расчетных и экспериментальных значений формируемых уровней, воздействующего СКИ ЭМИ, подтвердили достоверность и адекватность разработанных методов и алгоритмов.

10. Разработаны рекомендации для повышения эффективности воздействия СКИ ЭМИ на средства ШРД, состоящие в необходимости формировать пакеты импульсов с величиной задержки между импульсами соизмеримой с периодом центральной несущей частоты. Это обеспечит прохождение создаваемых наводок в антенне в приемные тракты устройств, что может привести к блокированию по динамическому диапазону. Частота следования пакетов будет влиять на степень перекрытия во времени, а число импульсов в пакете будет определять степень имитации несущей частоты.

Перечень используемых сокращений

АФС - антенно-фидерная система

ДНА - диаграмма направленности антенны

КВ СКИ ЭМИ - комплекс воздействия сверхкороткоимпульсного электромагнитного излучения

КИА - контрольно-измерительная аппаратура

МЭК - международная электротехническая комиссия

ОС – обратная связь

ПК – персональный компьютер

ППРЧ (FHSS) – псевдослучайная перестройка частоты

РРЛ – радиорелейные линии

РЭБ - радиоэлектронная борьба

РЭП - радиоэлектронное подавление

РЭС- радиоэлектронные средства

СПО - специальное программное обеспечение

СШП - сверхширокополосный

СКИ ЭМИ - сверхкороткоимпульсное электромагнитное излучение

ТС - техническое средство

ЧВС – частотно временной сигнал

ШРД – широкополосный радиодоступ

ШПС – широкополосные сигналы

ШШС – шумоподобный широкополосный сигнал

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – метод модуляции с ортогональным частотным разделением

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) – метод расширения спектра методом прямой последовательности

PSK (Phase Shift Keying), BPSK, QPSK – метод модуляции с скачкообразным изменением фазы

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) – метод амплитудно фазовой модуляции

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акбашев Б.Б. Теоретические и экспериментальные методы оценки устойчивости терминалов к воздействию сверхширокополосных электромагнитных импульсов: дис...канд. техн. наук: 05.12.13 / Беслан Борисович Акбашев. – М., 2005.-155 с.
2. Акбашев Б.Б. Защита объектов телекоммуникаций от электромагнитных воздействий / Б.Б.Акбашев, Н.В.Балюк, Л.Н.Кечиев. – М.: Грифон. – 2014.–471с.
3. Архипкин В.Я. Сравнительная помехозащищенность систем связи с широкополосными и узкополосными сигналами/ В.Я. Архипкин, К.А. Мешковский //Информация и Космос. – 2004. – №3. – С. 25–29
4. Балюк Н.В. Электромагнитная совместимость. Устойчивость к воздействию импульсных электромагнитных явлений большой энергии / Н.В.Балюк // Технологии ЭМС. - 2003. – № 2(5). –С. 37 – 42.
5. Балюк Н.В. Электромагнитная совместимость. Устойчивость к ЭМИ высотного ядерного взрыва: учеб. пособие / Н.В.Балюк, В.В.Воскобович, Л.Н.Кечиев и др. – М.: МИЭМ, 2003. – Кн.1. – 32 с.
6. Балюк Н.В. Метод расчета взаимодействия импульсного электромагнитного поля с объектом сложной конфигурации / Н.В.Балюк, А.Н.Зеленин // Технологии ЭМС. – 2006. – №2(17). – С. 54-58.
7. Балюк Н.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты / Н.В.Балюк, Л.Н.Кечиев, П.В.Степанов - М.: ООО «Группа ИДТ», 2009. – 478 с.
8. Барсуков В.С. Комплексная защита от электромагнитного терроризма /В.С.Барсуков // Системы безопасности связи и телекоммуникаций. – 2000. – №32. – С.94-98.

9. Бородай П.Н., Мырова Л.О., Сахаров К.Ю. Средства обеспечения стойкости информационных систем к воздействию излучений СШП ЭМИ / П.Н.Бородай, Л.О.Мырова, К.Ю.Сахаров // Технологии ЭМС. –2006. – №2(17). – С.59-70.
10. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. — М.: Радио и связь. - 1985. — 384 с.
11. Васильев О.А. Интеллектуальное блокирование сотовой связи и беспроводных сетей 3G и 4G/ О.А.Васильев, К.В. Грязнов // ТЕХНИКА АРСЕНАЛ СТ.- 2012.- №6, -С. 23-27
12. Воскобович В.В. Актуальность и современное состояние проблемы защиты технических средств от сверхширокополосных импульсов большой мощности / В.В.Воскобович // Технологии ЭМС. – 2002. – №3. – С.17-24.
13. Воскобович В.В. Методы обеспечения стойкости перспективных систем радиорелейной, тропосферной и спутниковой связи к воздействию мощных импульсных электромагнитных помех: дис.... канд. техн. наук: 05.12.13 / Владимир Викторович Воскобович. – М., 2002. – 175 с.
14. Воскобович В.В. Воздействие сверхширокополосного импульсного электромагнитного излучения на персональные компьютеры / В.В.Воскобович, Л.О.Мырова // Сб. докл. Российской научно-техн. конф. по ЭМС. – СПб. – 2004. – С.383-392.
15. Воскобович В.В. Некоторые вопросы создания систем связи, устойчивых к воздействию МЭМП / В.В.Воскобович, Л.О.Мырова // Технологии ЭМС. – 2002. – №2.
16. Гизатуллин З.М. Технология прогнозирования и повышения электромагнитной совместимости цифровых электронных средств при внешних высокочастотных импульсных электромагнитных

- воздействиях / З.М.Гизатуллин // Технологии ЭМС. — 2010. — № 3 (34). — С.22–29.
17. ГОСТ Р52863-2007. Защита информации Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям. Общие требования. – М: Стандартинформ. – 2007. – 34 с.
 18. Грачев Н.Н. Защита человека от опасных излучений / Н.Н.Грачев, Л.О.Мырова. – М.: Бином, 2005. – 320 с.
 19. Ирвин Дж. Передача данных в сетях: инженерный подход / Дж.Ирвин, Д.Харль. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 434 с.
 20. Здухов Л. Н. Методика оценки вероятности сбоя цифровых устройств при воздействии сверхкоротких электромагнитных импульсов /Л. Н. Здухов А. П. Исаев, Ю. В. Парфёнов, Б. А. Титов // Журнал радиоэлектроники. – 2011. - N 5. – 12с.
 21. Кечиев Л.Н. Предотвращение катастроф электромагнитного характера в информационных системах / Л.Н.Кечиев, П.В.Степанов, О.Н.Арчаков // Технологии ЭМС. – 2005. – №4(15). – С.7-19.
 22. Кечиев Л.Н. Проектирование электронных средств в распределенной информационной среде / Л.Н.Кечиев, С.Р.Тумковский, С.Р.Путилов и др. // Сб. науч. тр. МИЭМ. – М.:МИЭМ, 2002. – С. 114-121.
 23. Кечиев Л.Н. Электромагнитная совместимость и информационная безопасность в системах телекоммуникаций / Л.Н. Кечиев, П.В.Степанов. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. –320 с.
 24. Киричек Р.В. Вопросы устойчивости активного сетевого оборудования к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов / С.В. Данилин, Р.В. Киричек // Технологии ЭМС. – 2009. – № 1. – С. 54-57.

25. Киричек Р.В. Исследование влияния электромагнитных импульсов на локальные вычислительные сети Ethernet / Р.В.Киричек // 61-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов: материалы. – СПб.: СПбГУТ. – 2009. – С.42.
26. Киричек Р.В. Система национальных стандартов по защите информации от преднамеренных электромагнитных воздействий / Р.В. Киричек // Обеспечение доверия и безопасности при использовании ИКТ: сб. докл. 10-ой международной конференции. – М.: АДЭ. – 2011.
27. Корнев А.Н. Экспериментальная оценка устойчивости устройств телекоммуникационных сетей при деструктивном воздействии сверхкороткоимпульсного электромагнитного излучения: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / Корнев Андрей Николаевич. – М., 2010. – 126 с.
28. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: справочник / В.И.Кравченко. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
29. Кравченко В.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В.И.Кравченко, Е.А.Болотов, Н.И.Латунова. – М.: Радио и связь, 1987 – 256 с.
30. Крохалев Д.И. Методы расчета импульсных электромагнитных процессов: метод. пособие / Д.И.Крохалев. – М.: МИЭМ, 2007. – 52 с.
31. Крутов А. Сверхширокополосная связь UWB. Часть 1. Технология UWB: принципы функционирования, история развития, отличительные особенности / Крутов А. // Беспроводные технологии. – 2007.- №1. - С. 6-8
32. Курочкин В.Ф. Исследование воздействия сверхширокополосных электромагнитных импульсов на кабельные коммуникации систем

- связи: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / Владимир Федорович Курочкин. – М., 2007. – 217 с.
33. Ларионенко А.В. Разработка требований к средствам защиты локальных вычислительных сетей от деструктивного воздействия сверхкороткоимпульсного электромагнитного излучения: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / А.В.Ларионенко. – М., 2010. – 137 с.
34. Михайлов В.А. Функциональные сбои персонального компьютера при воздействии электромагнитных импульсов сверхкороткой длительности / В.А.Михайлов // Сб. науч. тр. / под ред. Л.Н.Кечиева. – М.: МИЭМ, 2008. – С.152-157.
35. Михайлов В.А. Оценка параметров излучения сверхкоротких импульсов в заданной полосе частот / В.А.Михайлов, В.Е.Осташев // ЭМС и проектирование электронных средств: сб. науч. тр. / под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2012. – С.70-76.
36. Михайлов В.А. Устойчивость каналов передачи данных бортовой системы управления современных беспилотных летательных аппаратов к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов / В.А.Михайлов, Т.Л.Рязановский, И.А.Фомина // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – 2013. – № 1, 2. – С. 72-76.
37. Михеев О.В. Средства измерений и методы испытаний телекоммуникационных систем в условиях воздействия электромагнитных импульсов с субнаносекундной длительностью фронта: дис... канд. техн. наук: 05.12.13 / Олег Викторович Михеев. – М., 2006. – 152 с.
38. Рикетс Л.У. Электромагнитный импульс и методы защиты: пер. с англ. / под ред. Н.А.Ухина. – М.: Атомиздат, 1979. – 327 с.

39. Мырова Л.О. Анализ стойкости систем связи к воздействию излучений /Л.О. Мырова, В.Д.Попов, В.И.Верхотуров. – М.: Радио и связь. – 1993. – 268с.
40. Мырова Л.О. Воздействие сверхширокополосного импульсного электромагнитного излучения на технические средства / Л.О.Мырова, В.В.Воскобович // Технологии ЭМС. – 2004. – №3.
41. МЭК 61000-2-13. Электромагнитная совместимость. Устойчивость к СШП-ЭМИ, 2004.
42. Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб.: Питер, 2011. – 944 с.
43. Осипов, А.С. Военно-техническая подготовка. Военно-технические основы построения средств и комплексов РЭП : учебник / А.С. Осипов/ под науч. ред. Е.Н. Гарина. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т. - 2013. – 344 с.
44. Пименов П.Н. Анализ видов электромагнитных воздействий на технические средства / П.Н. Пименов // Сборник научных трудов МИЭМ / под ред. Л.Н. Кечиева, 2008, С. 26-28.
45. Пименов П.Н. Анализ воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов на каналы передачи данных бортовой системы управления современных беспилотных летательных аппаратов/ И.А. Фомина, Л.О. Мырова, Т.Л. Рязановский, П.Н. Пименов // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Труды Международной научной конференции. – МНК ИРЭМВ-2013, 23-28 июня 2013 года, Таганрог -Дивноморское. – С. 425-428
46. Пименов П.Н. Анализ эффективности воздействия деструктивных ЭМИ на каналы передачи данных современных бортовых систем управления / П.Н. Пименов, Л.О. Мырова // Сборник научных трудов

- 6 - й Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». - М: 19 - 22 ноября 2012, т. 2, С. 158-162.
47. Пименов П.Н. Влияние последовательности сверхкоротких электромагнитных импульсов на широкополосные средства беспроводной передачи данных / П.Н Пименов // Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е.В. Арменского. Материалы конференции. - М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2015. – С. 206 - 207.
48. Пименов П.Н. Метод создания комплекса воздействия сверхкороткоимпульсного электромагнитного излучения с высокой частотой повторения на наземные широкополосные линии радиосвязи с целью снижения качества их функционирования / П.Н. Пименов, Л.О. Мырова // Сборник трудов «XI межотраслевой научно-технической конференции по радиационной стойкости». – Москва, 18-20 февраля 2015.
49. Пименов П.Н. Развитие способов обеспечения помехоустойчивости электронно-вычислительных систем при воздействии сверхкоротких электромагнитных импульсов / П.Н. Пименов // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – 2014. – № 1,2. – С. 103-104.
50. Пименов П.Н. Справочный модуль ИЭТ / В.С. Алтунин, П.Н. Пименов, Д.А. Поляков, В.В. Жаднов // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / под ред. А.В. Сарафанова - Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2000. — С. 246 - 247.
51. Пименов П.Н. Сравнительный анализ влияния сверхкороткого электромагнитного импульса на узкополосные, широкополосные, сверхширокополосные системы радиосвязи / П.Н. Пименов // Технологии ЭМС. – 2015. – № 1(52). – С. 13-16.

52. Пименов П.Н. Технические решения по обеспечению помехоустойчивости аппаратуры к воздействию электромагнитных помех / П.Н. Пименов // Сборник научных трудов МИЭМ /под ред. Л.Н. Кечиева, 2009, С. 7-11.
53. Пименов П.Н. Требования стандартов по параметрам мощных импульсных электромагнитных полей / П.Н. Пименов // Сборник научных трудов МИЭМ / под ред. Л.Н. Кечиева, 2008, С. 9-12.
54. Пименов П.Н. Эффективность воздействия сверхкороткого электромагнитного импульса на широкополосные системы радиосвязи / П.Н. Пименов, Л.О. Мырова // Технологии ЭМС. – 2015. – № 1(52). – С. 17-20.
55. Разработка промышленной технологии создания комплекса воздействия сверхкороткоимпульсного (СКИ) электромагнитного излучения (ЭМИ) с высокой частотой повторения (до 50 МГц), на наземные сверхширокополосные (СШП) линии радиосвязи с целью производства перспективных электромагнитных средств радиоэлектронного подавления, и разработка рекомендаций по защите от этого воздействия: Научно-технический отчет по ОКР «Вагон»/.-М.: ОАО «МНИРТИ»/Ю.В. Невзоров и др.-2014.- 210 с.
56. Сахаров К.Ю. Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов для испытаний технических средств / К.Ю.Сахаров, А.А.Соколов, В.А.Туркин, О.В.Михеев // Технологии ЭМС. – 2006. – №2. – С.10-16.
57. Салливен Джон П. Террористическое и нетрадиционное оружие: справочник «Оружие мира» / Джон П. Салливен. – М.: Моркнига, 2008. – 224 с.
58. Сахаров К.Ю. Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров: монография / К.Ю.Сахаров. – М., 2006.

59. Сахаров К.Ю. Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю.Сахаров, А.А.Соколов, О.В.Михеев и др. // Технологии ЭМС. – 2006. – № 3. – С.36–46.
60. Сахаров К.Ю. Исследование функционирования персональных компьютеров в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю.Сахаров, О.В.Михеев, В.А.Туркин и др.. – Технология ЭМС. – 2006. - №2(17). – С. 44-49.
61. Соколов А.А. Излучение и измерение импульсных электромагнитных полей / А.А.Соколов. С.А.Подосеев. – М.: Спутник, 2000. – 249 с.
62. Туркин В.А. Разработка излучателей сверхкоротких электромагнитных импульсов для испытаний радиотехнической аппаратуры: ... канд. техн. наук: 05.12.04 / Туркин Владимир Анатольевич. – М., 2006. – 163с.
63. Туркин В.А. Генератор мощных электромагнитных импульсов с субнаносекундным фронтом / В.А.Туркин, С.В.Альбетков, К.Ю.Сахаров // ПТЭ, 1993. – №6. – С.125-128.
64. Тяпин М.С. Экспериментальные исследования радиотехнических устройств на воздействие широкополосных электромагнитных импульсов и разработка рекомендаций по обеспечению их стойкости: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 / Михаил Серафимович Тяпин. - М., 2007. – 207 с.
65. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / Т.Уильямс. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2003. – 540 с.
66. Уильямс Т. ЭМС для систем и установок / Т.Уильямс, К.Армстронг. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2004. – 508 с.

67. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий / под ред. Т.Р. Газизова. - Томск: Томский государственный университет, 2002. - 206 с.
68. Элементы топологической теории экранирования / Л.Н.Кечиев и др. // Проектирование телекоммуникационных и информационных средств и систем: сб. науч. тр. – М.: МИЭМ, 2007. – С. 125-130.
69. Якушин С.П. Методы и средства оценки воздействия электромагнитного импульса большой энергии на телекоммуникационные сети: дис. ... канд. техн. наук / С.П. Якушин. – М., 2004. – 146 с.
70. Analysis of High-Power RF Interference on Digital Circuits David Yang, R. Kollman Electromagnetics. — Vol. 26. — 2006. — № 1. — P. 87–102.
71. Brauer F. Susceptibility of IT network systems to interferences by НРЕМ, Electromagnetic Compatibility / F. Brauer, F. Sabath, J. Haseborg and at all. – EMC. – IEEE International Symposium. – 2009. – P. 237–242.
72. IEC/TR 61000-3-7(2008) Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3–7: Limits — Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems. – 65 p.
73. IEEE Std 802.11a-1999(R2003). Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band / IEEE-SA Standards Board.-2003.- 83p.
74. Ultra-wideband transmitter research / Lehr J.M., Baum et. All. – IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 26. No. 3.
75. Kirichek R. Improvement of Russian regulatory system on protection against electromagnetic attacks / R. Kirichek, V. Chvanov // 9th International Symposium on EMC: proceedings. — Wroclaw (Poland), 2010. – P.567-571.

76. Kurochkin B.F., Myrova L.O., Tyapin M.S. Defending information systems from the sources of super wideband electromagnetic radiation, Proceedings of International Conference «Information and Telecommunication Technologies in Intelligent Systems», Catania, Italia, May 27- June 03, 2006, p.9-23
77. Messier M., Radasky W., Madrid M. Testing of personal computers to IEC standard waveforms / M. Messier // Metatech Corporation, Meta-R-174, 2000. — P. 22–28.
78. Parfenov Y.V., Zdoukhov L.N., Radasky W.A. and Ianoz M. Conducted IEMI Threats for Commercial Buildings / Y.V. Parfenov and at all // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. — 2004. — Vol.46. — № 3. — P. 404.
79. Radasky W.A. Protection of commercial installations from the high-frequency electromagnetic threats of HEMP and IEMI using IEC standards / W.A. Radasky // Proceedings 2010 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). - 2010. - P.758-761.
80. Двухпозиционная фазовая модуляция (BPSK) [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.radioprofessional.info/bpsk.php>, свободный. — Загл. с экрана.
81. Лекция 3 Восприимчивость приемных устройств через антенну [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://lektsiopedia.org/lek-13892.html>, свободный. — Загл. с экрана.
82. Сверхширокополосные сигналы [Электронный ресурс]/ Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сверхширокополосные_сигналы, свободный. - Загл. с экрана.
83. Скоростная связь без проводов, или Стандарт 802.16 [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://compress.ru/article.aspx?id=9948&iid=415>, свободный. — Загл. с экрана.

84. Orthogonal frequency-division multiplexing [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing, свободный. — Загл. с экрана.
85. IEEE 802 [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802, свободный. — Загл. с экрана.
86. Symbol Rate [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://satsis.info/symbol_rate.html, свободный. — Загл. с экрана.
87. Пименов П.Н., Мырова Л.О., Фомина И.А. и др. Заявка на получение патента на изобретение № 2015103784 от 05.02.2015 «Многоканальный комплекс воздействия сверхкороткоимпульсного электромагнитного излучения с высокой частотой повторения на наземные широкополосные линии радиосвязи», 12 с.
88. Пименов П.Н., Мырова Л.О., Фомина И.А. и др. Заявка на получение патента на изобретение № 2015101351 от 20.01.2015 «Способ воздействия СК ЭМИ на средства широкополосной радиосвязи на основе формирования последовательности сверхкоротких электромагнитных импульсов», 11 с.