ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ:

РЧС – Радиочастотный ресурс	
РЭС	– Радиоэлектронное средство
РИУ	– Радиоизлучающее устройство
ИРИ	– Источник радиоизлучения
ТРК	– Технический радиоконтроль
МСЭ	– Международный союз электросвязи
УГЦР	– Украинсткий Государсвенный центр радиочастот
НДУ	– Незаконно действующее устройство
БД	– База данных
АС	– Автоматизированная система
АРМ	– Автоматизированное средство радиомониторинга
УРЧМ	– Управление радиочастотным мониторингом
РКП	– Радиоконтрольный пункт
НКРС	– Национальная комиссия по вопросам регулирования связи
ФПО	– Функциональное программное обеспечение
ЕБД	– Единая база данных
АС	– Антенная система
АКФ	– Автокорреляционная функция
АПВ	– Апостериорная плотность вероятности
БПФ	– Быстрое преобразование Фурье
БС	– Базовая (приёмопередающая) станция
ГЛОНАСС	– Глобальная навигационная спутниковая система
ДНА	– Диаграмма направленности антенны
ДПФ	– Дискретное преобразование Фурье
ИС	– Информационная система
КБС	– Контроллер базовой станции

КПМ – Конечный пункт маршрута

КФ – Корреляционная функция

КЦ – Коммутационный центр

ЛРРД – Линия равных разностей дальностей

МС – Мобильная станция

МСЭ – Международный союз электросвязи

ППМ – Промежуточный пункт маршрута

ПХ – Пеленгационная характеристика

РЗ – Рабочая зона

РЛС – Радиолокационная система

РНС – Радионавигационная система

РНУ – Радионавигационное устройство

СКО – Среднеквадратическая ошибка

СРП – Суммарно-разностный преобразователь

УФПХ – Устройство формирования пеленгационной характеристики

ФАР – Фазированная антенная решетка

ФРМ – Фазоразностная модуляция

ФСУ – Фазосдвигающее устройство

ЦПОС – Цифровой процессор обработки сигналов

ЭВМ – Электронная вычислительная машина

ЭИ – Эфирный интерфейс

ЭМ – Электромагнитный (-ая)

ЭПР – Эффективная площадь рассеяния

16QAM – Sixteen-Quadrature Amplitude manipulation Шестнадцатипозиционная квадратурная амплитудная манипуляция

8PSK – Eight-phase shift keying – восьмипозиционная фазовая манипуляция

AMPS – Advanced Mobile Phone Service – усовершенствованная служба мобильной телефонной связи

ANSI – American National Standard Institute – Американский национальный институт стандартов

BCCH – Broadcast Control Channel – вещательный канал управления

BSC – Base Station Controller – контроллер базовой станции, КБС

BSS – Base Station System – оборудование базовой станции (BSC + TCE + BTS)

BTS – Base Transceiver Station – базовая приемопередающая станция

CDMA – Code Division Multiple Access – множественный доступ с кодовым разделением каналов

D-AMPS – Digital AMPS - цифровая AMPS

EDGE – Enhanced Data Rates for GSM Evolution, Enhanced Data Rates for Global Evolution – Улучшение скорости передачи данных для (глобальной) эволюции стандарта GSM

ETSI – European Telecommunications Standards Institute – Европейский институт стандартов в области телекоммуникаций

FACCH – Fast Associated Control Channel – быстрый совмещенный канал управления

GMSK – Gaussian Minimum Shift Keying – Гауссовская минимально-фазовая манипуляция

GPRS – General Packet Radio System – глобальная система пакетной радиосвязи

GPS – Global Positioning System – система глобального определения местоположения

GSM – Global System for Mobile Communications глобальная система мобильной связи (стандарт)

HSDPA – High Speed Downlink Packet Access – высокоскоростной пакетный доступ по входящему каналу

HSUPA – High Speed Uplink Packet Access – высокоскоростной пакетный доступ по восходящему каналу

HLR – Home Location Register – домашний регистр местоположения

IMSI – International Mobile Subscriber Identity – международный идентификационный номер абонента

IMT-2000 – International Mobile Telecommunications 2000 – программа МСЭ интеграции систем беспроводного доступа, наземной сотовой связи, спутниковых технологий и других видов радиосвязи

LAN – Local Area Network – локальная вычислительная сеть

MAN – Metropolitan Area Network – вычислительная сеть мегаполиса

MSC – Mobile-services Switching Center – коммутационный центр мобильной связи

NMT – Nordic Mobile Telephone – скандинавская система мобильной телефонной связи (стандарт)

OSI – Open System Interconnection – эталонная модель взаимодействия открытых систем

RACH – Random Access Channel – канал случайного доступа

SACCH – Slow Associated Control Channel – медленный совмещенный канал управления

SDCCH – Standalone Dedicated Control Channel – выделенный закрепленный канал управления

TCE – Transcoder Equipment – оборудование транскодера (преобразователя кода)

TDMA – Time Division Multiple Access – множественный доступ с временным разделением каналов

TMN – Telecommunication Management Network – сеть управления электросвязью

TCB – Transcoder board – блок транскодеров. Каждый TCB содержит 8 транскодеров (TRC).

TRC (TRAU) – Transcoder – транскодер. Служит для организации прозрачного сквозного соединения между A-интерфейсом (интерфейсом между MSC и BSS) и одним из M-интерфейсов (например, внутренним интерфейсом между BSC и TRC)

UMTS – Universal Mobile Telecommunications System – универсальная система мобильных телекоммуникаций

VLR – Visitor Location Register – гостевой регистр местоположения (регистр перемещения)

WCDMA – Wideband CDMA – широкополосная сеть CDMA

WLAN – Wireless LAN – беспроводная локальная вычислительная сеть

WMAN – Wireless MAN – беспроводная вычислительная сеть мегаполиса

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ВВЕДЕНИЕ

Глава 1: ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ О РЧС И РЧК

1.1. Использование РЧС

1.2. Назначение и цель радиочастотного контроля

Глава 2: ЗАДАЧИ СЛУЖБЫ РАДИОМОНИТОРИГА

2.1 Задачи службы радиомониторинга

2.2 Задачи службы инспектированния радиоконтроля

Глава 3: МЕТОДЫ РАДИОМОНИТОРИНГА

3.1 Методи проведения радиомониторинга

3.2 Поиск и выявление радиоизлучения

3.3 Наблюдения за радиоизлучениями

3.4 Селекция радиоизлучения

3.5 Измерение параметров радиоизлучения

3.6 Пеленгование ИРИ

3.7 Определение местоположения ИРИ

3.8 Идентификация радиоизлучений

3.8.1 Методы идентификации и анализ параметров радиосигналов

3.9 Технический радиоконтроль

3.10 Измерения параметров радиоизлучения

Глава 4: РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ СТРУКТУРЫ И МЕТОДОВ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

4.1 Требования к сетям мобильной связи с позиционированием мобильных терминалов

4.2 Оценка потенциальных характеристик измерителя

4.3 Выбору метода реализации коррелятора

4.4.Способы реализации вычислительного алгоритма

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ПРИЛОЖЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших государственных вопросов, который во многом определяет перспективы развития в стране новых технологий радиосвязи и, как результат, перспективы ее вхождения в мировое информационное пространство, является совершенствование системы регулирования в сфере использования радиочастотного ресурса (РЧС). Постоянно растущая необходимость в радиочастотном спектре и увеличение количества действующих средств радиосвязи выдвигают к операторам связи и подразделений инспектирования и надзора за сетями радиосвязи повышенные требования по рациональному использованию радиочастотного ресурса страны и обеспечения электромагнитной совместимости. В то же время нередки случаи, когда при планировании использования радиочастотного спектра тщательно подобраны и согласованы частоты на практике оказываются пораженными радиопомехами, поскольку теоретические расчеты не всегда могут оценить полную и реальную электромагнитную обстановку в конкретном месте. Это приводит к необходимости проведения дополнительных работ по радиочастотному мониторингу, в исполнении которых значительная роль отводится эфирному радиочастотному контролю, что служит важным инструментом для принятия рациональных решений при назначении радиочастот для новых средств радиосвязи, повышение эффективности использования радиочастотного ресурса и обеспечению условий для нормальной работы лицензионных средств радиосвязи.

Радиочастотный мониторинг является самым эффективным инструментом получения объективной информации о состоянии электромагнитной обстановки и использования радиочастотного ресурса в государстве для обеспечения повышения эффективности регулирования в сфере пользования РЧС, внедрения новейших радиотехнологий, систем, стандартов и новых услуг связи.

История появления радиомониторинга, называемого на заре возникновения техническим радиоконтролем, уходит своими корнями в конец 20-х – начало 30-х годов прошлого столетия. Потребность его введения была вызвана необходимостью решения

чрезвычайно острых проблем устранения взаимных помех между радиостанциями и необходимостью упорядочения распределения полос частот. Последнее было обусловлено перегрузкой радиочастотного спектра (РЧС) и ростом интенсивности его использования.

Приведу несколько цифр характеризующих динамику роста числа РЭС:

В 1927 году в мире (в Европе и США) в диапазоне работы до 200 кГц насчитывалось немногим более 500 вещательных станций, что не требовало жесткого регламентирования их работы.

К 1947 году в Международном регистре частот в диапазоне частот до 20 МГц было зарегистрировано уже 45 тысяч радиостанций гражданского назначения.

А к 1984 году только в полосе 87,5 - 108 МГц работали более 53 000 станций с частотной модуляцией.

В настоящее время во всем мире:

– зарегистрировано более 127 тысяч передатчиков аналогового и около 2200 передатчиков цифрового телевидения, более 66 тысяч передатчиков аналогового радиовещания;

– число абонентов сетей сотовой связи 2-го поколения приближается к отметке 2,5 млрд.;

– число абонентов в сетях связи 3-го поколения (CDMA2000 и WCDMA/UMTS) превысило 280 млн.

– число абонентов в сетях связи 4-го поколения (LTE) превысило 920 млн

Современный уровень радиомониторинга не всегда успевает за стремительным развитием сферы телекоммуникаций. Внедрение новейших радиотехнологий, которые основываются на использовании сложных видов радиосигналов, в частности, сигналов с расширением спектра и шумоподобных сигналов, а также освоение высших диапазонов частот требуют неотложного решения вопросов относительно методов радиомониторинга и измерения параметров таких сигналов.

Среди современных средств телекоммуникаций наиболее активно развиваются сети мобильной связи. В них достаточно успешно решается задача рационального использования выделенной полосы радиочастот путем частотного, временного и кодового уплотнения, благодаря чему увеличивается пропускная способность телекоммуникационных сетей.

В России развитие мобильной связи идет опережающими темпами. По оценкам экспертов, число абонентов мобильной связи до 251,6 млн клиентов, по данным AC&M Consulting. При этом подсчет абонентов производился по количеству действующих SIM-

карт в нашей стране. Наиболее распространенным стандартом мобильной связи в странах Европы и а мире в целом является GSM. Его доля на мировом рынке составляет около 75%, и на него приходится более 80% новых подключений.

Проводится большое число работ теоретического и практического характера, направленных на повышение качества и надежности сетей мобильной связи, разработки и внедрения новых услуг и т.д. Одной из перспективных и весьма востребованных услуг является услуга позиционирования МС, т.е. определения местоположения носителя МС в зоне действия сети. Это, по существу, задача радионавигации. Чисто навигационные (без применения в сетях мобильной связи) рассматривались и решались научными школами, которые возглавляли отечественные ученые М.С. Ярлыков, Г.И. Тузов, Ю.М. Казаринов, Л.С. Беляевский и др. Однако вследствие значительной сложности проблем определения местоположения МС с достаточной точностью навигационными методами много вопросов остаются открытыми.

С 2013 года номер «112» утверждён в качестве единого номера вызова экстренных оперативных служб для приёма сообщений о пожарах и чрезвычайных ситуациях в телефонных сетях местной телефонной связи. Постановление правительства РФ от 21.11.2011 № 958 «О системе обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру „112“». Позиционирование МС имеет весьма большое значение не только для служб спасения, но и для многочисленных служб и систем безопасности больших предприятий, аэропортов, вокзалов, автотранспортных предприятий и т.п. Потому тема диссертации представляется актуальной.

Цель работы, состоит в анализе существующих методов оценки и способов обеспечения надежности и эффективности определения характеристик распространения сигналов в радиосетях передачи данных, а также в разработке новых моделей и методов расчета помехозащищенности и электромагнитной совместимости радиосетей.

Целью исследования является разработка системы навигационного определения (позиционирования) носителей МС с точностью, достаточной для визуального обнаружения в горной, подземной, лесной зоне, в зонах с плотной застройкой и шумовой обстановкой, поиска моряков, терпящих бедствие, для удаленного контроля за перемещением человека с источником мобильного сигнала службой безопасности без использования дополнительных технических средств.

Для достижения поставленной цели были решены такие основные задачи:

- анализ и систематизация существующих и разрабатываемых средств позиционирования носителей МС, степени их точности, удобства, экономических аспектов внедрения и рыночной привлекательности для рядового клиента – физического лица;

- разработка уточненных электродинамических моделей распространения волн в промежуточной зоне и зоне Фраунгофера для частотного диапазона, который применяется в мобильной связи, в условиях функционирования системы в городе с плотной застройкой, в пригородной и сельской местностях;

- разработка математических моделей полезных и помеховых сигналов как носителей информации для системы навигационного определения, входящих в состав системы мобильной связи в целом;

- сравнительный анализ методов навигации носителей МС и выбор наиболее приемлемого метода при ограничениях на вмешательство в инфраструктуру и на изменения параметров БС и МС;

- статистический синтез устройства обнаружения-измерения координат и параметров движения МС в пространственной системе БС;

- расчеты асимптотических оценок точности определения синтезированного измерителя и анализ потребного времени для достижения желаемой точности;

- выдача рекомендаций по построению системы позиционирования и методам аппаратно-программной реализации.

Объектом исследования являются системы мобильной связи стандарта GSM с модификацией по этапам GPRS-EDGE-HSDPA к стандарту 3G.

Предмет исследования – модели, методы и средства позиционирования носителей МС с точностью, достаточной для их визуального обнаружения невооруженным глазом.

Методами исследования в работе были выбраны методы электродинамики, теории рассеяния волн от статистически шероховатой поверхности, краевых волн и физической теории дифракции, статистической радиотехники и теории радионавигации, статистического синтеза радиотехнических систем обнаружения-измерения, моделирования и расчеты на ЭВМ.

В работе впервые предложен и обоснован разностно-дальномерный метод и алгоритм навигационного определения МС в пространственной системе БС с последовательным съёмом и совместной обработкой информации. При применении предложенного алгоритма обеспечивается минимальное вмешательство в инфраструктуру системы мобильной связи и, соответственно, приемлемые расходы на внедрение.

Разработана новая методика оценки электродинамических характеристик полезных и помеховых сигналов при приеме радиоволн дециметрового диапазона системы мобильной связи как в зоне Фраунгофера, так и в промежуточной зоне.

Впервые синтезировано устройство последовательного обнаружения-измерения координат и параметров движения МС с прогнозом положения носителя на следующем этапе на основе учета статистической динамики процессов движения носителя. По результатам анализа потенциальных статистических характеристик синтезированного устройства показано, что разработанное устройство дает требуемую точность определения при разных маневрах носителя в зоне обнаружения.

При решении навигационной задачи реализована процедура оптимального приема сигналов канала данных и канала управления системы мобильной связи как сложных шумоподобных сигналов с фазоразностной модуляцией. Это позволяет снять проблему фазовой синхронизации элементов навигационной подсистемы. Также предложено упрощение реализации разработанных устройств на основе замени корреляционных приемников процессорами быстрого преобразования Фурье.

Полученные новые научные результаты могут быть сведены к хорошо известным частным результатам, многократно проверенных теоретически и экспериментально. Результаты компьютерных расчетов и моделирования могут считаться отображением реальных процессов, протекающих в системах мобильной связи, построенных на базе цифровых устройств и вычислительных машин общего и специального назначения.

Все разработанные методы и алгоритмы доведены до конечных результатов – функциональных схем устройств, расчетных формул в замкнутой форме, методик реализации, количественных оценок характеристик.

При разработке теоретических предпосылок и отдельных методов навигационного определения носителя МС обеспечено минимальное вмешательство в инфраструктуру сетей мобильной связи. Это является непременным условием исключения или хотя бы минимизации проблем технической модернизации сетевого оборудования и особенно МС, замена которых создаст финансовые трудности для клиентов и, как следствие, усложнит процесс широкого внедрения данной услуги.

Методика определения электродинамических характеристик полезных и помеховых сигналов при приеме радиоволн дециметрового диапазона системы мобильной связи как в зоне Фраунгофера, так и в промежуточной зоне имеет сравнительно низкую трудоемкость и допускает высокую степень автоматизации и компьютеризации.

На выходах синтезированных устройств обнаружения-измерения координат и параметров движения носителей МС наблюдаются достаточные статистики анализируемых процессов. Поэтому требования к вычислительным ресурсам не являются чрезмерными. Данные устройства быть реализованы как в аппаратном виде, на базе специализированных процессоров цифровой обработки сигналов, так и в программной форме, на базе универсальных ЭВМ.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ О РЧС И РЧК

1.1. Использование РЧС

Радиочастотная служба (РЧС) России - это стратегический ресурс государства, использование которого - неотъемлемая часть технологических процессов, обеспечивающих функционирование систем радиосвязи, навигации и радиолокации, телевизионного и звукового вещания, бытовых приборов. Одновременно он является составляющей предоставления разнообразных телекоммуникационных услуг и обеспечение эффективного функционирования экономики и ряда технологий, влияющих на национальную безопасность государства, обеспечивают обороноспособность страны, ее информационную безопасность и технологическую независимость. Ограниченность РЧС на определенном этапе развития технологий обусловливает его постоянный дефицит и связанную с этим необходимость эффективногоиспользования. Наблюдение за пользованием РЧС, в частности путем проведения его мониторинга, является одним из средств поддержки целостности процессов использования РЧС.

Высокие темпы развития и глобализация радиосвязи рано или поздно приведут к существенной нехватке имеющегося РЧС, поэтому эффективное и рациональное его использование возможно только при проведении всеми странами мира согласованной технической политики и требует хорошо отлаженной системы регулирования в сфере использования РЧС в пределах каждого государства.

Регулирования в сфере использования РЧС - это совокупность согласованных юридических, административных, научных и технических процедур, необходимых для обеспечения эффективной работы оборудования и служб радиосвязи без создания недопустимых радиопомех.

Юридические аспекты регулирования в сфере использования РЧС заключаются в формировании законодательных (нормативных) основ, регламентирующих использование РЧС и деятельность органов управления и регулирования.

Административные - в создании процедур, регулирующих взаимоотношения пользователей РЧС и органов управления и регулирования в процессе использования радиоэлектронных средств (РЭС).

Научные - в разработке методологии выделения полос радиочастот, стандартов на параметры электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС и излучающих устройств (ИУ).

Технические - в осуществлении единой технической политики: создание единых методик и программ для анализа ЭМС РЭС и ИУ, стандартизации параметров РЭС и РИУ, сертификации средств связи и оборудования радиочастотного контроля.

Цель регулирования - максимально повысить эффективность использования РЧС и свести уровень радиопомех до минимально возможного. Регулирования в сфере использования РЧС базируется на законодательно-нормативных актах и международных соглашениях, которые обеспечивают развитие средств связи в соответствии с государственными приоритетами и гарантируют, что работа оборудования различных служб радиосвязи не будет сопровождаться недопустимыми радиопомехами между оборудованием как в пределах одной радиослужбы, так и между различными радиослужбами.

Регулирование в сфере использования РЧС включает:

– определение долгосрочной политики и планирования

– использования РЧС путем совершенствования существующих,
развития и внедрения новых средств связи.

– частотно-территориальное планирование, координацию и
присвоение радиочастот средствам и сетям связи, вводимых в эксплуатацию;

– лицензирование и сертификацию РЭС;

– учет использования РЧС;

– разработку технических стандартов и нормативных документов;

– поддержку технических средств радиоконтроля;

– инспекцию средств связи па местах их эксплуатации;

– контроль за использованием спектра.

Одним из существенных рычагов, влияющих на эффективность использования РЧС и обеспечивающих поступление средств для совершенствования системы регулирования в сфере использования РЧС и системы радиочастотного контроля есть экономические меры,

цель которых - стимулировать потребителей РЧС к более рациональному использованию спектра и хотя бы частично компенсировать затраты на регулирования в сфере использования РЧС.

Основные экономические меры включают:

– плату пользователей РЧС за обеспечение каналов, свободных от радиопомех, и гарантию качественной связи;

– плату за подбор и присвоение радиочастоты и предоставление лицензии (разрешения) на ее использование;

– плату за сертификацию средств связи по ЭМС;

– штрафные санкции за нарушение правил ведения радиосвязи и несоблюдение параметров РЭС.

Системы регулирования в сфере использования РЧС разных стран имеют определенные различия, обусловленные особенностями внутригосударственного характера.

Эффективное регулирование в сфере использования спектрального ресурса обеспечивается за счет ведения постоянного учета и банков данных, необходимых для обеспечения процессов регулирования, широкого внедрения средств автоматизации, создание государственной системы радионадзора и радиочастотного мониторинга с необходимым техническим оснащением. Существует достаточно полная правовая база, в том числе для обеспечения широкого внедрения экономических методов регулирования:

Создаются открытые системы информации о радиочастотах, используемых (или не используемых) для объективного информирования всех заинтересованных потенциальных пользователей РЧС.

Применяются новые методы управления, в том числе автоматизированный, в целях эффективного регулирования использования РЧС в общеэкономическом плане.

Вводится понятие "экономическая ценность частоты.

Вводится более широкое использование аукционного типа продаж частот негосударственным пользователям.

Поддерживается эффективная конкуренция между потенциальными пользователями спектрального ресурса для оптимального его использования и внедрение различных новшеств в сфере услуг радиосвязи.

Сейчас, при быстро меняющихся на национальном и международном уровнях условий регулирования в сфере использования РЧС, некоторые страны провели важные реформы в деле национального распределения радиочастот, совершенствования методов системы регулирования в сфере использования РЧС.

1.2 Назначение и цель радиочастотного контроля

Система радиочастотного мониторинга – «глаза и уши» системы регулирования в сфере использования спектрального ресурса государства.

Роль и место радиочастотного мониторинга в сфере использования РЧС определяется прежде всего двумя аспектами:

– первый связан с повышением эффективности использования РЧС и обусловлен тем, что планирование использования и присвоения радиочастот базируется на расчетных методах, в которые для обеспечения соответствующих гарантий по ЭМС закладывают значительные резервы спектра, которые практически не используются, поэтому система радиомониторинга должна обеспечить оперативное выявление резервов радиочастот и повышения эффективности использования РЧС;

– второй аспект связан с тем, что самые лучшие методы оценки ЕМС, на основе которых принимаются решения о присвоении радиочастот, не позволяют в полной мере учесть всю многогранность и специфику реальной электромагнитной обстановки, что приводит к возникновению труднопрогнозируемым помеховых ситуаций.

Общая задача радиочастотного мониторинга - поддержка процесса регулирования и планирования в сфере использования РЧС - решается путем:

– решения случаев возникновения нежелательных электромагнитных помех на местном, региональном или глобальном уровне с целью обеспечения совместного функционирования радиостанций и радиослужб, снижения затрат на их развертывание и эксплуатацию, получения экономического эффекта за счет улучшения доступа к свободному от помех РЧС;

– обеспечения допустимого уровня помех телевидению и радиовещанию в сетях общего пользования (населением);

– предоставления информации относительно реального использования (загрузки) отдельных каналов и полос частот в целом;

– контроля технических и эксплуатационных характеристик РЭС и РИУ; – выявления и идентификации незаконно действующих передатчиков, установления соответствия выявленных излучений зарегистрированным РЭС; – поддержки программ радиочастотного мониторинга, организованных МСЭ.

Составной частью функций радиочастотного мониторинга при решении задач по обеспечению государственного надзора за использованием спектрального ресурса является

технический и эфирный радиочастотный контроль, который предназначен для повышения эффективности регулирования в сфере использования РЧС.

Основной целью радиочастотного контроля является выявление источников радиоизлучения (ИРИ), анализ параметров и характеристик их электромагнитных излучений, прием данных по электромагнитной обстановке, необходимых для решения задач регулирования в сфере использования РЧС и обеспечения контроля за соблюдением действующих норм радиоизлучений. Конкретные цели радиочастотного контроля следующие:

а) обеспечение следующих данных и информации касаемо:

– Реальной занятости полос частот электромагнитными излучениями в сопоставлении с разрешенным или запланированным загрузкой; – соответствия параметров сигналов требованиям лизензии;

– ведения и проверки регистрации частот;

–выявления, распознавания и определения местонахождения источников несанкционированных радиоизлучений и радиопомех;

б) содействие в решении проблем ЭМС при вводе в эксплуатацию новых радиосистем, присвоении рабочих радиочастот и заключении радиочастотных планов путем контроля границ зон обслуживания, параметров РЭС и выявления источников радиопомех конкретным радиосистемам;

в) содействие в обеспечении допустимого уровня радиопомех при приеме населением программ телевидения и радиовещания;

г) обеспечение информацией, связанной с решением конкретных задач пользователей РЧС, а также для программ международного радиочастотного мониторинга.

При радиочастотном контроле, решаются задачи:

а) измерения параметров и характеристик радиоизлучений, которые включают:

– частоту излучения;

– ширину полосы частот, реально занятой сигналом;

– уровень побочных и внеполосных излучений;

– девиацию частоты излучения;

– уровень поднесущих частот;

–уровень окружающих шумов для решения вопросов относительно дополнительного использования РЧС, например, путем применения широкополосных сигналов.

– специальные характеристики сигналов для конкретного вида радиослужбы, например, телевидение, широкополосных спутниковых передач и т.п.;

– напряженность поля и плотность потока мощности для:

– изучения и подтверждения принятых моделей распространения радиоволн и алгоритмов присвоении радиочастот;

–подтверждения результатов расчетов в отношении уровней сигнал / шум

б) определение:

– занятости полос частот для проверки принятых правил распределения и присвоения радиочастот и возможности повторного использования этих полос;

– класса излучения для оценки параметров модуляции;

– соответствия присвоенным значениям радиочастоты излучения ширины полосы радиочастот, реально занятой сигналом, девиации частоты излучения, уровней поднесущих частот;

в) проведение анализа параметров и характеристик радиоизлучений с целью:

– идентификации источников недопустимых радиопомех;

– проверки соответствия идентификационных сигналов (позывных) национальным и международным регламентам идентификации сигналов;

– идентификации незарегистрированных РЭС;

– пеленгации или определения местоположения источника недопустимой помехи или радиопередатчика, работающего с нарушениями национальных и международных стандартов и регламента;

г) участие в международном радиочастотном мониторинге для исключения взаимных радиопомех между РЭС и радиопомех в полосах частот, отведенных для подачи сигналов бедствия и обеспечения безопасности движения;

д) предоставление отчетов по результатам радиочастотного контроля для решения вопросов, связанных с разработкой стандартов и нормативных документов на параметры и характеристики радиоизлучений;

е) проведение периодических инспекционных проверок средств связи на их соответствие техническим, рабочим и регламентным условиям

ж) выявление проблемных вопросов для их дополнительных или более интенсивных исследований;

и) разработка предложений, рекомендаций и процедур по исключению радиопомех.

Эффективность радиочастотного контроля определяется:

– совершенством технических средств и оборудования радиочастотного контроля и уровнем их использования;

– применяемыми методиками измерений;

– функциональным программным и методическим обеспечением;

– уровнем квалификации персонала;

– организацией взаимодействия региональных станций радиочастотного контроля с центром и между собой;

– организацией постановки задач радиочастотного контроля.

Анализ мировой практики организации и планирования радиочастотного контроля показывает, что, несмотря на довольно полезные рекомендации МСЭ, единой концепции радиочастотного контроля не существует, поскольку эти рекомендации не определяют конкретные критерии его построения, поэтому в каждой стране вопрос организации, планирования и практической реализации радиочастотного контроля решаются по-своему.

2. ЗАДАНИЯ СЛУЖБЫ РАДИОМОНИТОРИГА

2.1 Задание службы радиомониторинга

Согласно Федерального закона "О связи", N 126-ФЗ главы 5. Государственное регулирование деятельности в области связи осуществляется с целью:

– защиты присвоений радиочастот;

– определения имеющегося для использования РЧС России;

- определение эффективности использования распределенных полос частот;

– разработка научно обоснованных рекомендаций для принятия соответствующих решений по повышению эффективности использования и удовлетворения потребностей пользователей РЧС России.

Таким образом, радиомониторинг, "как наблюдение за реальным состоянием использования РЧС, предусматривает решение следующих задач:

– оценивания реального состояния электромагнитной обстановки;

– получения данных для оценки эффективности использования РЧС;

– участие в международных программах по радиомониторинга;

– выявления нарушений в сфере использования РЧС и пользование РЧС;

– измерения параметров радиоизлучения РЭС и ИУ.

Реализация первых трех задач обеспечивает решение одного из основных задач службы радиомониторинга - мониторинга радиочастотного спектра. Измерение параметров радиоизлучения РЭС согласно перечню работ, выполняемых Российским государственным центром радиочастот (РЧЦ) относятся к категории работ по техническому радиоконтролю

параметров излучения РЭС и ИУ. Задача по выявлению нарушений в сфере использования РЧС и пользование РЧС и обеспечению электромагнитной совместимости РЭС и ИУ решаются как в процессе проведения мониторинга спектра, так и во время проведения технического радиоконтроля. Таким образом, основными составляющими радиочастотного мониторинга можно определить:

- непосредственный мониторинг радиочастотного спектра;
- технический радиоконтроль параметров радиоизлучений РЭС и ИУ.

В целом задача по получению необходимой пользователям информации решается путем:

– определение реальной занятости спектра (частот частотных каналов,

– полос и диапазонов частот.

- выявления источников радиоизлучений (ИРИ);
- измерения параметров и определения характеристик радиоизлучений;
- идентификации радиоизлучений с зарегистрированными ИРИ;
- определение соответствия параметров и характеристик радиоизлучений параметрам и характеристикам ИРИ, которые зарегистрированы в базе данных (БД) учета частотных присвоений (учета РЭС);
- выявления незарегистрированных ИРИ;
- местоопределения ИРИ;
- проведения измерений в рамках выполнения работ по программам МСЭ и Европейской конференции администраций почты и связи;
- учета, хранения и обработки результатов радиомониторинга.

Таким образом, радиомониторинг является основным инструментом получения объективной информации относительно реального состояния электромагнитной обстановки и использования РЧС. По результатам радиомониторинга делаются выводы относительно соответствия реальной электромагнитной обстановки прогнозируемой, а также о наличии нарушений в сфере использования РЧС. Эти результаты являются основанием для осуществления надзора за выполнением установленных правил в этой сфере и принятия соответствующих мер по устранению причин выявленных нарушений.

С учетом этого в дальнейшем термин "радиомониторинг" будет употребляться под таким определением:

Радиомониторинг - комплекс организационных и технических мероприятий по сбору, обработке, анализу и изображения данных о параметрах и характеристиках сигналов

радиоизлучения РЭС, ИУ и других ИРИ с целью получения необходимой информации для принятия управленческих решений в сфере использования РЧС.

2.2 Задача службы инспектирования радиоконтроля

Согласно нормативным документам на службу радио-инспектирования, как правило, возлагается решение следующих задач:

а) оценка параметров излучений радиоэлектронных средств и (или) высокочастотных устройств, установленных решениями о выделении полос радиочастот либо разрешениями на использование радиочастот или радиочастотных каналов и предусмотренных национальными стандартами и техническими регламентами, определяющими обязательные требования к параметрам излучений радиоэлектронных средств и (или) высокочастотных устройств;

б) поиск не разрешенных для использования радиоэлектронных средств и (или) высокочастотных устройств;

в) выявление по заявкам пользователей радиочастотного спектра источников создания недопустимых радиопомех радиоэлектронным средствам гражданского назначения в полосах радиочастот преимущественного пользования радиоэлектронными средствами гражданского назначения и совместного пользования радиоэлектронными средствами любого назначения;

г) контроль за излучениями радиоэлектронных средств и (или) высокочастотных устройств в целях обеспечения международно-правовой защиты присвоения (назначения) радиочастот или радиочастотных каналов, в отношении которого осуществляется международно-правовая защита.

Надзор за пользованием РЧС проводится с целью:

– обеспечения соблюдения пользователями РЧС установленных правил в сфере использования РЧС;

– обеспечения ЭМС РЭС;

– обеспечение безопасности государства, интересов и прав ее граждан;

– предотвращение правонарушений в сфере пользования РЧС;

– проверки правовых оснований (наличия разрешительных документов)

– деятельности пользователей РЧС и функционирования РЭС и ИУ с заданными параметрами и характеристиками.

Решение этих задач обеспечивается путем:

– проведения контроля параметров радиосигналов передатчиков РЭС непосредственно на местах их эксплуатации;

– выявления нарушений в сфере пользования РЧС;

– принятие мер по устранению выявленных нарушений.

Характерной особенностью надзора за пользованием РЧС является то, что он проводится по конкретному ИРИ (РЭС или ИУ).

3. МЕТОДЫ РАДИОМОНИТОРИНГА

3.1 Методы проведения радиомониторинга

На данном этапе развития средств контроля РЧС отсутствует общепринятый термин для обозначения методов проведения радиомониторинга.

Нужно отметить, что по способу и месту выполнения радиомониторинга оба его составляющие (непосредственный мониторинг спектра и технический радиоконтроль параметров радиоизлучения) относятся к категории мероприятий, которые реализуются путем применения дистанционных методов, базирующихся на проведении анализа радиоизлучений, распространяющихся в пространстве и принимаются антенными системами (АС) технических средств радиомониторинга. Мониторинг радиочастотного спектра организуется:

- на основании плановых или внеплановых заданий;
- по заявлениям о наличии радиопомех для РЭС пользователей РЧС;
- по запросам относительно практической проверки расчетных условий ЭМС по результатам частотного планирования;

– по запросам органов регулирования в сфере пользования РЧС.

Мониторинг радиочастотного спектра реализуется путем использования таких методов:

- поиск и выявление радиоизлучения в заданном диапазоне (полосе) частот (на заданной частоте);
- наблюдения за радиоизлучением в определенном диапазоне (полосе) частот (на заданной частоте);

– селекция радиоизлучений;
– оценивание параметров радиоизлучения;
– пеленгования ИРИ;
– местоопределение ИРИ;
– идентификация радиоизлучения и ИРИ

Проведение мониторинга радиочастотного спектра организуется преимущественно с применением стационарных и мобильных средств. Портативные средства могут применяться для инструментального оценивания параметров радиоизлучения РЭС при проведении мониторинга спектра лишь в исключительных случаях в тех местах, где проведение мониторинга с использованием других технических средств невозможно, а также для уточнения результатов, полученных с использованием мобильных комплексов радиомониторинга.

3.2 Поиск и выявление радиоизлучения

Поиск и выявление радиоизлучения осуществляется путем проведения кратковременного выборочного наблюдения в определенных полосах радиочастот или на определенных частотах и выявление радиоизлучений, имеющихся в этих полосах частот (на этих частотах).

Поиск и выявление радиоизлучения системой радиомониторинга осуществляется, как правило, путем применения стационарных и мобильных комплексов радиомониторинга, входящих в нее. Портативные средства радиоконтроля используются только в исключительных случаях.

Надо иметь в виду, что в реальных условиях оказываются не радиоизлучения и измеряются не параметры радиоизлучения, а выявляются радиосигналы, вызванные соответствующими радиоизлучениями, принятыми антеннами технических средств радиомониторинга, и измеряются параметры радиосигналов.

При использовании автоматизированных стационарных комплексов (станций) радиомониторинга такое решение принимается автоматически по определенным критериям, которые могут быть определены заранее или заданные оператором для конкретного случая контроля.

В некоторых случаях (в частности, в случае проведения поиска и обнаружения излучений маломощных или широкополосных передатчиков) оператор вообще может не получить никакой информации относительно наличия радиоизлучения и значений

параметров радиосигналов. Последнее обусловлено необходимостью иметь для анализа достаточно большие значения уровней сигналов для обеспечения получения достоверных данных по результатам измерений некоторых параметров.

Поиск и обнаружение радиоизлучений реализуется путем выполнения таких процедур:

– определения полосы частот анализа (путем установления значений частоты ее верхней и нижней границы);

– вида модуляции (для обеспечения корректного инструментального оценивания ширины полосы частот);

- скорости сканирования (в случае поиска в полосе частот) и количества циклов сканирования;
- сканирования заданной полосы частот;
- выявление радиосигналов.
- как отмечено выше, под обнаружением радиосигналов подразумевается процесс принятия решения о наличии или отсутствии полезного сигнала в анализируемой выборке колебаний.

Учитывая то, что сейчас работа практически всех комплексов радиомониторинга базируется на использовании цифровых методов обработки сигналов, то спектр сигнала и сам сигнал можно считать независимыми, что значительно упрощает оптимизацию алгоритмов обнаружения.

Увеличение продолжительности поиска (наблюдения) и применения режима накопления отсчетов спектра сигнала обеспечивает большую вероятность обнаружения сигналов. Однако нужно учитывать, что сложность решения задачи по выявлению радиоизлучения значительно отличается для сигналов различных классов радиоизлучения.

Так, например, обнаружение широкополосных сигналов при неопределенной несущей частоте, ширине спектра сигнала, вида и параметров модуляции, закона распределения отсчетов сигнала и т.п. представляет собой достаточно сложную проблему, которая иногда не может быть решена даже автоматизированными способами. Обработка узкополосных сигналов, которые характеризуются большим отношением сигнал / шум, может успешно осуществляться с применением достаточно простой модели процессов, которые наблюдаются, и требует минимального объема данных.

Значительно сложнее обнаружить широкополосные сигналы, особенно РЭС систем (радиотехнологий), принцип действия которых основан на применении метода скачкообразного изменения частоты (Frequency Hopping FH). Для таких сигналов на

большом интервале времени уровень средней мощности, который приходится на каждую частотную позицию, сопоставим с уровнем шумов, что значительно усложняет их обнаружение. Но, поскольку известно, что такой сигнал многократно, например, за одну секунду, меняет свою частоту, то уровни мгновенной мощности его излучения на определенных частотах в определенные моменты времени бывают достаточно значительными, что способствует возможности выявления такого сигнала на некоторых частотных позициях. При этом остается открытым вопрос о том, принадлежат эти позиции одному РЭС или нескольким, которые, вполне возможно, работают независимо друг от друга. Хотя факт обнаружения такого сигнала можно считать установленным. В случае использования современных высокоэффективных автоматизированных комплексов радиомониторинга в режиме панорамного спектрального анализа в полосе частот анализа могут наблюдаться отдельные всплески спектра сигнала. Результаты исследований свидетельствуют, что даже в случае применения таких комплексов, если продолжительность сообщения составляет несколько секунд, количество выявленных частотных позиций сигнала со скачкообразной сменой частоты незначительна. Для выявления таких сигналов считается достаточным проведение от 3 до 6 (циклов сканирования).

3.3 Наблюдения за радиоизлучениями

Наблюдение за радиоизлучением представляет собой процесс длительного и целенаправленного восприятия информации относительно наличия радиоизлучений в определенном диапазоне (полосе) частот (на заданной частоте) и оценивания значений их параметров. Оно реализуется с помощью автоматизированных стационарных комплексов радиомониторинга и, как правило, мобильных комплексов с целью определения динамических характеристик существования радиоизлучения, в частности, для оценки занятости диапазонов и полос радиочастот, радиочастотных каналов (отдельных частот) и интенсивности работы РЭС.

Наблюдение реализуется путем выполнения таких процедур:

– задания частот, соответствующих верхней и нижней границе полосы частот наблюдения;

– задания временных режимов анализа (периодичности и интервала) и критериев выявления радиоизлучения (по определенным уровням сигнала или напряженности электромагнитного поля излучения);

– выполнения задания по выявлению радиоизлучений;

В случае необходимости проведения пространственной селекции радиоизлучений для наблюдения за конкретным радиоизлучением, как исключение может применяться портативное оборудование с использованием направленных АС. Но в этом случае, ввиду отсутствия специализированного программного обеспечения (ПО), которое способно обеспечивать выполнение задач по наблюдению за радиоизлучением автоматизированным способом, реализация этой задачи возможна только в ручном режиме с последующей отдельной обработкой полученной информации.

3.4 Селекция радиоизлучений

Селекция радиоизлучений - это разделение радиоизлучений на определенные группы (категории) по определенным критериям в процессе проведения мониторинга радиочастотного спектра и технического радиоконтроля. Цель проведения селекции - выявление радиоизлучений, относящихся к определенным группам (категориям). Критерии, по которым может проводиться селекция радиоизлучений, зависят от содержания поставленных задач. В частности, такими критериями могут быть:

– ширина полосы (диапазон) частот радиоизлучения;

– уровень сигнала (напряженность электромагнитного поля радиоизлучения.

– вид модуляции сигнала; – направление, с которого поступает радиоизлучение;

– временные характеристики работы ИРИ;– наличие (или отсутствие) сведений о ИРИ, которому принадлежит определенное радиоизлучение, в БД учета РЭС (учета присвоений частот).

Осуществление селекции радиоизлучений заключается в реализации таких процедур:

– выявления излучений в заданной полосе частот (на определенной частоте); – предыдущие оценивания параметров радиоизлучения;

– проведение анализа относительно соответствия параметров и характеристик радиоизлучений (параметров и характеристик сигналов) заданным критериям;

– принятие решения о принадлежности конкретного радиоизлучения к определенной категории.

Селекция радиоизлучений является вспомогательной предварительной процедурой для проведения идентификации, пеленгования и инструментального оценивания параметров радиоизлучений.

Пространственная селекция, наряду с идентификацией радиоизлучений, проводится с целью установления факта, какая именно РЭС является источником анализируемого радиоизлучения.

Наличие и возможность использования на автоматизированных рабочих местах (АРМ) автоматизированных средств радиомониторинга, а также возможность применения результатов выполнения предыдущих задач по радиомониторингу, хранящихся в БД радиообстановки, значительно упрощает проведение селекции. Под измерением (инструментальным оцениванием) параметров радиоизлучения подразумевается отображение физических величин и их значений с помощью специальных технических средств. В случае применения функционально завершенных автоматизированных стационарных комплексов радиомониторинга, оснащенных направленными антенными системами, измерения параметров радиоизлучения осуществляется автоматически в процессе выполнения поставленных задач радиомониторинга. Сам процесс измерения в этом случае заключается в реализации таких процедур:

– проведение панорамного спектрального анализа в полосе частот, в которой планируется измерение параметров определенного радиоизлучения;

– выявление необходимого радиоизлучения и ориентировочное определение направления на его источник с применением ненаправленных или слабонаправленных антенн;

– уточнение направления ИРИ путем применением остронаправленных антенн (при наличии такой возможности);

– оценивания ширины полосы частот, которую занимает радиоизлучение;

– анализ заданной полосы частот и смежных с ней полос относительно отсутствия (наличия) посторонних радиоизлучений и, при их наличии, ориентировочное оценивание степени возможного влияния этих излучений на достоверность измерений;

– постановка задачи к измерениям параметров радиосигнала (уровня, частоты, стабильности частоты, сдвига частоты, девиации частоты, ширины полосы частот сигнала и т.д.), вычисления параметров радиоизлучения (напряженности электромагнитного поля, мощности и др.) и определения характеристик радиоизлучения (вида модуляции, класса радиоизлучения);

– проведение измерений и анализ результатов.

3.5 Измерение параметров радиоизлучения

Особенность инструментального оценивания параметров радиоизлучения с применением автоматизированных стационарных и мобильных комплексов радиомониторинга, которыми оснащены управления радиочастотного мониторинга (УРЧМ) и подразделения радиочастотного контроля в региональных филиалах УГЦР, заключается в том, что в подавляющем большинстве комплексов отсутствуют направленные измерительные антенны, поэтому все измерения проводятся с применением ненаправленных антенн.

В связи с унификацией интерфейса большинства автоматизированных стационарных и мобильных комплексов радиомониторинга процедура проведения инструментального оценивания параметров радиоизлучения обычно также стандартизирована и реализуется путем выполнения таких процедур:

– проведение панорамного спектрального анализа в определенной полосе частот;

– визуальное обнаружение радиоизлучений, оценка параметров которых планируется;

– анализ панорамы спектра в заданной полосе частот и в смежных полосах с целью выявления посторонних радиоизлучений, которые могут помешать проведению инструментального оценивания, приблизительное оценивание степени их возможного влияния на достоверность измерений;

– предыдущее оценивания уровня сигнала и ширины полосы частот, которую занимает определенное излучения;

– постановка задачи по проведению инструментального оценивания параметров радиосигнала;

– получение и анализ результатов инструментального оценивания.

Для получения как можно большей достоверности измерений их повторяют несколько раз и применяют режим накопления результатов (режим MaxHold).

В случае определения ширины контрольной или занимаемой полосы частот путем ее измерения на определенном уровне необходимо убедиться, что уровень сигнала, анализируется, как минимум на 5 дБ больше заданного уровня, а ширина полосы частот анализа больше ширины полосы частот контролируемого радиоизлучения.

По этому методу как правило чаще всего проводятся измерения параметров излучений мощных передатчиков, применяемых для радиовещательной и радиолокационной служб. Помимо получения результатов оценки по целевому назначению (как следствия выполнения задания) они могут также быть использованы для идентификации радиоизлучений и ИРИ.

Этот метод самый распространенный для проведения измерения параметров радиоизлучения РЭС фиксированной связи (передатчиков радиорелейных станций, земных станций спутниковой связи, базовых станций радиотехнологий WiMAX, Wi-Fi, передатчиков радиовещательной службы, которые находятся за пределами зон радиодостижения стационарных радиоконтрольних постов (РКП)), а также для выявления радиопомех в случае проведения мониторинга спектра с применением мобильных средств.

3.6 Пеленгование ИРИ

Пеленгования ИРИ имеет своей целью определение направления (пеленга) на ИРИ с целью установления его местонахождения. При использовании автоматизированных стационарных средств радиомониторинга пеленг на ИРИ определяется путем реализации таких процедур:

1) проведение панорамного спектрального анализа в полосе частот, в которой планируется пеленгования;

2) выявления радиоизлучения, источник которого нужно запеленговать.

3) осуществление анализа панорамы спектра в заданной полосе частот и в смежных с ней полосах с целью выявления посторонних радиоизлучений, которые могут негативно повлиять на результаты пеленгования;

4) постановка задачи по проведению пеленгования для определенных РКП данной региональной подсистемы радиомониторинга;

5) получение и анализ результатов пеленгования.

3.7 Определение местоположения ИРИ

Определение местоположения ИРИ - это определение его ueографических координат с помощью технических средств радиомониторинга. Процедура определения местонахождения ИРИ во время проведения радиомониторинга основывается на использовании результатов определения направлений на него. Содержание этой процедуры имеет некоторые отличия в зависимости от типа применяемого оборудования.

Например, местонахождение ИРИ определяется:

– в случае применения стационарных средств радиомониторинга - как точка пересечения минимум двух пеленгов на ИРИ, измеренных с разных территориально разнесенных пунктов;

– в случае применения мобильных комплексов (станций) радиомониторинга - путем совместной обработки и расчета географических координат ИРИ по результатам измерений пеленга на ИРИ из нескольких территориально разнесенных пунктов по маршрутам движения комплексов.

Определение местоположения ИРИ АСРМ реализуется путем использования только автоматизированных стационарных и мобильных комплексов радиомониторинга и основывается на использовании результатов пеленгования этого ИРИ.

В случае применения автоматизированных стационарных комплексов радиомониторинга местонахождение ИРИ определяется по классическим методам как точка пересечения минимум двух пеленгов на ИРИ, измеренных с разных территориально разнесенных позиций, путем реализации таких процедур:

1) проведение панорамного спектрального анализа в полосе частот, в которой планируется проведение пеленгования и местоопределения ИРИ, и в смежных с ней полосах с целью выявления посторонних радиоизлучений,

2) постановка задачи по проведению синхронного пеленгования на определенной частоте радиоизлучения для нескольких (минимум двух) РКП, входящих в состав автоматизированной региональной подсистемы радиомониторинга;

3) получение результатов относительно ориентировочного места расположения ИРИ;

4) определение географических координат местонахождения ИРИ с применением электронной карты местности;

5) уточнение географических координат ИРИ путем усреднения полученных результатов.

При использовании мобильных комплексов радиомониторинга местонахождение ИРИ определяется методом "широкоапертурной антенны".

3.8 Идентификация радиоизлучений

Под идентификацией радиоизлучения подразумевается его классификация (отнесение к определенному классу или группе) за счет определения обнаруженных признаков этого излучения и сравнения его характеристик с известными. Идентификация радиоизлучения нужна, во-первых, для проведения идентификации ИРИ, во-вторых, для определения и последующего задания режимов измерения параметров радиоизлучения и определения его характеристик (например, вида модуляции). Процедура идентификации может также применяться в отношении новых или неизвестных радиоизлучений.

На практике для идентификации радиоизлучений применяется двухступенчатая процедура их распознавания:

– раннее распознавание известных или стандартизированных радиосигналов;

– распознавание радиосигналов по их характеристикам и параметрам.

В первом случае распознавание основывается на отличительных признаках, которые содержатся непосредственно в радиосигналах

Раннее распознавание относится к методам активного распознавания. Оно довольно неэффективно, поскольку имеет слишком ограниченное применение и практически не используется для распознавания цифровых радиосигналов.

Во втором случае для распознавания используются такие признаки (характеристики и параметры) радиосигналов:

– тип сигнала: аналоговый или цифровой;
– ширина полосы частот;
– спектральные и временные характеристики сигнала (форма спектра, форма сигнала во временной области (непрерывный или пакетный);
– продолжительность временного интервала;
– вид и характеристика модуляции.

3.8.1 Методы идентификации и анализ параметров радиосигналов

Анализ структуры параметров радиосигналов (параметров радиоизлучения) с последующей статистической обработкой информации относительно параметров излучения РЭС относится к категории пассивных методов распознавания (пассивных потому, что структура сигнала не содержит в себе никаких отличительных признаков). При этом используются информационные, энергетические, временные и спектральные параметры радиосигналов, характерные для излучения конкретного передатчика.

Методы идентификации аналоговых и цифровых радиосигналов существенно отличаются друг от друга. Идентификация аналоговых радиосигналов осуществляется путем применения таких операций:

Шаг 1: непосредственное прослушивание демодулированного АМ, ЧМ или ФМ сигналов, при условии успешной их демодуляции и фильтрации.

Шаг 2: воспроизведение демодулированного аналогового ТВ сигнала.

Шаг 3: распознавание речевой информации с помощью расчетов и построения гистограмм изменений пиковых уровней сигналов вещания.

Шаг 4: панорамное представление, частотно-временное воспроизведение сигнала для определения вида сигнала, инструментального оценивания параметров сигнала (частоты, ширины полосы частот, параметров модуляции) и определения характеристик модуляции.

Для распознавания цифровых радиосигналов применяются:

– Инструментальное оценивание сдвига частоты;

– Оценка скорости передачи информации;

– Анализ потока битов.

Под идентификацией ИРИ подразумевается определение принадлежности данного электромагнитного излучения к конкретному источнику на основе анализа и сравнения характеристик этого излучения с известными. Целью проведения идентификации ИРИ является проверка выполнения определенным пользователем РЧС условий заключенных договоров, документов, норм и правил в сфере использования РЧС.

Нормативные основания проведения идентификации ИРИ урегулированные в. 18 Регламента радиосвязи, в частности, в том, что "все передачи должны обеспечивать их распознавание с применением опознавательных признаков или другими методами".

К опознавательным признакам относятся: позывной сигнал, название радиостанции, пеленг на радиостанцию или ее географические координаты, название организации, эксплуатирующей радиостанцию, официальный регистрационный номер, опознавательный номер рейса (для самолета), характерный сигнал, характеристики радиоизлучения и другие признаки, обеспечивающие распознавание радиоизлучения в международном масштабе.

Идентификация ИРИ осуществляется путем применения таких операций:

Шаг 1: проведение идентификации радиоизлучения путем определения характеристик и инструментального оценивания параметров радиоизлучения и его классификации.

Шаг 2: проверка возможной принадлежности данного радиоизлучения какому либо из известных передатчиков (РЭС) с БД учета РЭС или передатчиков, информация о которых содержится в БД учета частотных присвоений, излучение которых было ранее зарегистрировано средствами радиоконтроля.

Шаг 3: принятие решения о принадлежности определенного

Радиоизлучения конкретном передатчику (РЭС).

В процессе проведения идентификации оператор имеет дело как с известными радиоизлучениями, что значительно упрощает процесс получения информации о РЭС с БД учета присвоений частоты и БД радиообстановки, так и с неизвестными радиоизлучениями.

В этом случае эффективность проведения идентификации радиоизлучения в значительной степени зависит от квалификации и опыта работы оператора.

В связи с тем, что радиомониторинг осуществляется постоянно, это обеспечивает достаточно высокую эффективность идентификации радиосигналов и идентификацию ИРИ.

По результатам обработки данных радиомониторинга:

– определяются оценки и делаются выводы относительно степени, эффективности и интенсивности использования (занятости) полос частот (частотных каналов, частот);

– предоставляются предложения относительно перераспределения полос частот в целях обеспечения эффективного использования РЧС;

– предоставляется информация о выявленных нарушениях в сфере пользования РЧС, что может быть основанием для проведения технического радиоконтроля или реализации мероприятий по устранению их причин или прекращения работы РЭС, нарушающих установленные нормы, правила или требования разрешительных документов.

3.9 Технический радиоконтроль

Технический радиоконтроль организуется:

– на основании выполнения плановых или внеплановых заданий;

– на основании соглашений с пользователями РЧС о проведении технического радиоконтроля параметров радиоизлучения;

– в случае выявления нарушений в сфере пользования РЧС по результатам проведения радиомониторинга;

– по заявлениям пользователей РЧС о наличии радиопомех для РЭС в определенном месте. Технический радиоконтроль (ранее этот вид радиоконтроля называли эфирным радиоконтролем), как правило, проводится с применением многофункциональных мобильных комплексов (станций) радиомониторинга, специализированных мобильных станций радиоконтроля и переносного (носимого) оборудования. В ряде случаев (например, для проведения технического радиоконтроля параметров радиоизлучения мощных передатчиков радиовещательной и радиолокационной служб) могут применяться стационарные средства радиомониторинга.

В общем случае технический радиоконтроль реализуется путем применения следующих методов:

1) поиск и выявление радиоизлучений в заданной полосе частот (на заданной частоте);

2) селекция радиоизлучений;

3) измерение (инструментальное оценивание) параметров адиоизлучения с применением автоматизированных стационарных комплексов радио-мониторинга, специализированных и многофункциональных мобильных комплексов радиоконтроля;

4) измерения параметров радиоизлучения с применением портативного или носимого оборудования;

5) местоопределения ИРИ;

6) идентификации радиоизлучения и ИРИ;

7) инструментальное оценивание показателей качества обслуживания и показателей качества предоставления услуг.

Поиск радиоизлучения в процессе технического радиоконтроля реализуется путем выполнения таких процедур:

– определение пункта, где планируется проведение работ по выявлению радиоизлучения и измерения его параметров;

– расположение технического средства радиоконтроля в определенном пункте;

– постановка задачи на проведение сканирования полос радиочастот (отдельных радиочастот) с указанием диапазона частот сканирования, скорости сканирования, вида модуляции;

– сканирования определенных полос радиочастот;

– получения результатов и их анализ;

– выявления необходимого радиоизлучения;

– повторение процедуры поиска в другом пункте в случае отсутствия радиоизлучения в месте контроля.

3.10 Измерения параметров радиоизлучения

Измерения параметров радиоизлучения в процессе проведения технического радиоконтроля не отличается от методов измерения при мониторинге спектра.

Измерения параметров радиоизлучения в случае применения специализированных мобильных комплексов технического радиоконтроля несколько отличается от рассмотренных выше методов измерения при использовании стационарных и мобильных средств радиомониторинга общего назначения. Это обусловлено расширенными возможностями таких комплексов, в частности, наличием измерительных антенных систем

(АС), возможностью пространственной селекции радиоизлучений за счет вращения антенн в азимутальной плоскости и изменения угла их наклона. Существенное преимущество специализированных мобильных средств контроля - это большая достоверность измерений благодаря возможности проведения контроля непосредственно у места расположения РЭС или в месте, где наблюдаются радиопомехи.

Процесс измерения параметров радиоизлучения в случае применения портативных (носимых) средств радиоконтроля заключается в реализации таких процедур:

– проведение панорамного спектрального анализа в полосе частот, в которой планируется выполнение радиоконтроля параметров радиоизлучения, с применением ненаправленный или слабо направленных антенн.

– визуальное обнаружение запланированного радиоизлучения;

– установление направленной измерительной антенны и определения ориентировочного направления на источник, излучение которого анализируются;

– анализ заданной полосы частот и смежных с ней полос для выявления отсутствия (наличия) посторонних радиоизлучений, которые могут помешать проведению контроля или повлиять на его результаты;

– ориентирования антенны на ИРИ по критерию максимального значения уровня сигнала на экране дисплея измерительного средства;

– определения параметров радиосигнала (частоты, ширины полосы частот);

– анализ полученных результатов.

4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ СТРУКТУРЫ И МЕТОДОВ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

4.1 Требования к сетям мобильной связи с позиционированием мобильных терминалов

Главной задачей сети является обеспечение возможности совместного использования ресурсов в реальном времени. В рассматриваемом случае совместно используемыми ресурсами являются радиоканалы передачи и вычислительная подсистема. Для того, чтобы сеть мобильной связи успешно справлялась как с задачами предоставления услуг собственно связи и передачи данных, так и с задачами позиционирования, вычислительная подсистема должна отвечать требованиям по производительности, надежности и др. Конкретизируем эти требования применительно к задаче обеспечения работы

вычислительной подсистемы при больших перепадах интенсивности вычислительной нагрузки. Заметим, что с этих позиций сеть мобильной связи следует рассматривать как систему критичного применения, т.е. систему с жесткими требованиями к быстродействию, надежности, другим наиболее важным характеристикам и принципам построения.

Производительность вычислительной сети определяет объем передаваемых данных и время, требуемое на их передачу. Для оценки производительности сетей общего назначения используются общепринятые числовые характеристики – время реакции сети, средняя пропускная способность, максимально возможная пропускная способность, задержка передачи. Применительно к системам критичного применения пропускная способность задается, непосредственно исходя из максимальной ожидаемой скорости протекания процессов в обслуживаемой системе. В дальнейшем она может изменяться (как правило, в сторону увеличения) при изменении требований к системе в целом. Например, для системы позиционирования важным фактором является максимальная ожидаемая интенсивность запросов в локальной зоне обслуживания. Однако при этом время реакции и задержка передачи данных могут меняться в широких пределах, что недопустимо при решении задач позиционирования. Поэтому приоритетными требованиями к вычислительной сети являются предельно допустимые значения именно времени реакции и задержки передачи данных.

Надежность означает вероятность того, что сеть выполняет свои функции. Надежности технических устройств обычно характеризуется временем наработки на отказ и коэффициентом готовности (процент времени, в течение которого система может быть использована). Надежность инфокоммуникационных сетей также характеризуется вероятностью доставки сообщения адресату. Надежность и ремонтопригодность сетей систем критичного применения должны быть такими, чтобы при отказах элементов снижение характеристик системы не выходило за некоторые, заранее определенные пределы. Время восстановления оборудования или программного обеспечения не должно превышать десятки секунд, максимум одну-две минуты.

Безопасность означает защиту от несанкционированного доступа к данным и обеспечение надежности и устойчивости к преднамеренным разрушающим действиям.

Расширяемость – это возможность сравнительно легкого добавления новых элементов сети. Для систем критичного применения выдвигается дополнительное требование – возможность модификации сети в процессе ее функционирования, без снижения эксплуатационных характеристик.

Масштабируемость – это возможность наращивания размеров сети, в том числе путем присоединения дополнительных сегментов, например, новых ячеек с базовыми станциями.

Прозрачность означает возможность использования ресурсов сети одним и тем же способом независимо от их фактического размещения – на локальном компьютере, в специализированном вычислителе или в промежуточных узлах сети. При этом пользователь как бы «не замечает» сети, работая непосредственно с ресурсами.

Поддержка разных видов трафика – возможность совмещения функций различных сетей, например телефонной, связной и вычислительной (компьютерной).

Управляемость – возможность централизованного обнаружения и устранения сбоев, неисправностей, распределения ресурсов и полномочий между пользователями. Остановимся на этой задаче подробнее, поскольку для большой пространственно распределенной корпоративной сети критичного применения эффективность управления имеет важнейшее значение.

Для управления корпоративными компьютерными сетями, включающими большое количество активного оборудования, необходимы сложные системы управления, осуществляющие мониторинг, контроль и управление каждым элементом компьютерной сети.

По результатам анализа систем управления компьютерными сетями можно определить общие требования, предъявляемые к таким системам. Идеальная система наблюдает за сетью и предотвращает возникновение сбоев в ее работе. При этом, обнаружив (спрогнозировав) проблему, система активизирует определенное действие, исправляет ситуацию и уведомляет администратора о том, что произошло и какие шаги предприняты. Одновременно с этим система управления должна накапливать статистические данные, на основании которых можно планировать развитие сети. В общем случае, система должна быть независимой от производителя и обладать удобным интерфейсом, позволяющим выполнять все действия с одной консоли.

Существующие системы управления, несмотря на их функциональную избыточность, не имеют в своем составе развитых интеллектуальных средств, позволяющих качественно прогнозировать поведение компьютерной сети. Большинство средств управления в действительности сетью не управляет, а всего лишь пассивно осуществляет ее мониторинг. Они следят за сетью, но не выполняют активных действий, при этом

фиксируя только факт сбоя. Идеальным решением была бы разработка системы анализа, прогнозирования и локализации возможных сбоев в работе как компьютерной сети в целом, так и отдельных ее элементов. Такое свойство системы поможет заранее выявить возможные узкие места и принять меры по заблаговременной их ликвидации. Однако такая система управления практически нереализуема для работы в условиях критичного применения [25,105,106]. Поэтому реальным подходом к решению данной задачи представляется текущая адаптация некоторых подсистем системы в целом к изменяющимся условиям применения, перераспределение ресурсов сети для решения конкретных приоритетных задач (например, при возникновении экстремальных ситуаций различного характера). Такой подход вполне логичен и естествен, если учесть, что любая крупная корпоративная сеть состоит из отдельных сегментов, которые сравнительно слабо влияют друг на друга.

Проанализируем характеристики ожидаемой нагрузки на информационно-вычислительную подсеть сети мобильной связи, которая должна работать в реальном времени и в экстремальных условиях, возникающих в моменты включения системы позиционирования, т.е. в условиях критичного применения. Для этого рассмотрим, прежде всего, потенциальные статистические характеристики системы позиционирования, поскольку от длительности настройки алгоритма и выхода на стационарный режим измерения зависит объем вычислительной нагрузки. Имея данные характеристики, можно обосновать требования к вычислителю и, соответственно, рекомендации по программной и/или аппаратной реализации его элементов.

4.2. Оценка потенциальных характеристик измерителя

Для оценки точности и помехоустойчивости измерителя необходимо решить уравнения для апостериорных дисперсий ошибок фильтрации, т.е. для диагональных элементов корреляционной матрицы [107].

$$\mathbf{K}(t_k+\Delta T)=\left[\mathbf{K}^{-1}(t_k)+\mathbf{\Pi}(\bar{\mathbf{X}})\Big|_{\bar{\mathbf{X}}^*(t_k)}\right]^{-1};$$
$$\mathbf{K}(t_{k+1})=\mathbf{\Phi}(t_{k+1},t_k+\Delta T)\cdot\mathbf{K}(t_k+\Delta T)\mathbf{\Phi}^T(t_{k+1},t_k+\Delta T)+\mathbf{K}_d(t_{k+1},t_k+\Delta T). \quad (4.1)$$

Матрица $\mathbf{K}_d(*)$ находится путем решения дифференциального уравнения типа уравнения Риккати:

$$\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{K}_d(t,t_k+\Delta T)=\mathbf{F}(t)\mathbf{K}_d(t_1t_k+\Delta T)+\mathbf{K}_d(t,t_k+\Delta T)\mathbf{F}^T(t)+\mathbf{G}(t)\mathbf{G}^T(t);$$
$$\mathbf{K}_d(t_0,t_0)=0. \quad (4.2)$$

Матрица $\Pi(\bar{X})\Big|_{\bar{X}^*(t_k)}$ находится из уравнения, аналогичного уравнению (3.10а), где вместо истинного значения вектора $\bar{X}(t_k)$ берется его текущая оценка $\bar{X}^*(t_k)$. В соответствии с уравнениями (3.8) матрица $\Pi(\bar{X})\Big|_{\bar{X}^*(t_k)}=\|\rho_{ij}\|$ содержит следующие ненулевые элементы:

$$\rho_{11}=2q\frac{\pi}{\tau_c^2};\ \rho_{44}=q\frac{\pi}{\tau_c^2};\ \rho_{14}=\rho_{41}=\rho_{44}/c=q\frac{\pi}{c\tau_c^2};\ \rho_{17}=\rho_{71}=-4q\omega_0;$$

$$\rho_{47}=\rho_{74}=-2q\frac{\omega_0}{c};\ \rho_{77}=-4q,$$

где $q=2E_c/N_{\text{п}}$ – отношение энергии сигнала к усредненной в полосе приема спектральной плотности помех и шумов.

В практических задачах уравнения (4.1 – 4.2) можно решить только численными методами [95 – 97]. Для анализа синтезированного алгоритма была использована стандартная вычислительная процедура – метод Рунге-Кутта четвертого порядка при следующих исходных данных:

- отношение энергии одиночного сигнала к спектральной плотности помех и шумов не

менее 9,6 дБ;

- объект – носитель мобильной станции неподвижен, или движется прямолинейно и равномерно со скоростью 5 км/час, или совершает маневры (изменение направления движения на 180˚ или поворот с постоянной угловой скоростью по дуге радиусом 10 м);
- в качестве исходной корреляционной матрицы $\left\| K(t=t_0) \right\|$ задавалась диагональная матрица. Элементы матрицы выбирались, исходя из общих характеристик сигналов в системе мобильной связи и реальных возможностей перемещения среднего человека – носителя МС.

Некоторые результаты оценки потенциальной точности разработанного устройства приведены на рис. 4.1 – 4.3. Приведены зависимости относительных СКО измерений от длительности интервала наблюдения. Ошибки измерялись в долях от длительности элементарной посылки в пакете (в стандарте *GSM* она равна примерно 3,7 мкс).

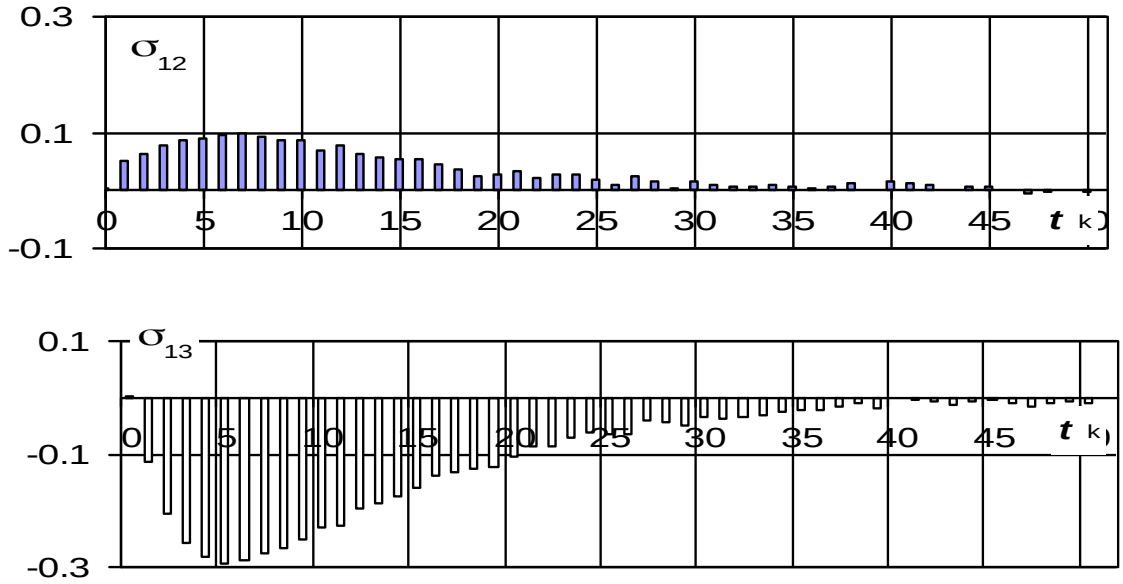
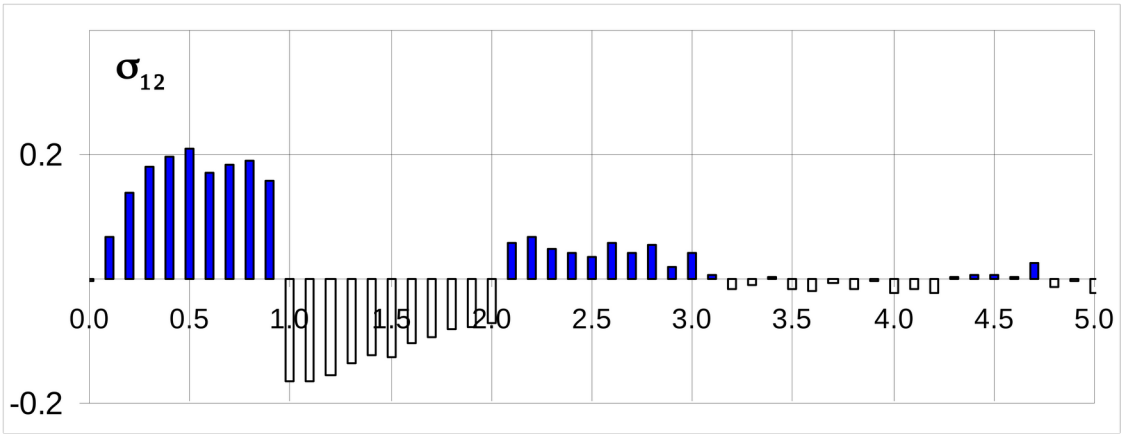


Рис. 4.1. Относительные СКО оценивания разностей дальностей $БС_1 – БС_2$ и $БС_1 – БС_3$. Объект неподвижен или движется прямолинейно с постоянной скоростью.



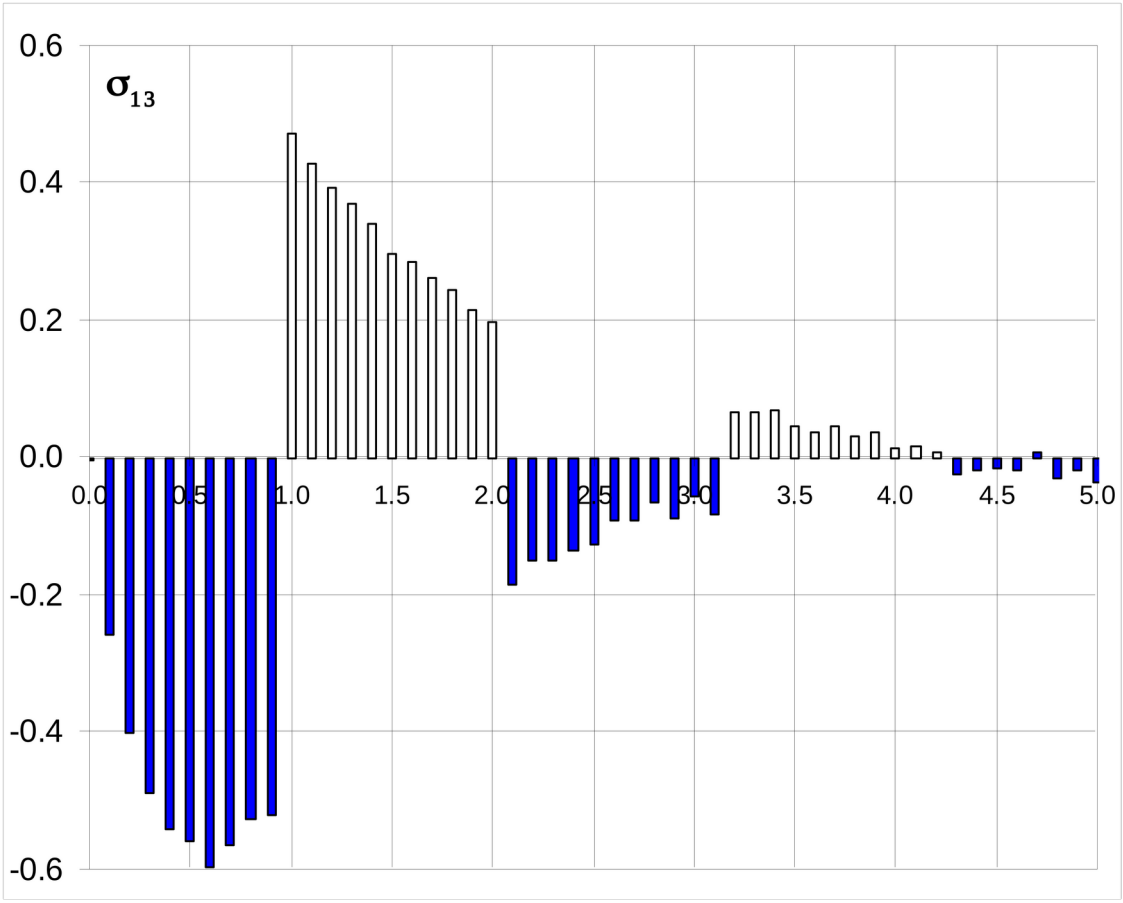


Рис. 4.2. Относительные СКО оценивания разностей дальностей $БС_1 – БС_2$ и $БС_1 – БС_3$. Объект движется прямолинейно, регулярно меняя направление движения на противоположное.

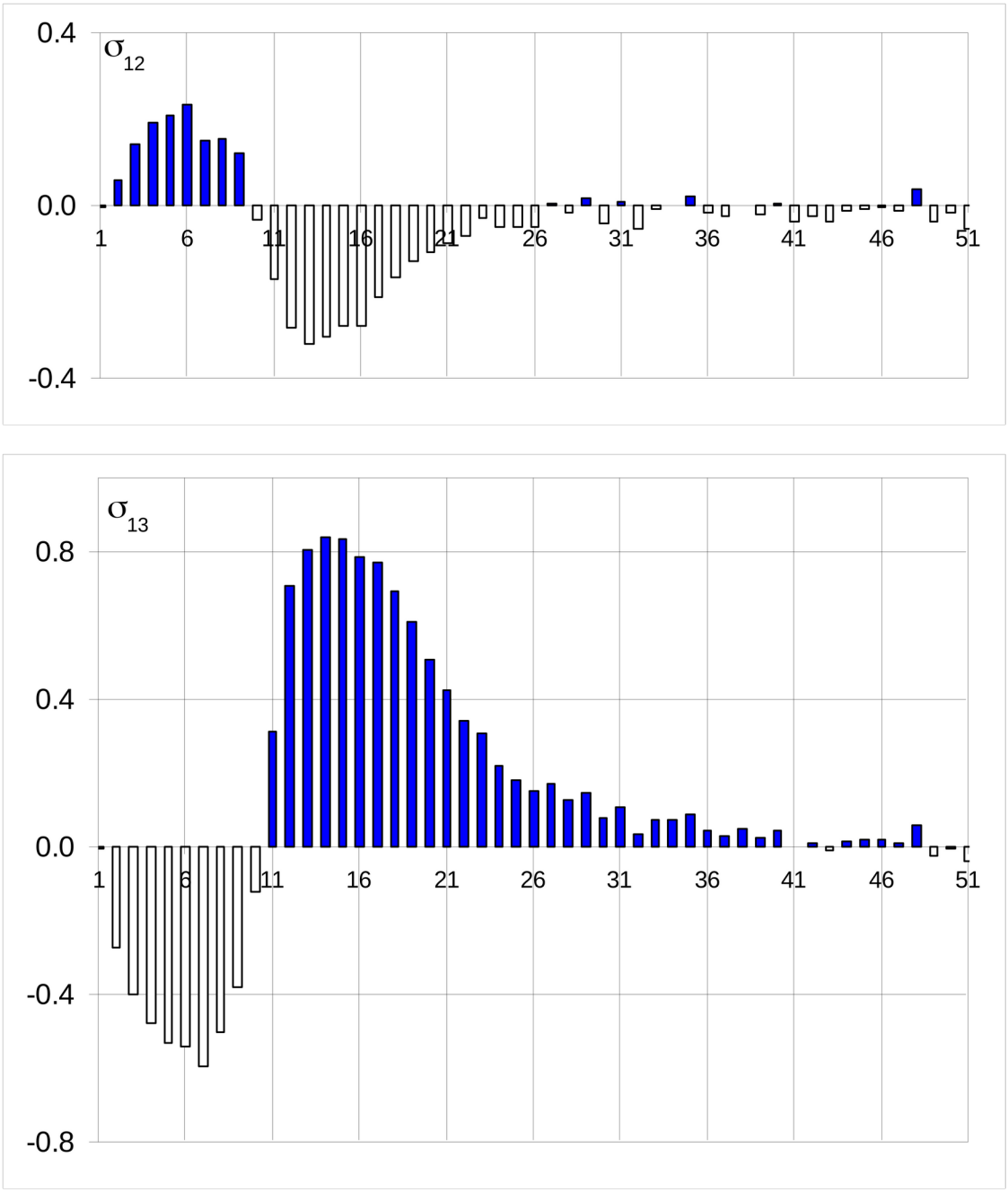


Рис. 4.3. Относительные СКО оценивания разностей дальностей $БС_1 – БС_2$ и $БС_1 – БС_3$. Объект движется с постоянной угловой скоростью по дуге радиусом 10 м.

Для большей наглядности графики зависимостей СКО нарисованы с учетом знаков разностей истинного и измеренного значений координат объекта. Скачкообразный характер изменения и смены знаков ошибок обусловлены дискретностью поступления новой информации о положении объекта.

Судя по полученным результатам, при достаточном объеме статистики средние значения ошибок оценивания асимптотически приближаются нулю независимо от характера движения объекта. Это достигается не только благодаря сглаживанию текущих

результатов измерения, но и благодаря экстраполяции координат объекта на следующий цикл измерений. Экстраполятор как бы «приспосабливается» к характеру движения объекта и со временем все точнее предсказывает его будущее положение. Соответственно, может достигаться СКО измерений, равная 6…15 м.

Установившийся режим достигается примерно через 30…40 циклов измерений. В установившемся режиме величина флюктуационной ошибки измерений зависит, в основном, от отношения сигнал/шум.

Естественно, самый плохой вариант – не координированное и не коррелированное движение объекта (типа броуновского движения). В этом случае экстраполяция не дает видимого улучшения результатов измерения. Однако вследствие конечной массы и ограниченных энергетических ресурсов объекта такой случай можно рассматривать только в качестве теоретического верхнего предела ошибки.

На рис. 4.4 изображены зависимости величины $\sigma_{44} = k_{44}(t_k)/k_{44}(t_0)$, характеризующей СКО разности дальностей Δr_i, от относительной длительности интервала наблюдения, представляющей собой количество принятых сигналов. При достаточной длительности интервала наблюдения, как и следовало ожидать, влияние перемещений объекта сглаживается.

Производились также расчеты зависимости установившихся значений ошибок $\sigma_{44}|_{t\to\infty}$ от отношения сигнал/(помехи плюс шум). Некоторые результаты расчетов приведены на рис. 4.5. В среднем при увеличении q от 10 до 17 дБ величина ошибки уменьшается на 50 % … 75 % в зависимости от характера движения объекта.



Рис. 4.4. Графики зависимостей величины СКО разности дальностей от относительной длительности интервала наблюдения.

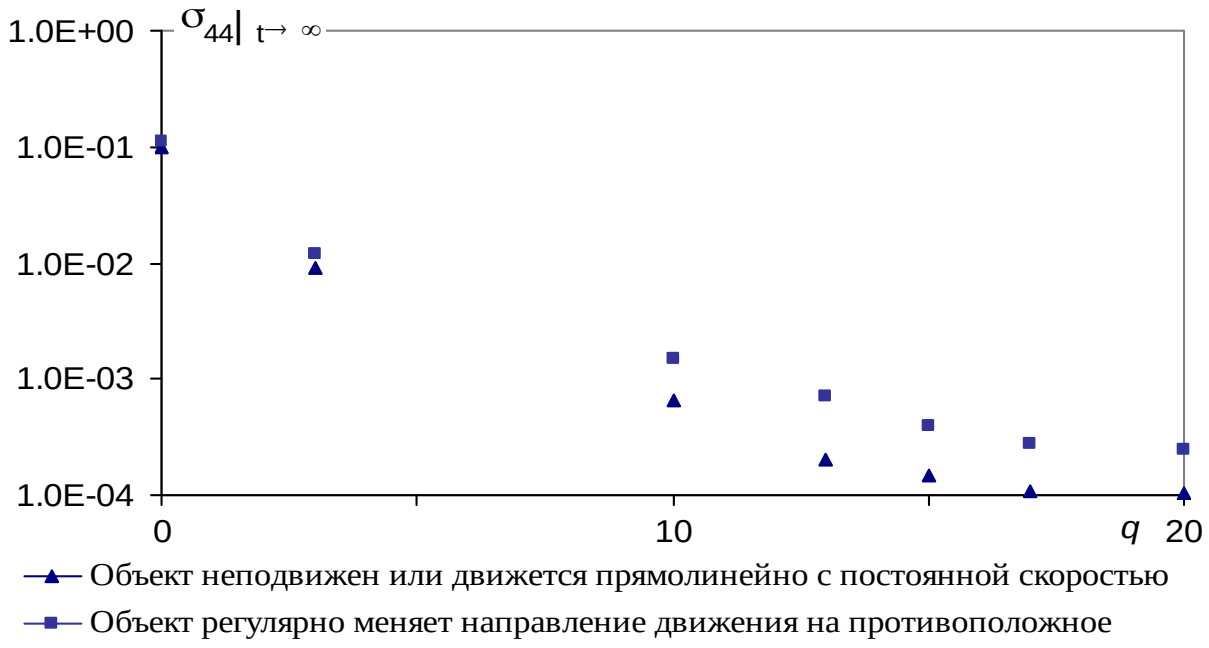


Рис. 4.5. Графики зависимостей величины СКО разности дальностей от отношения сигнал/(помехи плюс шум).

Благодаря сглаживанию и экстраполяции координат и параметров движения объекта удается достичь приемлемой точности определения местоположения объекта. При этом вмешательство в инфраструктуру сети мобильной связи является минимальным, поскольку вся обработка может осуществляться в универсальной ЭВМ или цифровом

процессоре вне зависимости от процессов организации собственно связи.

4.3. Рекомендации по выбору метода реализации коррелятора

На рис. 3.8 изображена общая схема обнаружителя-измерителя. В состав обнаружителя одиночного сигнала входит коррелятор. Теоретически при заранее известном передаваемом сигнале в обнаружителе вычисляется функция правдоподобия, иными словами – функция взаимной корреляции входной смеси с опорным сигналом. В качестве опорного сигнала используется копия переданного сигнала, задержанная на время передачи сигнала к приемному устройству. При неизвестном времени прихода сигнала вместо коррелятора используют фильтр, согласованный с передаваемым сигналом (оптимальный фильтр). Как известно, импульсная характеристика оптимального фильтра инвариантна ко времени прихода сигнала.

В рассматриваемом случае роль переданного сигнала, который поступает на вход коррелятора, играет выходной сигнал демодулятора. Демодулятор строится по одной из схем, которые изображены на рис. 3.5 – 3.6. Возможны и другие схемы построения демодулятора [42]. Для обнаружителя тонкая структура входного сигнала заранее не известна. По существу, для данной задачи он является случайным. Следовательно, необходимо решать задачу обнаружения случайного сигнала на фоне случайных помех и шумов. Поэтому вместо взаимнокорреляционной функции в корреляторе вычисляется автокорреляционная функция (АКФ). В качестве опорного сигнала используется копия входного сигнала, и АКФ в случае дискретных сигналов вычисляется по известной формуле:

$$r(k)=\frac{1}{N-k}\sum_{n=0}^{N-k-1}s_{\text{вх}}(n)s_{\text{вх}}(n-k),\quad k=\overline{-N+1,N-1}. \tag{4.3}$$

где $s_{\text{вх}}(n)$ - отсчеты сигнала, k - (дискретный) временной сдвиг.

Число комплексных умножений, необходимых для вычисления функции (4.3), равно N^2. Число сложений комплексных чисел также равно N^2. Если в вычислителе умножение заменяется многократным сложением, то при большой разрядности вычислителя (число разрядов $B>8\ldots16$) вычислительными затратами на сложение можно пренебречь.

Для систем с высокой разрешающей способностью по задержке и при использовании дискретных сигналов с большим числом отсчетов вычислительная нагрузка оказывается

весьма высокой. Для работы в реальном времени могут потребоваться сверхбыстродействующие вычислители или параллельные вычислительные структуры. Вычислители такого типа являются уникальными и весьма дорогостоящими устройствами.

Можно значительно ускорить процесс вычислений путем замены прямого расчета АКФ применением преобразования Фурье. Теоретической основой такой замены является теорема Хинчина [108]:

$$r(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(j\omega\tau) dF(\omega), \qquad (4.4)$$

где $F(\omega)$ - неубывающая ограниченная функция, удовлетворяющая условиям Дирихле и условию абсолютной интегрируемости. Если функция $F(\omega)$ дифференцируема, то, обозначив $\frac{dF(\omega)}{d\omega} = \frac{1}{2} G(\omega)$, получим вместо (4.4) уравнение вида

$$r(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) \exp(j\omega\tau) d\omega, \qquad (4.5)$$

следовательно, $G(\omega)$ есть обычное преобразование Фурье для $r(\tau)$, т.е. спектральная плотность сигнала:

$$G(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} r(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau. \qquad (4.6)$$

Пара преобразований (4.5 – 4.6) называется уравнениями Винера – Хинчина [109].

Напомним, что в нашем распоряжении имеется только выходной сигнал демодулятора – последовательность нулей и единиц, т.е. так называемая периодограмма сигнала $s_{\text{вх}}(n)$. Чтобы из неё получить спектральную плотность $G(\omega)$, применим свойство преобразования Фурье, по которому произведению двух спектров $S_1(\omega)$ и $S_2(\omega)$ соответствует функция времени $r_s(t)$, являющаяся сверткой функций $s_1(t)$ и $s_2(t)$:

$$r_s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(\nu) s_2(t-\nu) d\nu = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t-\nu) s_2(\nu) d\nu = \\ = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_1(\omega)\, S_2(\omega) \exp(j\omega t) d\omega. \qquad (4.7)$$

Для рассматриваемого случая $s_1(t)=s_2(t)=s(t)$. Тогда выражение (4.7) примет следующий вид:

$$r_s(t)=\int_{-\infty}^{\infty}s(\nu)s(t-\nu)d\nu=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}S^2(\omega)\exp(j\omega t)d\omega. \qquad (4.8)$$

Левый интеграл в (4.8) – не что иное как автокорреляционная функция сигнала $s(t)$.

Правый интеграл – обратное преобразование Фурье от квадрата спектра сигнала $s(t)$.

Следовательно, чтобы получить автокорреляционную функцию сигнала $s_{\text{вх}}(n)$, нужно выполнить такую последовательность действий.

1. Вычислить спектр выходного сигнала демодулятора, т.е. выполнить прямое дискретное преобразование Фурье (ДПФ).
2. Возвести полученный результат в квадрат.
3. Путем применения обратного ДПФ к квадрату спектра вычислить автокорреляционную функцию сигнала.

Естественно, для вычисления прямого и обратного преобразований Фурье дискретных последовательностей целесообразно применить алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) в одной из его многочисленных модификаций [110 – 113]. Как показано в работе [111], выигрыш в уменьшении числа операций при использовании БПФ в сравнении с обычным ДПФ определяется отношением $N^2/(N\log_2 N)$. Уже при $N=128$ выигрыш составляет более 32, а при $N=512$ от достигает почти 60. Кроме того, при использовании вместо процессоров БПФ цифровых фильтров с частотной выборкой [112, 114 – 115] будет достигнут еще больший выигрыш, причем как в требуемом количестве операций, так и в аппаратурных затратах.

Для сравнительного анализа методов прямого вычисления АКФ и вычисления с применением прямого и обратного преобразований Фурье были смоделированы сигналы с модуляцией типа *GMSK* и 8*PSK*. В качестве датчика случайных чисел (ДСЧ) использовался генератор равномерно распределенных на интервале $[0,1]$ псевдослучайных чисел *URAND*, принятый в качестве стандарта Американского национального института стандартов *ANSI* [116].

На рис. 4.6. изображена периодограмма сигнала с модуляцией типа *GMSK* на выходе демодулятора. Алгоритм формирования сигнала следующий. Если текущее

псевдослучайное число ДСЧ лежит в диапазоне $0 \le \xi(n) \le 0,5$, выходному сигналу демодулятора присваивается значение 1. Если $0,5 < \xi(n) \le 1$, выходному сигналу демодулятора присваивается значение –1. Объем выборки равен 148 символов, что соответствует объему информационной части слотов канала трафика и каналов управления (коррекции частоты, синхронизации, холостой пачки) стандарта *GSM*.

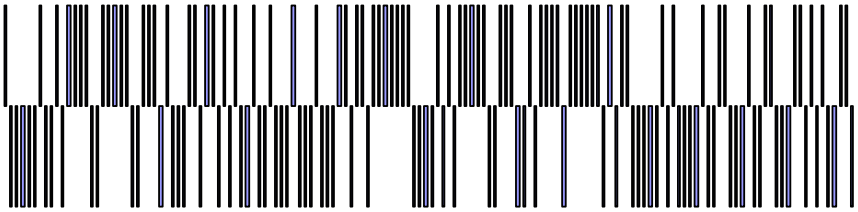


Рис. 4.6. Периодограмма сигнала с модуляцией типа *GMSK*.

На рис. 4.7. изображен график АКФ данного сигнала, вычисленной в соответствии с выражением (4.3).

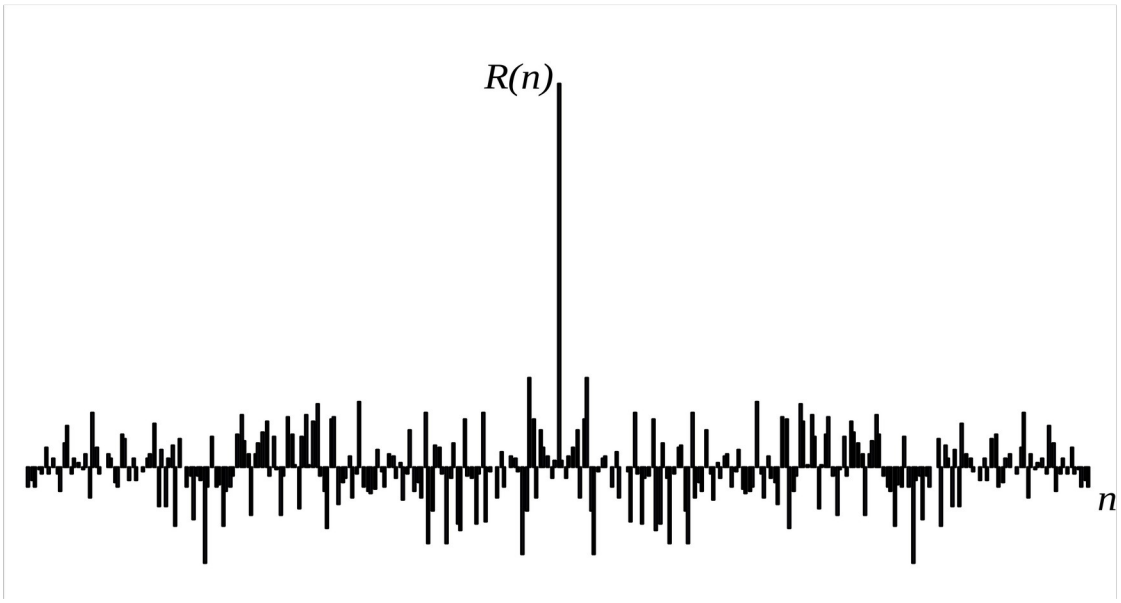


Рис. 4.7. График АКФ сигнала с модуляцией типа *GMSK*, рассчитанной прямым методом.

При вычислении БПФ использовался стандартный 512-точечный алгоритм с прореживанием во времени. Недостающие отсчеты заполнялись нулями. При выборе числа точек алгоритма руководствовались следующими соображениями. Для максимального упрощения алгоритма целесообразно выбирать число точек, кратное степени 2. При этом длина массива спектральных отсчетов должна быть, как минимум, в два раза больше длины массива временных отсчетов во избежание наложения частот (*aliasing*) и, соответственно, искажений результирующей АКФ.

На рис. 4.8. и 4.9 изображены графики вещественной и мнимой частей спектра периодограммы соответственно. Отметим симметрию выборки вещественных составляющих и антисимметрию выборки мнимых составляющих спектра.

Затем полученные выборки возводились в квадрат, после чего выполнялось обратное БПФ. На рис. 4.10 изображен график рассчитанной данным методом автокорреляционной функции.

Сравнивая графики АКФ на рис. 4.7 и 4.10, легко заметить, что тонкая структура АКФ, особенно вблизи основного лепестка, практически одинакова. Следовательно, для решения задачи оптимального обнаружения такой подход эффективен и целесообразен.

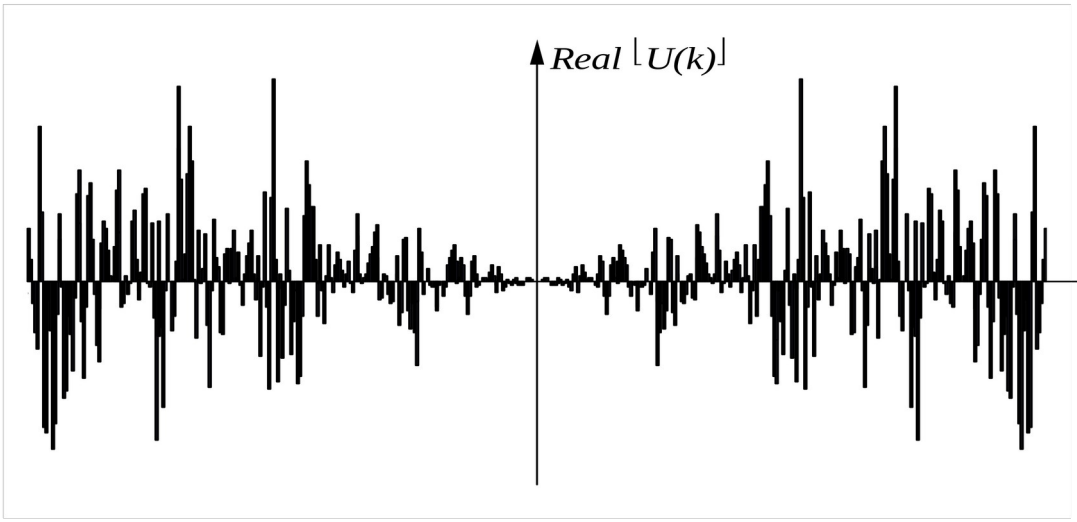


Рис. 4.8. Модуляция типа *GMSK*. График вещественной части спектра периодограммы.

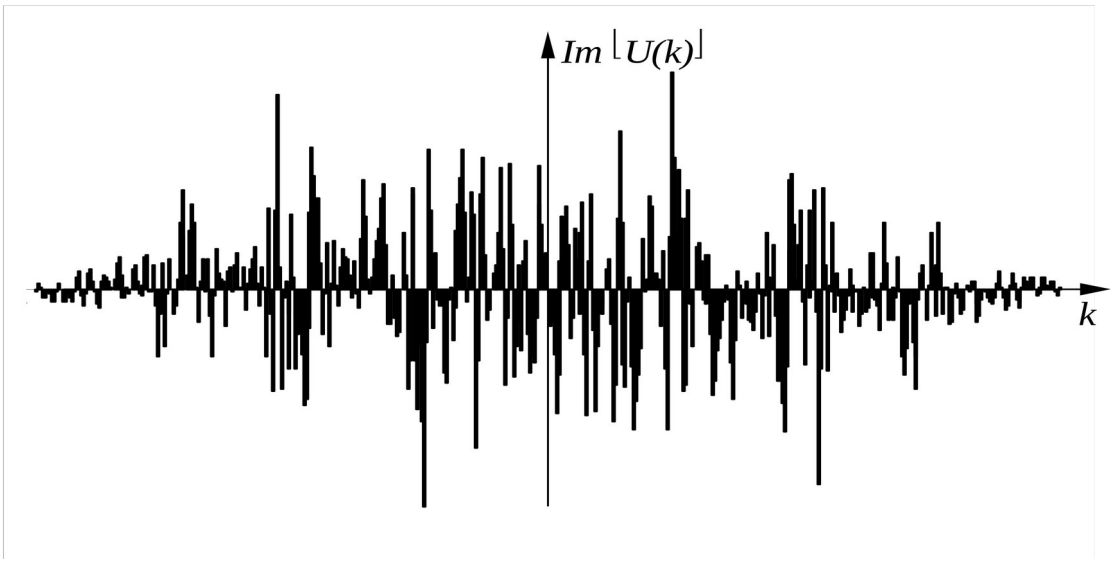


Рис. 4.9. Модуляция типа *GMSK*. График мнимой части спектра периодограммы.

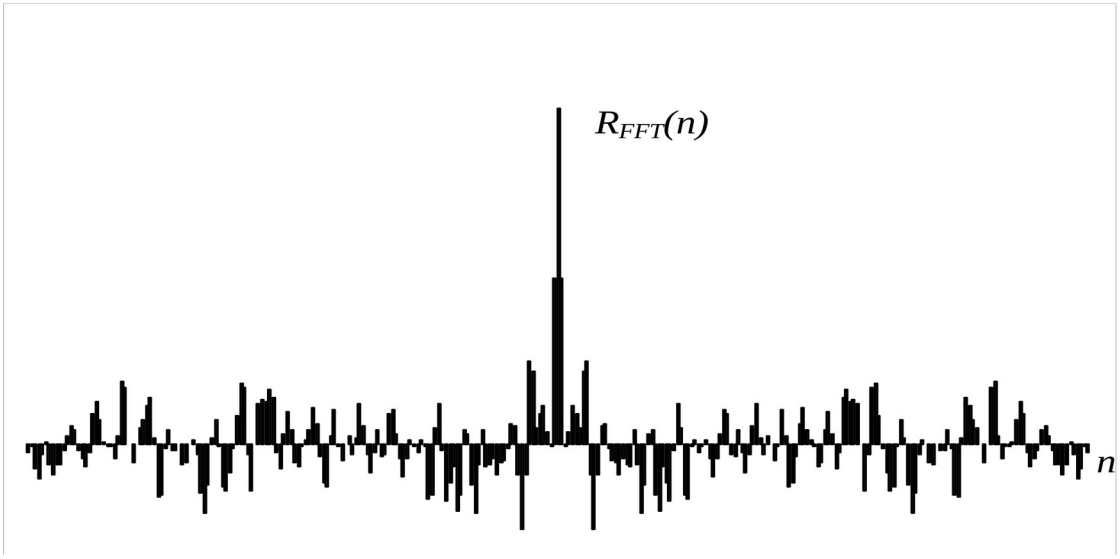


Рис. 4.10. Модуляция типа *GMSK*. График АКФ, рассчитанной методом двукратного БПФ.

При моделировании многопозиционного сигнала с модуляцией типа 8*PSK* использовался тот же ДСЧ. Диапазон значений случайных чисел разбивается на 8 одинаковых поддиапазонов. Числу, попавшему в i-й поддиапазон ($i=\overline{1,8}$), ставится в соответствие трехбитовая последовательность чисел j,k,l, которая может принимать значения от 0,0,0 до 1,1,1. Нулям в последовательности соответствуют значения сигнала, равные 1, единицам – значения сигнала, равные –1. На рис. 4.11 изображено сигнальное созвездие, а на рис. 4.12 – смоделированная периодограмма сигнала на выходе демодулятора.

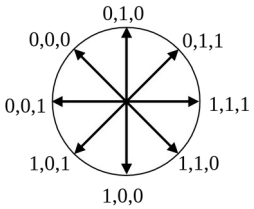


Рис. 4.11. Сигнальное созвездие.

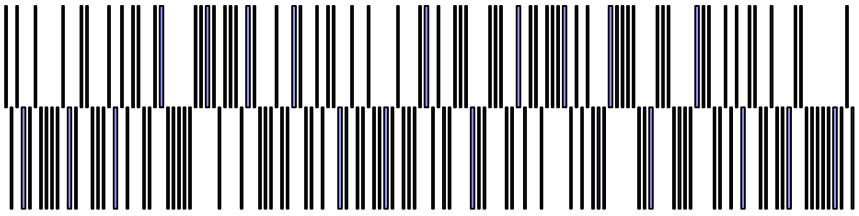


Рис. 4.12. Периодограмма сигнала с модуляцией типа 8*PSK*.

Дальнейшие исследования выполнялись так же, как и для ранее рассмотренной модели сигнала. На рис. 4.13 – 4.16 приведены полученные результаты. Видно, что наблюдаются те же эффекты, что и в предыдущем случае.

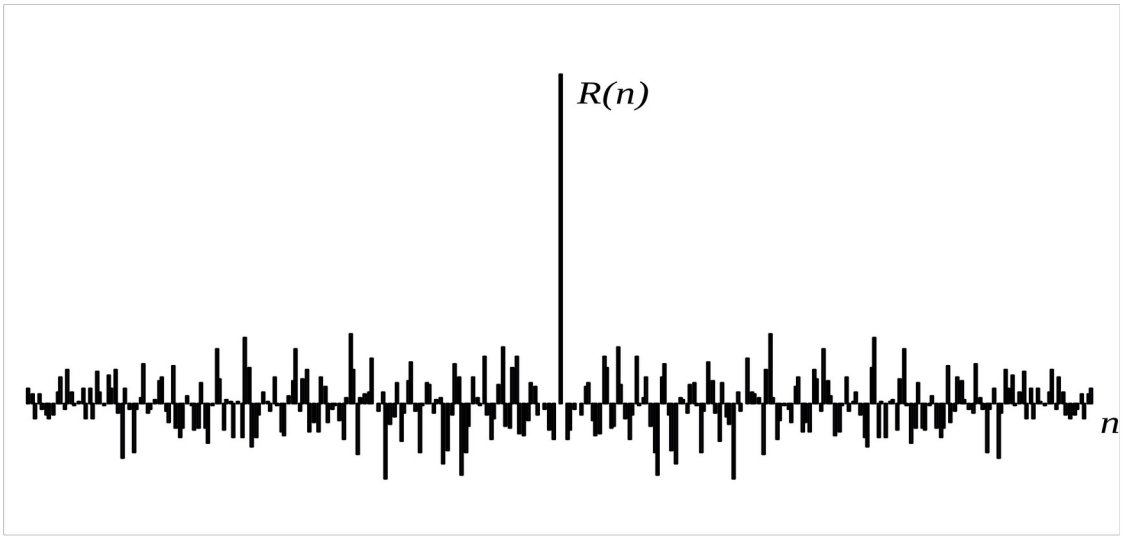


Рис. 4.13. График АКФ сигнала с модуляцией 8*PSK*, рассчитанной прямым методом.

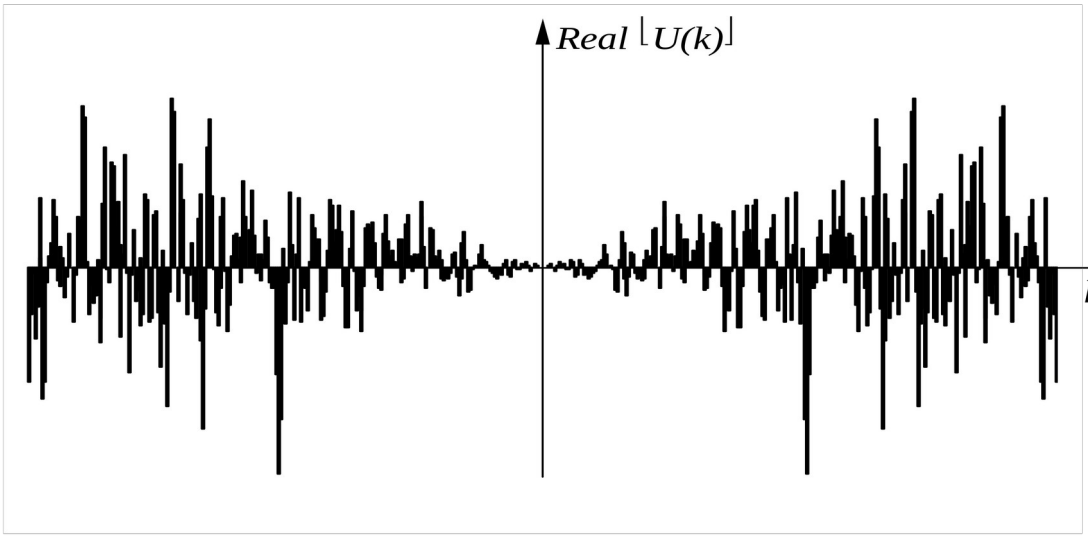


Рис. 4.14. Модуляция типа 8*PSK*. График вещественной части спектра периодограммы.

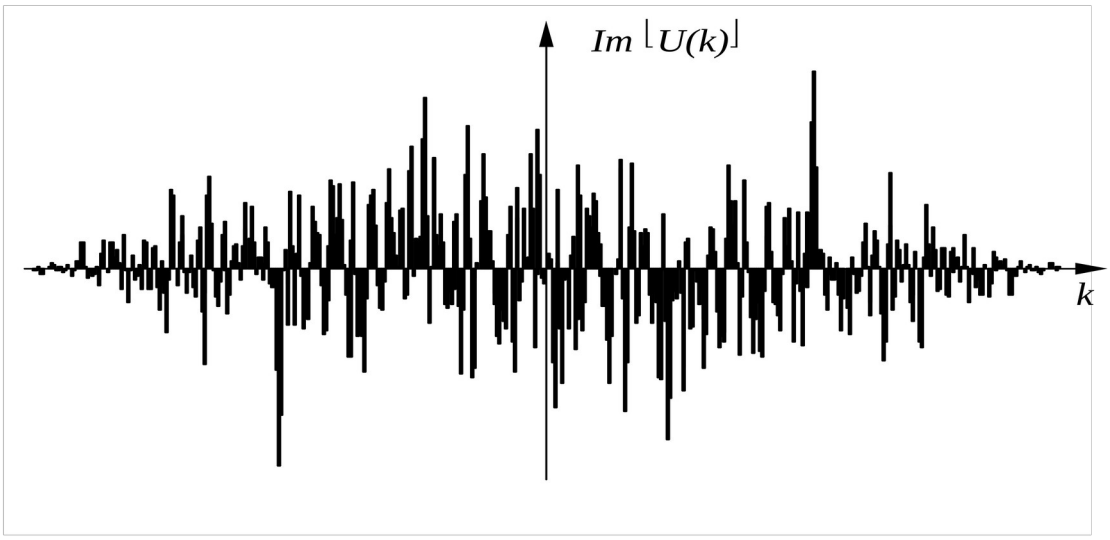


Рис. 4.15. Модуляция типа 8*PSK*. График мнимой части спектра периодограммы.

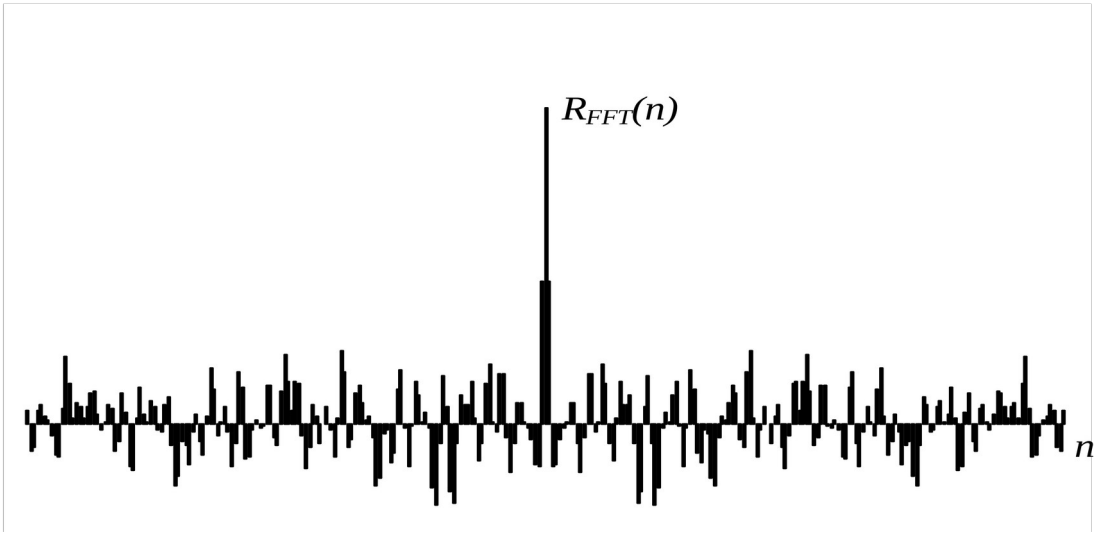


Рис. 4.16 Модуляция типа 8*PSK*. График АКФ, рассчитанной методом двукратного БПФ.

4.4. Рекомендации по способам реализации вычислительного алгоритма

В настоящее время можно реализовать вычислители с чрезвычайно высокой производительностью. Однако для рассматриваемой задачи, в частности, для условий серийного применения в сетях мобильной связи, конечно, необходимо учитывать ценовые параметры. Кроме того, как неоднократно отмечалось выше, необходимо минимизировать вмешательство в инфраструктуру, в том числе и в используемое программное обеспечение.

Рассмотрим некоторые специфические особенности цифровой реализации разработанных алгоритмов. Эта специфика, прежде всего, вытекает из декомпозиции общей задачи на две взаимосвязанные задачи: обнаружение и измерение.

Цифровой обнаружитель на базе процессоров БПФ – наиболее критичная к скорости обработки часть системы позиционирования. Его целесообразно строить по схеме с двумя квадратурными каналами. Во-первых, фаза принимаемого сигнала неизвестна, а во-вторых, по самому принципу вычисления преобразования Фурье на выходе цифрового устройства получаем вещественную и мнимую составляющие спектра, которые, по существу, как раз и представляют собой фазную и квадратурную составляющие сигнала. Это соображение принципиального характера. Другое соображение – выбор частоты дискретизации сигнала – носит технический характер. Если сразу выбирать её из условия требуемой точности измерения, то частота дискретизации будет достаточно высокой, но вполне реализуемой. Например, при СКО измерения, меньшей 15 м, частота дискретизации должна быть не менее 20 МГц, что

соответствует периоду дискретизации $T_{\text{дискр}} = 0,05$ мкс.

Однако число точек БПФ $N_{\text{бпф}} = N_{\text{эл}}\tau_{\text{эл}}/T_{\text{дискр}}$, где $N_{\text{эл}}$ – число элементарных импульсов (посылок) в слоте, $\tau_{\text{эл}}$ – длительность элементарного импульса, может быть неприемлемо большим. Например, при $N_{\text{эл}}$=148, $\tau_{\text{эл}}$=3,7 мкс и $T_{\text{дискр}} = 0,05$ мкс $N_{\text{бпф}} = 10952$ по каждому квадратурному каналу. Если учесть, что ближайшее (большее) число, кратное степени 2, равно 16384, становится очевидным, что процессор БПФ получится сложным и дорогостоящим. Более того, при этом закладывается совершенно бесполезная избыточность, поскольку огибающая элементарного импульса известна априори (Гауссовская или прямоугольная), и представлять ее семьюдесятью четырьмя отсчетами не имеет смысла.

Исходя из данных соображений, следует выбрать для процессора БПФ период дискретизации $T_{\text{дискр}} \le \tau_{\text{эл}}/2$, т.е. для условий рассматриваемого примера $T_{\text{дискр}} \le 1,8$ мкс. Тогда число точек БПФ $N_{\text{бпф}} \ge 296$. Ближайшее большее число, кратное степени 2, равно 512. Это вполне приемлемая величина. В табл. 4.1, которая взята из работы [44], приведены данные тестирования цифровых процессоров обработки сигналов (ЦПОС) при выполнении операции комплексного 256-точечного БПФ. Для сравнения приведены аналогичные результаты тестирования универсального процессора *Pentium* III.

Таблица 4.1. Время выполнения 256-точечного комплексного БПФ.

Фирма	Тип ЦПОС	Тип арифметики	Тактовая частота, МГц	Время выполнения, мкс
Motorola	*DSP*56311	С фиксированной запятой	150	58
	*MSC*8101	С фиксированной запятой	300	6
*T*1	*TMS*320*C*5416	С фиксированной запятой	160	65
	*TMS*320*C*6203	С фиксированной запятой	300	9

	*TMS*320*C*6701	С плавающей запятой	167	21
Intel	*Pentium* III	С плавающей запятой	1000	9,5

Обращает на себя внимание сравнительно низкая эффективность использования универсального процессора *Intel Pentium* III: при тактовой частоте 1000 МГц время выполнения операции - 9,5 мкс против 6…9 мкс при тактовой частоте 300 МГц специализированных процессоров *Motorola MSC*8101 и *T*1 *TMS*320*C*6203. При этом, конечно, и стоимость специализированных процессоров значительно ниже, чем универсального. Отметим, что данная тенденция сохраняется и в настоящее время, когда появились процессоры новых серий, в том числе и двухъядерные.

После выделения сигнала на выходе обнаружителя для обеспечения требуемой точности измерений необходимо использовать уже более высокую частоту дискретизации. При этом высокочастотной «оцифровке» подвергается только пеленгационная характеристика дискриминатора. Отметим, что для исключения «слепых» отсчетов необходимо выбирать соотношение между низкой и высокой частотами дискретизации так, чтобы они были взаимно простыми числами. Еще более эффективный, хотя и достаточно сложный метод – использовать высокую частоту дискретизации с иррациональным значением (так называемые почти периодические функции Бора [117,118]).

Реализация этой части схемы на специализированных ЦПОС также не представляет технических трудностей. Номенклатура и архитектура ЦПОС постоянно расширяются и совершенствуются, поэтому можно подобрать вполне приемлемые устройства по критерию «эффективность/стоимость».

Рассмотрим особенности реализации синтезированного измерителя. Такие элементы, как интеграторы, сумматоры, умножители на постоянные коэффициенты реализуются вполне просто на дискретных цифровых устройствах. Устройства регулируемой задержки, по существу, представляют собой запоминающие устройства с регулируемым временем выборки.

Алгоритм экстраполяции, с одной стороны, более сложен, а, с другой стороны, для его работы не требуется такого большого быстродействия, как для измерителя. Поэтому его можно реализовать в виде программы на универсальной ЭВМ.

Алгоритм вычисления ЛРРД еще проще, чем алгоритм экстраполяции, следовательно, рекомендация реализовать его на универсальной ЭВМ вполне очевидна. Для унификации программного обеспечения желательно использовать те же языки программирования, что и в основной системе, хотя, с другой стороны, для достижения максимальной эффективности, конечно, лучше использовать языки низкого уровня (типа Ассемблера). Окончательный ответ на этот вопрос, по-видимому, можно получить в процессе конкретной реализации и внедрения данной разработки.

В заключение ещё раз отметим, что при современном уровне развития цифровых устройств малой, средней и большой степени интеграции, универсальных и специализированных вычислителей задача технической реализации синтезированного измерителя не представляется непреодолимой. Как известно, стоимость микроэлектронных устройств уменьшается с течением времени по так называемому «закону Силиконовой долины», поэтому и цена данного проекта, можно полагать, окажется вполне приемлемой по первоначальным вложениям и срокам окупаемости.

Выводы по разделу

1. Показано, что потенциальные характеристики точности измерений, достижимые в разностно-дальномерной системе сети мобильной связи, вполне приемлемы для решения задач обнаружения объекта – носителя МС, в плотной городской застройке или в лесопарковой зоне.

2. На основе результатов анализа требований к вычислительной подсистеме сети мобильной связи и потенциальных точностных характеристик измерителя системы позиционирования даны рекомендации по реализации обнаружителя-измерителя.

3. Для упрощения реализации обнаружителя сигнала предложено заменить стандартные вычисления корреляционного интеграла вычислением преобразований Фурье. Такой подход основан на теореме Хинчина. Благодаря применению цифрового процессора БПФ достигается значительное ускорение процесса вычисления, причем выигрыш растет с увеличением длины выборки.

4. Установлено, что некоторые части устройства более выгодно реализовать на специализированных вычислителях и микросхемах малой (средней) степени интеграции. Сложные, но не требующие высокого быстродействия алгоритмы экстраполяции значений

сигнала и расчета ЛРРД вполне логично реализовать в виде программ на универсальных ЭВМ.