

На правах рукописи

Аронов Дмитрий Александрович



**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
СОВМЕСТИМОСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ,
РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ И
СИСТЕМ ДРУГИХ СЛУЖБ**

Специальность 05 12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2008



003445112

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский технический университет связи и информатики» (ГОУВПО «МТУСИ»).

Научный руководитель. доктор технических наук, профессор,
Немировский Михаил Семенович

Официальные оппоненты доктор технических наук, с н с,
Быховский Марк Аронович,
кандидат технических наук,
Васехо Николай Владимирович

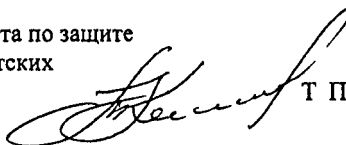
Ведущая организация Федеральное государственное
унитарное предприятие Российский
научно-исследовательский институт
космического приборостроения (ФГУП
РНИИКП)

Защита состоится «2» октября 2008 года в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.03 при ГОУВПО «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд А-456

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «14» июля 2008 года

Учёный секретарь совета по защите
докторских и кандидатских
диссертаций

 Т. П. Косичкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие современных телекоммуникационных технологий привело к созданию новых и модернизации существующих радиоэлектронных средств (РЭС), а также к быстрому росту числа РЭС, работающих в различных службах. Это позволяет сделать вывод о том, что различные РЭС работают в условиях воздействия взаимных помех, возникающих как между РЭС, принадлежащих к одной службе, так и между РЭС, принадлежащих к различным службам. Ситуация усугубляется тем, что в разных Районах Земли (в соответствии с Радио Регламентом территория Земли поделена на три Района) распределение частот различно, и в области неизбежного перекрытия зон обслуживания, прилегающих к границам Районов, возникают помехи от служб другого Района. Даже в случае, когда выделенные полосы частот не перекрываются, возникновение помех возможно из-за нежелательных излучений. В результате оказывается необходимым обеспечить электромагнитную совместимость РЭС, работающих в общих и соседних полосах частот. Актуальность данного вопроса непрерывно возрастает в связи с быстрым развитием различных приложений РЭС, что приводит к необходимости обеспечивать их электромагнитную совместимость (ЭМС).

Исследование ЭМС различных РЭС является самостоятельным научно-техническим направлением, имеющим комплексный (системный) характер. Следует отметить, что проблема обеспечения ЭМС РЭС имеет не только национальный, но и международный аспект, определяющийся особенностями распространения радиоволн в различных частотных диапазонах. От решения данной проблемы во многом зависят направления дальнейшего технического прогресса в области связи.

Для систем радионавигационной спутниковой службы (РНСС), в частности отечественной системы ГЛОНАСС, вопрос обеспечения условий электромагнитной совместимости является актуальным вопросом, поскольку в настоящее время наблюдается быстрое развитие систем РНСС и рост интереса к ним. В течение исследовательского периода 2003-2007 г. в рамках Сектора радиосвязи Международного союза электросвязи (МСЭ), вопросам, связанным с системами РНСС, уделялось повышенное внимание.

Таким образом, исследование научного направления по обеспечению ЭМС систем связи, радионавигационных спутниковых систем и систем других служб, как в рамках одной службы, так и с РЭС других служб и обоснованию рациональных параметров функционирования мешающих РЭС с учетом необходимости достижения максимальной эффективности их использования, приобретают особую актуальность. Под мешающим РЭС понимается РЭС, создающее помеху. Здесь не уточняется конкретная служба РЭС, поскольку в общем случае одно и то же РЭС в одном сценарии может создавать помеху, а в другом сценарии может испытывать помеху.

В исследовании научного направления, связанного с ЭМС различных РЭС, проведено большое количество работ, выполненных в научно-

исследовательских институтах, а также предприятиях промышленности В этих работах широко освещены проблемы ЭМС РЭС различного назначения, моделирования космических группировок, синтеза и оптимизации параметров РЭС В частности большое внимание данным вопросам было уделено в работах Бородича С.В., Калашникова Н.И., Машбида Л.М., Кантора Л.Я., Быховского М.А., Феокситова Ю.А., Царькова Н.Г., Кадырова Т.Д. Однако, проведенный анализ показал, что разработанное методическое обеспечение не может быть применено для решения задачи обоснования рациональных параметров для достижения ЭМС между РЭС РНСС и РЭС других служб в полном объеме из-за ряда особенностей их функционирования

В работах, перечисленных выше, применялась оптимизация параметров РЭС, создающих помехи, с целью достижения в канале максимальной потенциальной пропускной способности Однако, этот показатель применим к ограниченному типу РЭС, кроме того на практике максимальная потенциальная пропускная способность канала не реализуется, поскольку все линии и сети связи работают с запасом по энергетическому балансу, необходимому для сохранения заданных показателей качества при изменении условий передачи или параметров оборудования Более того, для ряда систем, например, для систем РНСС, большая пропускная способность в канале не требуется и составляет не более 250 бит/с

При проведении исследования по теме диссертационной работы был затронут вопрос помехоустойчивости для случая воздействия на сигнал смеси шума и модулированной помехи Следует отметить, что достаточно точные аналитические выражения для расчета вероятности ошибки на бит передаваемой информации при воздействии шума и помехи получены в работах Быховского М.А., Кантора Л.Я. Однако, этот аналитический аппарат достаточно громоздок и применим для ограниченного числа типовых методов модуляции Также данный аналитический аппарат не позволяет определить при каких соотношениях полос частот помехи и сигнала можно его применять, и какая точность при этом обеспечивается, то есть не был рассмотрен вопрос границ применимости.

Таким образом, несмотря на достаточно глубокую проработку, вопросы, касающиеся обеспечения ЭМС между системами связи, радионавигационными спутниковыми системами и системами других служб исследованы недостаточно В связи с этим разработка и усовершенствование методического обеспечения, позволяющего проводить обоснование параметров функционирования мешающих РЭС для обеспечения электромагнитной совместимости с затронутыми РЭС (под затронутым РЭС понимается РЭС, которое может испытывать помеху) является актуальной научной задачей

Цели работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является исследование вопросов электромагнитной совместимости между системами связи, радионавигационными спутниковыми системами и системами других служб для разработки и усовершенствования методического аппарата

по обоснованию рациональных параметров функционирования мешающих РЭС с учетом требований по обеспечению ЭМС затронутых РЭС и выработки на их основе практических рекомендаций для конкретных условий совместного функционирования

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие исследовательские задачи

- проведено исследование вопроса помехоустойчивости для случая воздействия на сигнал смеси шума и модулированной помехи, с целью получения аналитических выражений, позволяющих оценить вероятность ошибки на бит передаваемой информации, а также с целью определения границы применимости этих аналитических выражений,
- в комплексе методик применен показатель для оценки качества функционирования радиолинии, данный показатель достаточно универсален с точки зрения применимости к большому числу типов РЭС (показатель предложен Кантором Л.Я),
- разработано и усовершенствовано методическое обеспечение, позволяющее проводить обоснование параметров функционирования мешающих РЭС для достижения ЭМС с затронутыми РЭС;
- решен ряд практических задач по обеспечению ЭМС систем связи, радионавигационных спутниковых систем и систем других служб, а именно
 - определены условия ЭМС между РЭС радиоастрономической службы, работающими в полосе частот 1610.6 – 1613.8 МГц, и РЭС РНСС, работающими в полосе частот 1559-1610 МГц;
 - определены условия ЭМС РЭС РНСС с РЭС воздушной радионавигационной службы (ВРНС) в совместно используемой полосе частот 1164-1215 МГц;
 - определены условия ЭМС сверхширокополосных устройств с РЭС РНСС, работающими в полосах частот 1164-1215 МГц, 1215-1300 МГц и 1559-1610 МГц,
 - разработана методология по координации РЭС РНСС, как в рамках одной службы, так и с РЭС других служб (под термином другие службы понимаются в том числе и связанные службы)

Методы исследования. При решении поставленных в диссертационной работе задач использованы методы теории вероятностей и математической статистики, статистической теории радиотехнических систем, электромагнитной совместимости, статистического моделирования, программирования.

Научная новизна работы и полученные в ней результаты определяют то, что разработан комплекс методик по обеспечению ЭМС систем связи, радионавигационных спутниковых систем и систем других служб, отличающийся от известных следующим

- использует достаточно универсальный показатель для оценки качества функционирования радиолинии с точки зрения применимости к большому числу типов РЭС (показатель предложен Кантором Л.Я),

- позволяет решать задачу достижения ЭМС систем связи, радионавигационных спутниковых систем и систем других служб не только в общих, но и в соседних полосах частот,
- включает в себя аналитические выражения для оценки вероятности ошибки на бит передаваемой информации при наличии в канале связи шума и модулированной помехи, при этом определены границы применимости данных аналитических выражений

Практическая ценность диссертационной работы состоит в возможности использования результатов оценок и получаемых на их основе практических рекомендаций государственными радиочастотными органами, организациями промышленности, занимающимися разработкой, созданием и эксплуатацией систем радио связи. Результаты исследования и получаемые на их основе практические рекомендации могут быть применены:

- на различных этапах разработки, проектирования и эксплуатации перспективных сетей связи при задании требований и формировании технических решений,
- при рассмотрении радиочастотных заявок новых РЭС,
- при согласовании условий ЭМС новых систем связи с существующими системами связи

Основные результаты работы реализованы:

- при подготовке предложений в Технические задания делегации Администрации связи России на собрания рабочих групп Сектора радиосвязи МСЭ и Европейской организации Администраций почт и электросвязи,
- при подготовке научно-технических докладов Администрации связи России на собрания Рабочих групп 8В и 8D Сектора радиосвязи МСЭ, на собрания Целевых групп 1/8 и 1/9 Сектора радиосвязи МСЭ, на Подготовительное собрание к Конференции (2007 г) и Всемирную конференцию радиосвязи 2007 г (ВКР-07),
- при разработке международных радиочастотных заявок по системе РНСС ГЛОНАСС,
- при создании методологии по координации РЭС РНСС, как в рамках одной службы, так и с РЭС других служб, которая отражена в действующей Рекомендации МСЭ-Р М.1831;
- при подготовке и проведении переговоров между Администрацией связи России и Администрациями связи Японии, Франции, Германии, Китая по вопросам координации частотных присвоений системы РНСС ГЛОНАСС,
- при подготовке и проведении многосторонних переговоров в рамках Консультационного собрания по Резолюции 609 (ВКР-03), посвященного определению условий работы систем РНСС в полосе частот 1164-1215 МГц для защиты систем ВРНС.

Результаты диссертационной работы были внедрены в деятельность ОАО «ИСС имени академика М Ф Решетнева» и ООО «НПФ «ГЕЙЗЕР» в виде.

1 Технических материалов для координации системы радионавигационной спутниковой службы ГЛОНАСС

2 Международных радиочастотных заявок на систему радионавигационной спутниковой службы ГЛОНАСС

3 Методик расчета и моделирования по определению условий электромагнитной совместимости между средствами радионавигационной спутниковой службы и средствами других служб

4 Программного продукта, обеспечивающего автоматизированную оценку совместимости систем радионавигационной спутниковой службы с системами воздушной радионавигационной спутниковой службы в полосе частот 1164-1215 МГц

Вышеперечисленные результаты, подтвержденные соответствующими актами, внедрялись при выполнении научно-исследовательских работ по таким темам, как «ЗАЯВКА», «СИГНАЛ», «АЛЕКСАНДРОВЕЦ», а так же при проведении опытно-конструкторских разработок по таким темам, как «ГЛОНАСС-МК-РЧО» и «НАВИГАЦИЯ-Р»

Личный вклад. Основные результаты, приведенные в диссертации, получены автором лично

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались

- на 59-ой студенческой научно-технической конференции (г Москва 2004 г),
- на научной конференции профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава (г Москва 2005 г),
- на 8-ой научной сессии «Интеллектуальные системы и технологии» МИФИ (Москва 2005 г),
- на международной научной конференции ИРЭМВ-2005 «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» (г Таганрог 2005 г),
- на всероссийской научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (г Н Новгород 2005 г, 2006 г.);
- на 10 – ой национальной конференции (с международным участием) по искусственному интеллекту (г. Обнинск 2006 г),
- на собраниях Рабочих групп 8D и 8B, Целевых групп 1/8 и 1/9 Сектора радиосвязи МСЭ (г Женева 2004 г, 2005 г, 2006 г, 2007 г)

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 9 работ, 2 работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК Из 9 опубликованных работ 2 научные статьи и 7 докладов на международных, межрегиональных и других научных конференциях, 8 работ написано лично без участия соавторов

Структура и объем работы Работа состоит из четырех разделов, введения, заключения и 4-х приложений, изложена на 162 страницах, иллюстри-

рована 39 рисунками, содержит 21 таблицу, список библиографий включает 133 наименования

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Для случая воздействия широкополосной помехи:
 - влияние реальной помехи можно представлять в виде белого гауссовского шума (БГШ) и для аналитического описания $h_{\text{БГШ}}^2$ (отношение средней энергии сигнала, расходуемой на передачу одного бита сообщения с учетом воздействия спектральной плотности мощности шума и помехи «сигнал/шум с учетом воздействия помехи») использовать выражение (1),
 - граница применимости выражения (1) определяется путем сравнения экспериментальных и вычисленных в соответствии с (1) характеристик помехоустойчивости (эксперимент проводился в пакете прикладных программ MatLab);
 - при F (отношение полосы частот, занимаемой сигналом, к полосе частот, занимаемой помехой) меньше 0,125 наблюдается инвариантность к выбору вида модуляции помехи
2. Для случая воздействия узкополосной помехи.
 - влияние помехи отлично от воздействия шума и для аналитического описания «сигнал/шум с учетом воздействия помехи» предлагается использовать выражение (3),
 - вероятность ошибки на бит передаваемой информации определяется минимальным расстоянием между точками сигнального созвездия сигнала
3. Комплекс методик для обоснования рациональных параметров функционирования РЭС, создающих помехи, включая
 - методику оценки помех между РЭС РНСС и РЭС других служб,
 - методику оценки вероятности ошибки на бит передаваемой информации

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследования, приведена краткая аннотация работы по разделам, определена практическая ценность результатов работы.

В первой главе диссертационной работы проведен анализ существующих работ по ЭМС РЭС РНСС с РЭС других служб. На основе проведенного анализа определен перечень не решенных в настоящее время научных проблем. Также был проведен анализ условий совместного функционирования РЭС РНСС в общих и соседних полосах частот, который показал, что вне зависимости от международного юридического статуса РНСС и РЭС других служб в используемых полосах частот при разработке всегда возникает задача обеспечения таких характеристик и параметров функционирования системы, которые позволили бы реализовать требования по ЭМС. Отметим, что такая же задача возникает и в рамках одной службы.

В ходе исследования были учтены различные методы уменьшения помех, реализуемые с целью обеспечения условий совмещения с другими системами. При этом под методом уменьшения помех понимается изменение определенного параметра функционирования мешающего РЭС с целью уменьшения уровней помех, создаваемых в отношении других сетей радиосвязи.

Основываясь на результатах исследований, выполненных в рамках Сектора радиосвязи МСЭ, применяемые для совмещения с другими службами методы можно условно разделить на две основные группы:

1 Методы, основанные на изменении базовых характеристик РЭС (используемые классы излучений, характеристики антенных систем, и т.п.)

2 Методы, основанные на изменении параметров функционирования РЭС в рамках его заданных базовых характеристик.

Использование первой группы методов приводит к пересмотру концепции построения системы, что может быть связано с изменением технического облика системы.

Вторая группа методов позволяет реализовать требования к РЭС без внесения кардинальных изменений в их характеристики. В тех случаях, когда совмещение рассматриваемых РЭС не может быть достигнуто на приемлемых условиях за счет применения таких методов, делается вывод о необходимости пересмотра базовых характеристик мешающих РЭС и изменения концепции их построения.

В соответствии со сформулированной целью в данной диссертационной работе исследования проводились в отношении параметров функционирования мешающих РЭС, характеризующих вторую группу методов уменьшения помех (таблица 1).

Таблица 1 - Методы уменьшения помех

№ п/п	Название метода уменьшения помех	Параметр функционирования РЭС	Службы, применяющие данный метод
1	Переориентация диаграммы направленности антенны РЭС в пространстве	Относительное изменение диаграммы направленности РЭС, g	космические и наземные службы
2.	Регулирование мощности излучения РЭС	Относительное уменьшение мощности излучения РЭС, w	космические и наземные службы
3	Поляризационная развязка	Дополнительное ослабление за счет поляризационной развязки, p	космические и наземные службы
4.	Территориальный разнос до затрагиваемого РЭС	Величина территориального разноса до затрагиваемого РЭС, d	наземные службы

В общем случае ЭМС определяется, как способность устройства, оборудования или системы функционировать удовлетворительно в их электромагнитной обстановке, не создавая и не испытывая недопустимых помех чему-либо в этой обстановке.

При этом вопрос обеспечения ЭМС между РЭС РНСС и РЭС других служб осложняется тем, что радионавигационные спутниковые системы (включая систему ГЛОНАСС) используют негеостационарную орбиту (НГСО) В общем случае для данного типа орбит можно отметить ряд существенных особенностей, которые необходимо учитывать при проведении оценки ЭМС систем НГСО

1. Помехи, действующие между двумя спутниковыми сетями, одна из которых использует НГСО, являются непостоянными (действуют, как правило, в течение непродолжительных, но многократных периодов времени), что обусловлено постоянным изменением взаимного расположения взаимодействующих РЭС

2 Помехи характеризуются как энергетическими, так и временными характеристиками, которые связаны с периодами времени, в течение которых энергетические характеристики помех превышают допустимые значения

Проведенный анализ показал, что помехи, создаваемые РЭС, являются одним из факторов, влияющих на качество функционирования радиолинии других РЭС, при этом изменение соответствующих параметров функционирования мешающих РЭС влечет за собой изменение уровня этих помех Одновременно изменение этих же параметров влияет на качество функционирования мешающих РЭС

Во второй главе на основе проведенного в первой главе анализа, принятых ограничениях и допущениях сформулирована постановка задачи

При заданных характеристиках мешающих РЭС и характеристиках затронутых РЭС, требованиях к качеству их радиолиний, требуется определить рациональные параметры функционирования мешающих РЭС, для которых

- уровни помех, создаваемых мешающими РЭС, в отношении затронутых РЭС не превышают допустимых значений; и при этом
- обеспечиваются минимальные потери энергетического запаса в радиолинии мешающих РЭС

Также в данной главе проведено исследование, которое позволило получить аналитические выражения для оценки вероятности ошибки на бит передаваемой информации для случая воздействия на сигнал смеси шума и модулированной помехи, а так же оценить границы применимости этих выражений Для исследования был выбран достаточно широкий класс сигналов, а именно сигналы с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ) В качестве модулированной помехи был взят сигнал, использующий КАМ По результатам исследования сформулированы следующие выводы:

1 Для случая воздействия широкополосной помехи влияние реальной помехи можно представлять в виде БГШ и для аналитического описания использовать следующее выражение

$$h_{\delta\mathcal{E}} = \sqrt{1 + \frac{h_{\delta}^2}{\left[\frac{1}{H^2} \cdot h_{\delta}^2\right]}} \quad (1)$$

где $h_{\delta\mathcal{E}}^2$ – отношение средней энергии сигнала, расходуемой на передачу одного бита сообщения с учетом воздействия спектральной плотности мощности шума и помехи (отношение «сигнал/шум с учетом воздействия помехи»),

h_{δ}^2 – отношение средней энергии сигнала, расходуемой на передачу одного бита сообщения к спектральной плотности мощности шума (отношение «сигнал/шум»),

H^2 – отношение средней энергии сигнала, расходуемой на передачу одного бита сообщения к спектральной плотности мощности помехи (отношение «сигнал/помеха»)

Для оценки вероятности ошибки на бит передаваемой информации сигнала КАМ при воздействии БГШ используется выражение (2)

$$P_{\text{ош}} \approx \frac{2 \left[1 - \frac{1}{\sqrt{M_C}} \right]}{\log_2(\sqrt{M_C})} Q \left[\sqrt{\left(\frac{3 \log_2(\sqrt{M_C})}{M_C - 1} \right) 2 h_{\delta}} \right] \quad (2)$$

где $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt$ – функция ошибок

Таким образом, для оценки вероятности ошибки на бит передаваемой информации сигнала КАМ при воздействии БГШ и помехи необходимо вместо h_{δ} в выражение (2) подставить $h_{\delta\mathcal{E}}$ из выражения (1)

2 Граница применимости выражения (1) определяется путем сравнения экспериментальных и вычисленных в соответствии с (1) характеристик помехоустойчивости (эксперимент проводился в пакете прикладных программ MatLab)

3 При $F \leq 0,125$ наблюдается инвариантность к выбору вида модуляции помехи

4 При $F \geq 1$

а) При получении аналитического выражения для случая воздействия узкополосной помехи, учтем, что большое значение имеет взаимное расположение точек сигнальных созвездий сигнала и помехи, которое в реальности изменяется, т.е. сигнальное созвездие помехи все время вращается относительно сигнального созвездия сигнала (рисунок 1). В общем случае скорость данного вращения может быть неравномерной. Отразим эту ситуацию, приняв, что сигнальное созвездие сигнала не вращается, а сигнальное созвездие помехи вращается неравномерно. Отметим, что в данных рассуждениях за точку отсчета принят центр сигнального созвездия

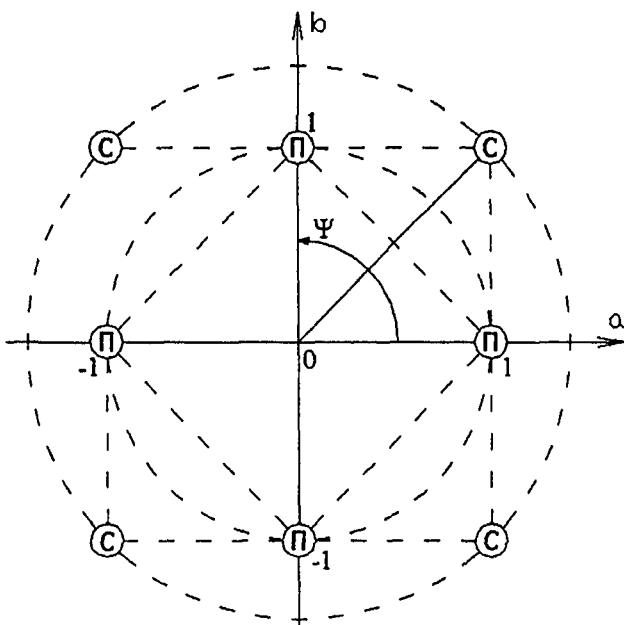


Рисунок 1 - Сигнальные созвездия помехи и сигнала

Типовой метод обработки сигналов КАМ основан на независимом приеме с двух квадратур, возможны случаи, когда проекции помехи на одну из квадратур, будут больше или равны проекции сигнала, хотя средняя мощность сигнала будет больше средней мощности помехи (рисунок 1) Выберем две точки в сигнальном созвездии сигнала, находящиеся на минимальном расстоянии друг от друга, например, две правые точки со значком «С» (рисунок 1) Предположим, что передается верхняя точка из двух выбранных. Для рассматриваемого случая воздействие помехи на приемной стороне будет определяться влиянием величины проекции на ось b амплитуды k -й точки сигнального созвездия помехи на величину проекции амплитуды m -й точки (в нашем случае это верхняя правая точка) сигнального созвездия сигнала на ту же ось.

Таким образом, влияния узкополосной помехи отлично от воздействия шума и предлагается использовать следующее выражение

$$h_{\delta x} = h_{\delta} \left(1 - \frac{\sqrt{P_{пк}} \sin \Psi}{\sqrt{P_{См}}} \right), \quad (3)$$

где $h_{\delta x}^2$ - отношение средней энергии сигнала, расходуемой на передачу одного бита сообщения с учетом воздействия спектральной плотности мощности шума и помехи (отношение «сигнал/шум с учетом воздействия помехи»),

h_b^2 – отношение средней энергии сигнала, расходуемой на передачу одного бита сообщения к спектральной плотности мощности шума (отношение «сигнал/шум»),

P_{pk} – мощность k -й точки сигнального созвездия помехи КАМ– M_{II} ,

Ψ – мгновенное значение поворота фазы сигнального созвездия помехи относительно сигнального созвездия сигнала,

M_{II} – число точек в сигнальном созвездии помехи КАМ– M_{II} ;

P_{cm} – мощность m -й точки сигнального созвездия сигнала КАМ– M_C ;

M_C – число точек в сигнальном созвездии сигнала КАМ– M_C .

Используя (3), можно получить массив мгновенных значений $h_{b\sigma}$, который будет зависеть от трех параметров: h_b , P_{pk} , Ψ . Подставляя вместо h_b в выражение (2) массив мгновенных значений $h_{b\sigma}$ из выражения (3), получим массив мгновенных значений вероятности ошибки на бит передаваемой информации.

Чтобы получить значения вероятности ошибки на бит передаваемой информации, зависящие от h_b , необходимо произвести усреднение по параметрам P_{pk} и Ψ . Распределение Ψ , как случайной величины, является равномерным, что дает право провести усреднение массива мгновенных значений вероятности ошибки на бит передаваемой информации по параметру Ψ . В тоже время распределение P_{pk} как случайной величины, не является равномерным, поэтому усреднение по параметрам P_{pk} должно производиться с учетом вероятности появления помех разного уровня, эти вероятности зависят от вида сигнального созвездия помехи

В результате усреднения получены табулированные функции вероятности ошибки на бит передаваемой информации, представленные в диссертационной работе в виде серий графиков. Отметим, что вид данных функций определяется видом модуляции помехи, видом модуляции сигнала, отношением «сигнал/шум» и отношением P_C/P_{II} , где P_C – средняя мощность сигнала, а P_{II} – средняя мощность помехи. На рисунке 2 представлен графический пример с зависимостями значений вероятности ошибки на бит передаваемой информации от отношения «сигнал/шум» для случая воздействия на сигнал КАМ-4 модулированной помехи КАМ-16.

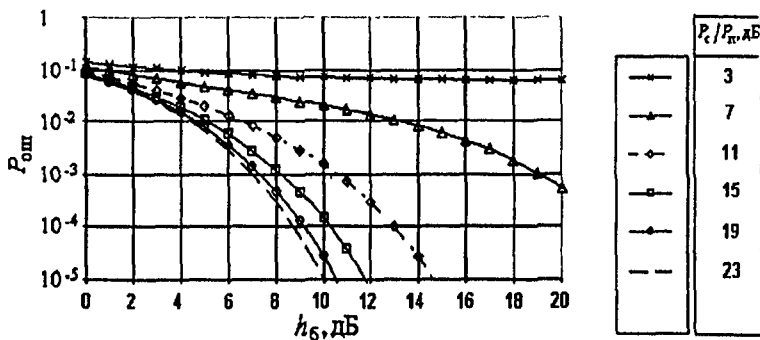


Рисунок 2 - Зависимости значений вероятности ошибки на бит передаваемой информации от отношения «сигнал/шум» для случая воздействия на сигнал КАМ-4 модулированной помехи КАМ-16

б) вероятность ошибки на бит передаваемой информации определяется минимальным расстоянием между точками сигнального созвездия сигнала

В третьей главе в соответствии с постановкой задачи и методической схемой ее решения определена структура комплекса методик обеспечения ЭМС РЭС РНСС и РЭС других служб, которая представляет собой совокупность моделей и методик, описывающих отдельные стороны исследуемого процесса. Выбранная блочная структура позволяет автономно совершенствовать отдельные методики и соответствующие им расчетные задачи, расширять состав методического обеспечения для обоснования рациональных параметров функционирования мешающих РЭС в случае, например, наличия возможности применения для конкретных типов РЭС других методов уменьшения помех.

Комплекс методик включает в себя

Первый уровень,

- модель функционирования РЭС;
- методику обоснования и выбора шага моделирования

Второй уровень:

- методику определения требований по защите затронутых РЭС,
- методику оценки помех между РЭС РНСС и РЭС других служб,
- методику оценки энергетического запаса в радиолинии РЭС,
- методику оценки вероятности ошибки на бит передаваемой информации.

Третий уровень.

- методику выбора рациональных параметров функционирования мешающих РЭС.

Структурная схема комплекса методик представлена на рисунке 3

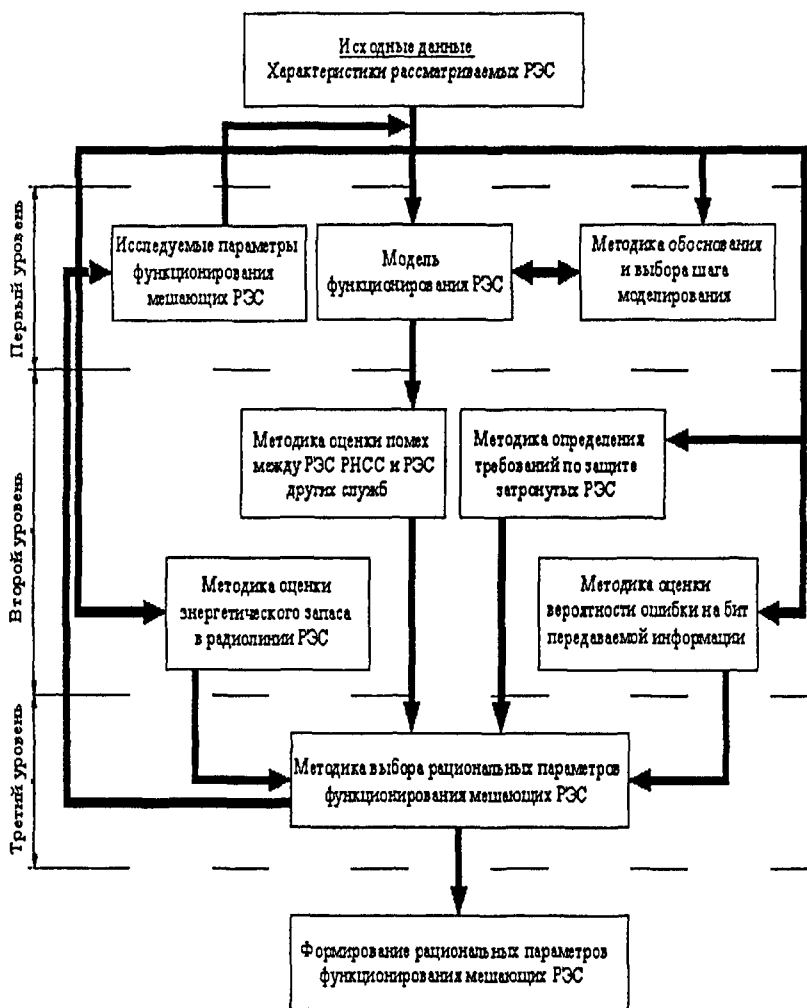


Рисунок 3 - Структурная схема комплекса методик

Методика определения требований по защите затронутых РЭС

Данная методика предназначена для определения критерия защиты РЭС от помех, а именно помеха от мешающих РЭС является приемлемой, если вероятность того, что мощность помехи превысит предельное значение и будет не выше допустимой

При этом могут быть определены различные требования по защите РЭС от помех

– «кратковременные» требования по защите РЭС от помех (их можно нарушать в течение очень малого процента времени) В соответствии с Рекомендациями Сектора радиосвязи МСЭ к данным требованиям по защите РЭС от помех рекомендовано относить процент времени 0 1% времени на интервале наблюдения не менее 1 месяца;

– «долговременные» требования по защите РЭС от помех (их можно нарушать в течение достаточно большого процента времени) В соответствии с Рекомендациями Сектора радиосвязи МСЭ к данным требованиям по защите РЭС от помех рекомендовано относить помехи, возникающие более 10% времени на интервале наблюдения не менее 1 месяца

Методика оценки помех между РЭС РНСС и РЭС других служб

Данная методика предназначена для определения значения показателя помех, создаваемых мешающими РЭС в отношении РЭС, испытывающего помехи, а именно для определения вероятности того, что суммарная мощность помех, создаваемых мешающими РЭС на выходе приемной антенны затронутого РЭС превысит заданный уровень.

Данная методика расширена в части учета оценки помех на линии «Земля-Земля», а так же в возможности расчета помех не только в общих, но и в соседних полосах частот

Также в методике учтены.

– случайный характер уровней помех, создаваемых мешающими РЭС в отношении затронутых РЭС а также эффект суммарного воздействия помех от множественных источников;

– ослабление помехового сигнала в газах атмосферы;

– особенности функционирования мешающих РЭС при применении специальных методов уменьшения помех

Таким образом, методика позволяет установить и оценить зависимость выходного показателя помех от различных характеристик и параметров функционирования мешающих РЭС, в том числе при применении в системе специальных методов уменьшения помех для обеспечения ЭМС с РЭС других служб В основе предложенной методики лежит модель функционирования РЭС

Методика оценки энергетического запаса в радиолинии РЭС

Методика предназначена для определения энергетического запаса в радиолинии РЭС, создающего помехи В данной работе используется показатель для оценки качества функционирования радиолинии мешающих РЭС, предложенный Кантором Л Я

Показатель величины уменьшения (потери) энергетического запаса радиолинии (*EML* (Energy Margin Loss)) можно определить из следующего выражения:

$$EML = q_0(F_n) - q(F_n),$$

где $q_0(F_n)$ – значение (в дБ) отношения мощности полезного сигнала на входе приемника рассматриваемого РЭС к общей мощности теплового шума,

приведенного ко входу того же приемника рассматриваемого РЭС, при заданной вероятности F_n ,

$q(F_n)$ – значение (в дБ) отношения мощности полезного сигнала на входе приемника рассматриваемого РЭС к общей мощности шумов и помехи, приведенных ко входу того же приемника рассматриваемого РЭС, при заданной вероятности F_n .

Методика оценки вероятности ошибки на бит передаваемой информации

Данная методика позволяет по предложенным аналитическим выражениям проводить оценку вероятности ошибки на бит передаваемой информации при наличии в канале связи шума и модулированной помехи, при этом.

– для случая воздействия широкополосной помехи вычисление отношения средней энергии сигнала, расходуемой на передачу одного бита сообщения с учетом воздействия спектральной плотности мощности шума и помехи производится по формуле (1)

– для случая воздействия узкополосной помехи вычисление отношения средней энергии сигнала, расходуемой на передачу одного бита сообщения с учетом воздействия спектральной плотности мощности шума и помехи производится по формуле (3)

Методика выбора рациональных параметров функционирования мешающих РЭС

Обоснование рациональных параметров функционирования мешающих РЭС осуществляется с использованием разработанной методики. Особенностями данной методики является следующее:

– задача обеспечения ЭМС между рассматриваемыми РЭС решается при минимальных ограничениях на мешающие РЭС;

– учет комплексного применения различных методов уменьшения помех при выборе параметров мешающих РЭС.

Для решения задачи выбора рациональных параметров функционирования мешающих РЭС был использован модифицированный метод покоординатного спуска, суть которого заключается в сведении многомерной задачи к последовательным одномерным задачам, которые решаются методами минимизации функции одной переменной – в данном случае методом золотого сечения. Целесообразность использования данного метода, а также его эффективность была подтверждена работами других авторов по данному вопросу.

В четвертой главе представлены практические рекомендации по обеспечению ЭМС РЭС РНСС и РЭС других служб для конкретных условий их совместного функционирования, основанные на анализе характера влияния различных параметров функционирования мешающих РЭС на величину создаваемых ими помех и показателя качества функционирования радиолинии мешающего РЭС.

Результаты прикладных исследований представлены по следующим вопросам

- определение условий ЭМС между РЭС радиоастрономической службы, работающими в полосе частот 1610 6 – 1613 8 МГц, и РЭС РНСС, работающими в полосе частот 1 559-1 610 МГц,
- определение условий ЭМС РЭС РНСС с РЭС ВРНС в совместно используемой полосе частот 1164-1215 МГц,
- определение условий ЭМС сверхширокополосных устройств с РЭС РНСС, работающими в полосах частот 1 164-1 215 МГц, 1 215-1 300 МГц и 1 559-1 610 МГц,
- разработка методологии по координации РЭС РНСС, как в рамках одной службы, так и с РЭС других служб

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы, позволившие решить актуальную научно-техническую задачу по обеспечению ЭМС систем связи, радионавигационных спутниковых систем и систем других служб при их совместном функционировании в общих и соседних полосах частот путем выбора рациональных параметров функционирования мешающих РЭС. Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем

1. На примере рассматриваемых в диссертационной работе вопросов поставлена и решена задача обеспечения ЭМС между РЭС РНСС и РЭС других служб в системной постановке, когда в исследовательскую схему включены факторы, характеризующие влияние внешних условий на распространение полезного и помехового сигналов, при этом применены различные методы уменьшения помех, направленные на снижение помехового влияния в отношении затронутых РЭС

2. Проведено исследование вопроса помехоустойчивости для случая воздействия смеси шума и модулированной помехи на сигнал, которое позволило получить аналитические выражения, а так же оценить границы применимости этих выражений

3. Определен состав необходимого методического обеспечения для решения исследовательских задач. Выбран показатель, характеризующий уровни помех, создаваемые мешающими РЭС, а также показатель для оценки качества функционирования радиолинии мешающих РЭС

4. Разработан комплекс методик, позволяющий обеспечить ЭМС РЭС РНСС и РЭС других служб и обосновывать рациональные параметры функционирования мешающих РЭС, который включает.

- методику определений требований по защите РЭС, испытывающих помехи;
- методику оценки помех между РЭС РНСС и РЭС других служб;
- методику оценки потери энергетического запаса в радиолинии РЭС,
- методику оценки вероятности ошибки на бит передаваемой информации,
- методику выбора рациональных параметров функционирования РЭС, создающих помехи

Разработанный комплекс методик

- использует достаточно универсальный показатель для оценки качества функционирования радиолинии с точки зрения применимости к большому числу типов РЭС (показатель предложен Кантором Л.Я.);
- позволяет решать задачу достижения ЭМС между РЭС РНСС и РЭС других служб не только в общих, но и в соседних полосах частот,
- включает в себя аналитические выражения для оценки вероятности ошибки на бит передаваемой информации при наличии в канале связи шума и модулированной помехи, при этом определены границы применимости данных аналитических выражений

Данная работа позволила:

- решить ряд практических задач по обеспечению ЭМС систем связи, радионавигационных спутниковых систем и систем других служб для конкретных условий их совместного функционирования, основанные на анализе характера влияния различных параметров функционирования мешающих РЭС на величину создаваемых ими помех и показателя качества функционирования радиолинии мешающих РЭС,
- создать методологию по координации РЭС РНСС, как в рамках одной службы, так и с РЭС других служб, которая отражена в действующей Рекомендации МСЭ-Р М 1831;
- создать международные радиочастотные заявки на систему радионавигационной спутниковой службы ГЛОНАСС;
- создать программный продукт, обеспечивающий автоматизированную оценку совместимости систем радионавигационной спутниковой службы с системами воздушной радионавигационной спутниковой службы в полосе частот 1164-1215 МГц

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

- 1 Желтоногов ИВ, Аронов ДА. Решение проблем ЭМС станций радиовещания и других наземных служб в полосах частот 174 . 230 МГц и 470...862 МГц // Электросвязь. - 2006. -№ 11 - С. 28-30.
- 2 Аронов Д.А. Оценка вероятности ошибки на бит передаваемой информации при наличии шума и модулированной помехи // Электросвязь. - 2007 -№ 11. - С. 56-59
3. Аронов ДА Электромагнитная совместимость радионавигационных спутниковых систем с дальномерными аэронавигационными системами в L3 диапазоне // Тезисы докладов 59-я студенческая научно-техническая конференция - М МТУСИ - 2004 - С 33
- 4 Аронов ДА Электромагнитная совместимость радионавигационной спутниковой системы с дальномерными навигационными системами в полосе частот 1 164 – 1 215 МГц // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние ЭМВ - ИРЭМВ-2005» - Таганрог: Изд-во ТРТУ-2005 - С. 266-268
- 5 Аронов ДА Электромагнитная совместимость радионавигационной спутниковой системы с дальномерными навигационными системами в полосе

частот 1 164 – 1 215 МГц // Тезисы докладов Научная конференция профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава Книга 1 - М · МТУСИ – 2005 - С 184-185

- 6 Аронов ДА Применение систем искусственного интеллекта к расчету электромагнитной совместимости спутниковой радионавигационной системы с дальномерными навигационными системами в полосе частот 1 164 – 1 215 МГц// Труды 8-ой научной сессии «Интеллектуальные системы и технологии». Том 3 - М.. МИФИ - 2005. - С 140-141
- 7 Аронов ДА. Электромагнитная совместимость спутниковой радионавигационной системы с дальномерными навигационными системами в полосе частот 1 164 – 1 215 МГц // Тезисы докладов Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии». - НГТУ - 2005 - С. 43-44
- 8 Аронов ДА Вопрос электромагнитной совместимости сверхширокополосных устройств со спутниковой радионавигационной системой в совместно используемых полосах частот // Тезисы докладов Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» - НГТУ - 2006 - С 27-29
- 9 Аронов ДА Применение систем искусственного интеллекта в сфере компьютерных технологий при решении вопроса электромагнитной совместимости сверхширокополосных устройств со спутниковой радионавигационной системой в совместно используемых полосах частот // Труды 10 – ой национальной конференции (с международным участием) по искусственному интеллекту Том 3. - М . Физматлит-2006 - С 972-975.

Подписано в печать 07 07.08 Формат 60x84/16 Объем 1,3 усл п л
Тираж 100 экз Заказ 111.

ООО «Инсвязьиздат» Москва, ул. Авиамоторная, 8

20