



На правах рукописи

2 0 АВГ 2009

МУРЗАКУЛОВ Гавыллатып

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ, ОБЕСПЕЧЕНИЯ И КОНТРОЛЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
И СРЕДСТВ РЕГИОНА В ОБЩИХ РАБОЧИХ ЗОНАХ**

Специальности:

05.07.07 – Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем
05.07.06 – Наземные комплексы, стартовое оборудование, эксплуатация летательных аппаратов;

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва 2009

Работа выполнена в научно-исследовательском институте космических систем имени А.А.Максимова – филиале Государственного космического научно-производственного центра им. М.В.Хруничева.

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор КАЩЕЕВ Н.А.

(по специальности 05.07.07);

доктор технических наук, старший научный сотрудник МАКАРОВ М.И.

(по специальности 05.07.06);

Официальные оппоненты:

доктор технических наук ЛЕОНОВ М.С.;

кандидат технических наук, старший научный сотрудник ДУБОВОЙ А.Н.

Ведущая организация – ФГУП «РНИИ космического приборостроения».

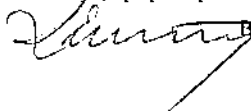
Защита диссертации состоится 20 августа 2009 года в 14 часов на заседании диссертационного совета ДС403.003.01 при Государственном космическом научно-производственном центре им. М.В.Хруничева в НИИ космических систем имени А.А.Максимова, г. Юбилейный Моск. обл., ул. М.К. Тихонравова, 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИ космических систем имени А.А.Максимова.

Автореферат разослан 15 июля 2009 года.

Ученый секретарь диссертационного совета ДС403.003.01

доктор технических наук, профессор

 В.С. ЧАПЛИНСКИЙ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Задача оценки, обеспечения и контроля электромагнитной совместимости группировки радиоэлектронных космических средств региона в данной работе рассматривается с практической направленностью по отношению к развивающимся национальным радиотехническим комплексам Республики Казахстан.

Актуальность работы

Электромагнитная совместимость (ЭМС) космических средств (КСр) является научно-техническим направлением, которое не теряет своей актуальности на глобальном уровне по ряду следующих основных причин:

- постоянное увеличение (примерно вдвое за каждые 5 лет) количества разнотипных радиоэлектронных средств (РЭС) практически во всех группировках и регионах Земли;
- максимальное использование до уровней, ограниченных взаимным влиянием, энергетического и частотно-временного ресурса в космических радиополосах, в особенности, радиополосах космической связи;
- насыщение геостационарной орбиты (ГСО) спутниками связи, вещания и наблюдения;
- создание многоспутниковых группировок на различных околоземных орбитах.

Это потребовало, в частности, координации выбора частотных диапазонов и организации деятельности РЭС специализированными международными комитетами и государственными организациями.

По своей значимости ЭМС оказалась фактором, соизмеримым с такими свойствами РЭС, как помехозащищенность (ПМЗ) и надежность, что выдвигает ее в ряд важнейших проблем обеспечения информационной устойчивости радиотехнических систем.

Первые попытки решения проблемы ЭМС в отечественной и зарубежной практике путем коренной модернизации РЭС с перераспределением выделяемых полос частот не дали положительных результатов из-за недопустимо больших материальных затрат, отсутствия достоверных сведений о причинах возникновения помех и физике их воздействия на радиоканалы.

Общее состояние научной проблемы ЭМС характеризовалось отсутствием практически применимых инженерных методов оценки, обеспечения и контроля ЭМС. Существующие методики давали расхождения по оценке ЭМС в 20...30 дБ. Отсутствовали методы и средства оценки электромагнитной обстановки (ЭМО). Такое состояние проблемы обусловило актуальность задач разработки и стандартизации корректных методов и моделей в данной предметной области.

Противоречия между потребностями решения задач ЭМС и создания новых средств, включаемых в группировки РЭС, определяют актуальность дальнейшего развития методов оценки, обеспечения и контроля ЭМС для каждой развиваемой группировки средств, особенно на начальной стадии создания группировки, когда большинство характеристик систем могут экспериментально контролироваться и корректироваться.

Научной основой ЭМС является теория помехозащищенности и ее составляющей – помехоустойчивости (ПМУ), теория электромагнитных колебаний, теория антенно-фидерных устройств (АФУ) и приемников, теория распространения радиоволн, теория оптимального управления, теория надежности, математический и функциональный анализ, теория вероятности и математической статистики.

Теория ЭМС РЭС по своей сути является теорией обобщения экспериментальных данных с соответствующими выводами. Первые экспериментальные работы были направлены на установление фактов электромагнитной несовместимости. Цель дальнейших проводимых исследований определялась как поиск путей обеспечения ЭМС РЭС, работающих в совместных полосах частот.

В настоящее время экспериментальные исследования ЭМС по-прежнему являются одним из основных методов, позволяющих получать адекватные данные. В Республике Казахстан с этой целью используются стационарные измерительно-пеленгационные комплексы и специализированные автотранспортные комплексы повышенной проходимости. В состав наземного комплекса обеспечения функционирования спутников связи и вещания «KazSat» и их потребителей входит система мониторинга связи (СМС), выполняющая контрольные функции. Экспериментальные исследования являются дорогостоящими, что определило, в частности, актуальность развития аналитических методов и методов математического моделирования.

С начала 70-х годов система взглядов на задачи ЭМС пополнилась выделением в этой предметной области случайных процессов и соответственно использованием методов математической статистики. В середине 70-х годов появились первые нормативно-технические документы, регламентирующие параметры ЭМС.

В 80-х годах сформировались научные труды по ЭМС, которые в настоящее время можно определить как классические. Эти труды, в основном, были направлены на анализ процессов прохождения смеси сигналов и помех через линейные и нелинейные цепи приемных устройств. Здесь следует отметить основополагающие работы В.А.Котельникова, В.И.Сифорова, А.А.Харкевича, К.Шеннона, И.Винера, Д.Неймана, Р.Эшби, Б.Р.Левина, А.Ф.Аноровича и др.

В космической отрасли появились прикладные работы научных коллективов, воз-

главляемых И.В. Мещеряковым, Л.Т. Тучковым, Н.Б.Резвцовым, П.А.Агаджановым, В.С.Чаллиским, Е.Е.Ионкиным и др.

Научные основы сложившейся методологии включают следующие основные направления:

- установление зависимостей отношения сигнал/помеха на выходе приемника от его уровня на входе приемника для различных типов сигналов и помех;
- установление эквивалентности различных мер обеспечения ЭМС;
- разработка моделей и определение параметров электромагнитной обстановки;
- уточнение законов распространения радиоволн в пределах группировки КСр (пункта, центра космической связи и др.);
- определение зависимостей характеристик восстановления ресурса ЭМС от характеристик космической системы (КС);
- оценка параметров эквивалентных помех реально действующим помеховым воздействиям;
- решение задач управления электромагнитным полем.

Проблема ЭМС КСр для Республики Казахстан представляется одной из существенных при образовании национальной группировки спутников связи и всадания серии «KazSat», а в последующем, с созданием космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), измерительного комплекса национального космодрома, она только обострится.

Первоочередной задачей, очевидно, является оценка ЭМС группировки КСр, размещенных на объекте Акколь, где предполагается сосредоточить несколько наземных станций (НС) командно-измерительных систем (КИС) одного типа, каждая из которых может формировать как сигналы, так и помехи в направлении на управляемые космические аппараты (КА) и в обратном направлении. Аналогичный пункт предполагается создать в районе г.Алматы. В дальнейшем исследования ЭМС могут быть подвергнуты средства управления спутниками связи совместно с комплексами ДЗЗ и другими комплексами региона, расположенными в общих рабочих зонах.

Группировка РЭС с позиций ЭМС рассматривается как сложная многофункциональная информационная система, компромиссно использующая общие ресурсы в интересах решения различных задач.

На верхнем иерархическом уровне исследований сложных информационных систем, в том числе группировок КСр, подвергающихся взаимным помеховым воздействиям, а также воздействиям других РЭС, должны разрабатываться методы оценки и обеспечения обобщенных показателей качества информационной системы, получивших название пока-

зателей эффективности, характеризующих пригодность системы к выполнению системой своих функциональных задач.

В этом плане методы оценки, обеспечения и контроля ЭМС каждой группировки средств имеют свои специфические особенности.

Учитывая изложенные положения, характеризующие состояние научных разработок и практики оценки, обеспечения и контроля ЭМС, сформулированная тема диссертации представляется *актуальной*.

Объект исследования: Электромагнитная совместимость региональных наземных и космических группировок радиоэлектронных космических средств, а также других РЭС, функционирующих в общих рабочих зонах (частотных, временных, кодовых, пространственных, поляризационных).

В работе объект исследования (радиоэлектронные КСр) включает космический и наземный сегменты космических комплексов связи (вещания) и управления КА, а также другие радиоэлектронные средства региона, которые могут функционировать в общих рабочих зонах с космическими средствами. Основной акцент в исследованиях делается на радиотехнические средства управления КА, поскольку современные системы связи и вещания с их многостанционным доступом немислимы без обеспечения внутрисистемной электромагнитной совместимости. Работ в этом направлении достаточно для решения перспективных практических задач. Кроме того, функционирование средств связи и вещания постоянно контролируется СМС с выявлением незарегистрированных сигналов и других мешающих факторов. В то же время средства управления, предназначенные для массового применения по отношению к различным космическим системам и комплексам, не имеют средств контроля типа системы мониторинга и, тем самым, представляются более уязвимыми с позиций электромагнитной совместимости.

Предмет исследования: Методы оценки, обеспечения и контроля ЭМС КСр.

Цель диссертации: Обеспечение требуемой эффективности функционирования региональных радиоэлектронных КСр на основе реализации рекомендаций, сформулированных с помощью разработанной системы методов оценки, обеспечения и контроля ЭМС.

Для достижения поставленной цели в диссертации решена *научная задача* разработки системы методов оценки, обеспечения и контроля ЭМС региональной группировки радиоэлектронных КСр, а также группировки КСр с другими РЭС региона в общих рабочих зонах.

Научные результаты, вынесенные на защиту:

1. Критерии оценки ЭМС и показатели эффективности КСр, сформулированные па

основе *целевых задач космических систем*; расширенный критерий ЭМС радиолинии РЭС для вариантов воздействия *нескольких источников помех* в виде стационарных нормальных шумов.

2. Имитационная модель функционирования космических систем (комплексов) радиоэлектронных КСр и метод оценки показателей их эффективности в условиях отсутствия внешних помех или воздействия *ансамбля помех* в виде стационарного нормального шума.

3. Метод представления помех различных уровней и форм в виде региональных эквивалентов нормального стационарного шума.

4. Оценки ЭМС группировок радиоэлектронных КСр и РЭС региона.

5. Требования и рекомендации по обеспечению и контролю ЭМС радиоэлектронных КСр.

Научная новизна полученных результатов заключается:

- в специфичной системе критериев и показателей эффективности объекта исследований, обоснованной исходя из полученных на основе имитационного статистического моделирования зависимостей показателей эффективности КСр, функционирующих в составе космических систем, от их характеристик и электромагнитной обстановки;

- в нахождении принципов экспериментально-аналитического моделирования процессов формирования мешающих сигналов на основе представления помех различных уровней, характеристик и форм в виде региональных эквивалентов нормального стационарного шума;

- в решении задачи оптимизации мер по обеспечению ЭМС радиоэлектронных КСр (оптимального выбора состава режимов обеспечения ЭМС РЭС по критерию минимума приращения стоимости РЭС при заданных требованиях к вероятности выполнения сеансов связи);

- в получении оценок ЭМС группировок радиоэлектронных КСр и РЭС региона с использованием эквивалентов помех в виде нормального стационарного шума.

Научная значимость диссертации заключается в развитии методов оценки, обеспечения и контроля ЭМС КСр применительно к региону космической деятельности.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечиваются и подтверждаются: учетом существенных факторов, оказывающих влияние на корректность и адекватность разработанных методических положений и практических рекомендаций; обоснованным выбором основных допущений и ограничений, принятых в качестве исходных данных при постановке научной задачи; использованием современного апробированного математического аппарата, корректным обоснованием критериев и показателей

ЭМС, а также применяемых и разработанных математических моделей и экспериментальных данных.

Практическая значимость выполненной работы заключается в обеспечении требуемой эффективности функционирования республиканских радиоэлектронных КСр в группировке РЭС региона.

Применение разработанных методов и рекомендаций позволяет:

- определять требования и основные практические рекомендации по обеспечению ЭМС группировки КСр, обоснованию и контролю их характеристик;
- обосновывать характеристики радиотехнических КСр, создаваемых по заказам предприятий отрасли;
- определять состав и размещение космических радиотехнических комплексов, соответствующий заданным требованиям;
- производить комплексную оценку эффективности космических систем в условиях непреднамеренных помеховых воздействий для выбора предпочтительного варианта построения систем, обеспечения и контроля ЭМС РЭС.

Разработанные методы позволяют более обоснованно формировать технические решения при создании перспективных средств связи и управления КА различного назначения.

В дальнейшем полученные научные результаты могут быть непосредственно использованы в организациях промышленности, разрабатывающих перспективные радиоэлектронные КСр; в научно-исследовательских учреждениях, заказывающих и эксплуатирующих соответствующую технику организациях.

Диссертационная работа является обобщением и развитием исследований, проведенных автором в НИИ космических систем имени А.А. Максимова – филиале ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, а также при выполнении совместных работ НИИ космических систем с заинтересованными организациями промышленности в период с 2002 по 2009 годы *и реализованных:*

- в соответствующих программных документах России и Республики Казахстан;
- в технических заданиях на создание космического комплекса «KazSat» и его подсистем;
- в методиках оценки, обеспечения и контроля ЭМС, используемых предприятием АО «Республиканский центр космической связи и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств» Республики Казахстан;
- в методиках оценки эффективности функционирования КА связи и ДЗЗ;
- в программно-методическом обеспечении испытаний наземного комплекса

управления (НКУ) и СМС КА серии «KazSat».

Результаты диссертации используются в НИОКР ГКНПЦ им. М.В.Хруничева, РНИИ космического приборостроения; АО «Республиканский центр космической связи и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств» при создании и применении перспективных радиотехнических КСр Республики Казахстан.

Реализация подтверждена соответствующими актами.

Основные результаты исследований *опубликованы* в 8 научных трудах в виде: 2-х статей, в том числе в статье журнала «Авиакосмическое приборостроение», издания, рекомендованном ВАК для публикации работ соискателей научных степеней; в 4-х отчетах по НИР; докладывались и опубликованы в трудах 2-х Международных научно-технических конференций.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация объемом 110 страниц печатного текста (шрифт Times New Roman Сут, высота 14 пунктов, интервал полупетельный) состоит из введения, трех разделов, приложения, заключения и списка использованных источников – 72 наименования. Таблиц – одна, иллюстрации в виде графиков и рисунков – 12.

Во введении проведен анализ состояния практических и научных работ по оценке, обеспечению и контролю ЭМС; обоснована актуальность темы; определены цель, научная задача и методы ее решения. Изложены основные научные результаты работы, вынесенные на защиту, сформулированы их новизна, научная и практическая значимость; отмечены положения, обеспечивающие и подтверждающие достоверность и обоснованность полученных научных результатов. Представлены результаты реализации и публикации по теме диссертации, кратко характеризуется содержание работы.

В первом разделе дана характеристика группировки КСр Республики Казахстан как объекта обеспечения ЭМС; проведен обзор возможных критериев и показателей ЭМС РЭС, используемых ранее в теории ЭМС; предложены новые критерии оценки ЭМС и показатели эффективности КСр, основанные на вероятностных характеристиках выполнения целевых задач космических систем (комплексов); в соответствии с выбранной критериально-показательной базой осуществлена постановка научной задачи. Сделаны конструктивные выводы из проведенных исследований, разработана методическая схема решения поставленной научной задачи.

Проведенный анализ существующей методологии оценки, обеспечения и контроля ЭМС, основывающейся на энергетических, временных и вероятностных соотношениях конфликтующих средств, выявил ряд недостатков такой методологии.

Основные недостатки следующие:

- невозможность проведения корректных аналитических и экспериментальных оценок из-за существенного различия структуры и характеристик помех (особенно в вариантах комбинаторной смеси многочисленных сигналов и помех), отсутствия полных и достоверных сведений об ЭМО, физике воздействия помех на радиоканалы;
- критерии и показатели не содержат характеристик подавляемых сигналов КСр, что в каждом конкретном случае требует разработки частных методов;
- вероятностные показатели по определению рассчитаны на глобальное использование методологии, когда помеховых воздействий и возможных резервных ресурсов КСр достаточно много, что позволяет получать устойчивые статистические характеристики, но при использовании экспериментальных методов вынуждает проводить работы большой трудоемкости;
- традиционная методология также не учитывает того, что проведение успешных операций (сеансов связи) имеет практический смысл, когда вероятность их выполнения близка к единице, т.е. задачи ЭМС практически разрешены, за исключением некоторых неучтенных факторов (требования к вероятности выполнения задач НКУ КА «KazSat», например, заданы на уровне 0,995). Традиционная методология практически направлена на установление фактов электромагнитной несовместимости.

В основу разрабатываемых в диссертации методов ЭМС КСр предлагается положить теорию помехозащищенности как наиболее близкую по постановкам задач, имея в виду, что задачи ЭМС формулируются не как антагонистические, а как задачи, требующие нахождения компромиссов за счет использования новых технологий и резервных возможностей конфликтующих средств.

В соответствии с определением ПМЗ и ЭМС их оценка связана с использованием критерия пригодности РЭС к выполнению своих функциональных задач в условиях воздействия помех соответственно преднамеренных и непреднамеренных:

$$\bar{P} \geq \overline{P_{дон}}, \quad (1)$$

где \bar{P} – совокупность вероятностей выполнения многофункциональных задач РЭС (системы, комплекса РЭС) в условиях воздействия помех; $\overline{P_{дон}}$ – минимально допустимые уровни этих вероятностей (неравенство (1) предполагает сравнение по каждой задаче соответственно без свертки показателей).

При оценке эффективности функционирования комплекса РЭС в условиях воздействия помех определению подлежат:

- показатели в виде вероятностей

$$\bar{P} = \{ P_1, P_2, \dots, P_n \} \quad (2)$$

выполнения n задач КА (космической системы); для информационных систем, содержащих РЭС – в виде вероятностей выполнения технологических циклов (сеансов) обмена информацией;

- достаточность средств и реализуемых мер ПМЗ и ЭМС в соответствии с критерием (1);

- показатели использования ресурсов РЭС.

Исходными данными при такой оценке являются:

- состав и баллистическая структура орбитальной группировки КА;
- технологии управления КА и обмена целевой информацией;
- характеристики РЭС (бортовых и наземных) космических систем;
- характеристики электромагнитной обстановки;
- дисциплинирующие организационные принципы (правила игры, стратегии) применения конфликтующих средств.

В соответствии с критерием (1) постановка научной задачи представляется в виде разработки методов оценки вероятностей выполнения функциональных задач космических РЭС (комплексов РЭС) в условиях воздействия помех с оценкой их пригодности к функционированию по назначению.

Дано: \vec{O} – орбитальные характеристики и количество КА в космической группировке, обеспечивающих совместно с наземными средствами требования $\overline{P_{доп}}$ по выполнению функциональных задач космических РЭС по назначению; S – вариант структуры информационно-управляющего комплекса, обеспечивающей необходимые потоки обмена информацией и требуемые характеристики РЭС; \vec{T}_X – требования по технологии обмена информацией; \vec{B} – прогнозируемые или заданные характеристики подавляющих воздействий на РЭС (характеристики ЭМО); дисциплинирующие организационные принципы применения конфликтующих средств.

Определить:

- вероятности $\bar{P} = \{ P_1, P_2, \dots, P_n \}$ выполнения задач КА (космической системы)
- вероятности выполнения технологических циклов (сеансов) обмена информацией;

- достаточность средств и реализуемых мер по обеспечению ЭМС в соответствии с критерием (1);

- показатели использования ресурсов РЭС.

Удержание характеристик космических РЭС на требуемом уровне в процессе применения космических систем предполагает их контроль по критерию пригодности (1).

Во втором разделе разработана система методов оценки, обеспечения и контроля ЭМС группировки КСр и РЭС региона в общих рабочих зонах, включающая: основные предположения и ограничения; имитационную статистическую модель функционирования космических систем (комплексов) радиоэлектронных КСр и метод оценки показателей их эффективности в условиях отсутствия внешних помех или воздействия помех в виде стационарного нормального шума; расширенный критерий ЭМС радиолинии РЭС для вариантов воздействия нескольких источников помех в виде стационарных нормальных шумов; метод представления помех различных уровней и форм в виде региональных эквивалентов нормального стационарного шума, позволяющий применить разработанную модель к оценке показателей эффективности космических систем при воздействии на них помех различных структур.

В основу разработанного алгоритма имитационной статистической модели функционирования космических систем (комплексов) радиоэлектронных КСр положен типовой алгоритм (рисунок 1) имитационной статистической модели, предназначенной для оценки эффективности комплекса радиотехнических средств при управлении группировкой КА в различных условиях функционирования, созданный и совершенствующийся на протяжении многих лет на предприятиях космической отрасли России.

Алгоритм модели реализован в виде комплекса программ на языке Object Pascal 7.0 в среде Delphi 5 в виде самостоятельного Windows-приложения.

Для оценки эффективности функционирования КА (космической системы) и их средств в условиях воздействия помех, в имитационной модели должны задаваться характеристики радиоканалов, подвергшихся воздействию конкретных средств-поставщиков помех (в соответствии с характеристиками ЭМО).

В разработанной модели помехи представляются в виде стационарного нормального шума. Помеховые воздействия других структур, характерных для региона, заменяются эквивалентными шумовыми помехами.



Рисунок 1 – Алгоритм модели функционирования комплекса РЭС, обеспечивающих обмен информацией между наземными и космическими КСр в условиях воздействия непреднамеренных помех

Обоснован и представлен соответствующим выражением (3) расширенный критерий ЭМС радиолинии РЭС для вариантов воздействия нескольких источников помех, эквивалентных стационарному нормальному шуму (введенный в модель):

$$\frac{P_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРМ}} \Delta f}{\left(\frac{P_C}{N_0} \right)_{\text{ПОРОГ}}} > \sum_{i=1}^M G_{\text{ПРМ}}^{(i)} \left(\frac{D}{D_{\text{РЭП}i}} \right)^2 G_{\text{ПРД}i} \cdot \frac{P_{\text{ПРД}}^{(i)}}{K_{\text{ЭП}(i)}}, \quad (3)$$

где характеристики защищаемой РЭС: $P_{прд}$ – мощность передатчика; $G_{прд}$, $G_{прм}$ – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн соответственно; $G_{прм}^{(i)}$ – усиление приемной антенны в направлении на i -й источник помех; $\frac{\Delta f}{\left(\frac{P_c}{N_0}\right)_{порог}}$ – пороговое

отношение мощности помехи к мощности сигнала (характеристика приемника); D – дальность радиолинии; характеристики мешающих сигналов: M – количество мешающих сигналов; $P_{прд}^{(i)}$ – мощность передатчика i -го источника помех; $G_{прд}^{*}$ – усиление передающей антенны i -го источника помех в направлении на подавляемую РЭС; $D_{рэл}$ – дальность радиолинии от i -го источника помех до подавляемого приемника РЭС; $K_{ЭП(i)}$ – коэффициент эквивалентности i -й помехи.

Коэффициенты эквивалентности нормальной шумовой помехи для помех различных структур предлагается определять с помощью типовой лабораторной установки исследования характеристик чувствительности приемников радиоэлектронных КСр.

Схема такой лабораторной установки для определения нормированных эквивалентов помех различных уровней и форм в виде нормального стационарного шума представлена следующим образом (рисунок 2):



Рисунок 2 – Схема исследования характеристик ЭМС с целью определения эквивалентов для помех различных уровней и форм в виде нормального стационарного шума

Пусть на вход приемника поступает сигнал мощностью P_c из набора сигналов штатных режимов и помехи определенного типа $P_{П(i)}$, $i=1, 2, \dots, n$, из набора помеховых сигналов, характерных для исследуемого региона. Для формирования требуемого ансамбля помех необходима разработка специального генератора помех или использование соответствующих устройств существующих помеховых РЭС региона, что не является проблематичным при условии неантогонистичных отношений пользователей РЭС. Подаваемые на вход сигналы и помехи должны перестраиваться и контролироваться по мощности в области чувствительности приемника. Приемник характеризуется чувстви-

тельностью в виде минимального уровня сигнала на его входе $P_{\text{мин}}$, достаточного для функционирования в штатных режимах в условиях воздействия собственных шумов приемника. Если мощность сигнала ниже уровня $P_{\text{мин}}$ приемник не работоспособен ни при каких помехах.

Экспериментальные исследования по определению эквивалентов на лабораторной установке проводятся в следующем порядке:

1. Мощность сигнала (вход 1) увеличивается до некоторого эталонного значения $P_{\text{ЭТАЛОН}} > P_{\text{мин}}$ (на незначительном удалении от $P_{\text{мин}}$).

2. С помощью генератора помех (вход 2) увеличивается мощность шумовых помех $P_{\text{ш}}$ в полосе приемника до уровня неработоспособности приемника в исследуемом режиме при мощности сигнала $P_{\text{ЭТАЛОН}}$. Мощность дополнительных шумов при этом определяется экспериментальным значением $P_{\text{ш}}^*$, а суммарная мощность шумов $P_{\text{ш}} = P_{\text{мин}} + P_{\text{ш}}^*$.

3. Дополнительные шумовые помехи исключаются ($P_{\text{ш}}^* = 0$). Вместо них с помощью генератора помех на вход 2 подается помеховый сигнал первого типа из ансамбля сигналов с негауссовым распределением (помеховый сигнал может быть не согласован с полезным сигналом по спектру). Средняя мощность этого сигнала увеличивается до уровня $P_{\text{П(1)}}$ неработоспособности приемника в исследуемом режиме при мощности сигнала $P_{\text{ЭТАЛОН}}$.

Поскольку эффект от воздействия шумовой помехи мощностью $P_{\text{ш}}^*$ и помехи первого типа мощностью $P_{\text{П(1)}}$ одинаков при всех прочих равных условиях, то можно сделать вывод об эквивалентности шумовой помехи мощностью $P_{\text{ш}}^*$ и помехи первого типа мощностью $P_{\text{П(1)}}$, т.е.

$$P_{\text{П(1)}} = P_{\text{ш}}^* K_{\text{Э П(1)}}, \quad (4)$$

где $K_{\text{Э П(1)}}$ – искомый коэффициент эквивалентности для помехи первого типа.

4. Проведя аналогичные экспериментальные исследования по оценке влияния всех помех, в том числе 2-го, ..., i-го, ..., n-го типа, можно получить коэффициенты эквивалентности: $K_{\text{Э ш}} = 1$, $K_{\text{Э П(1)}}$, $K_{\text{Э П(2)}}$, ..., $K_{\text{Э П(i)}}$, ..., $K_{\text{Э П(n)}}$.

Проводимые операции по определению коэффициентов эквивалентности иллюстрируются на рисунке 3.

Сформулирована и решена задача оптимизации мер по обеспечению ЭМС радиоэлектронных КСр (оптимального выбора состава режимов обеспечения ЭМС РЭС по критерию минимума приращения стоимости РЭС при заданных требованиях к вероятности выполнения сеанса связи).

Рассматривается надежностная модель комплекса РЭС, выполняющего сеанс связи с требуемой вероятностью, в виде последовательного соединения функционально необхо-

димых (для работы с группировкой КА) разнонадежных (вследствие различных условий функционирования и различной ЭМО) рассредоточенных РЭС и параллельного соединения резервных элементов в каждом средстве, интерпретируемых как различные режимы обеспечения ЭМС.

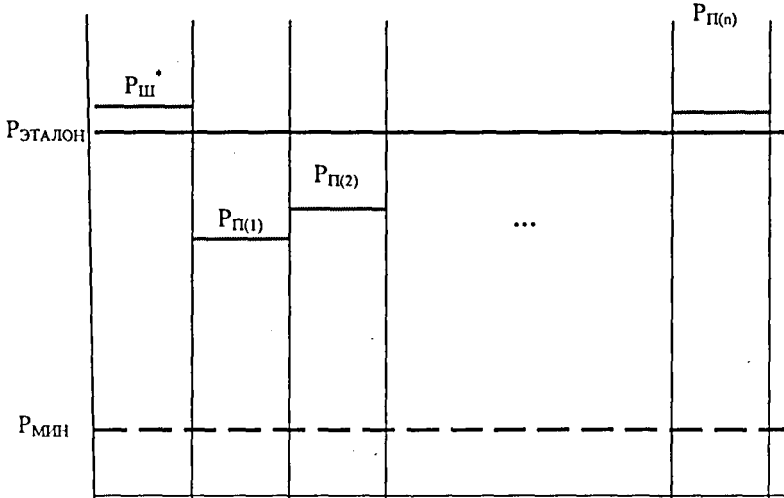


Рисунок 3 – К определению нормированных эквивалентов нормальной шумовой помехи

Вероятность выполнения сеанса связи аппроксимируется экспоненциальным законом:

$$P_c \approx \exp(-\lambda t), \quad (5)$$

где λ – интегральная интенсивность случаев невыполнения сеансов связи по причине электромагнитной несовместимости РЭС со средствами соответствующих регионов; λ_{ij} – интенсивность случаев невыполнения сеансов связи по причине электромагнитной несо-

вместимости i -й РЭС, функционирующей в j -м режиме; $\vec{\lambda}_i = (\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{ik_i})$.

Задача формулируется в оптимизационной постановке: обеспечить выполнение сеанса связи длительностью t с требуемой вероятностью P_0 при минимуме затрат на реализацию специальных режимов обеспечения ЭМС в комплексе РЭС:

$$\begin{aligned} \text{Min } \Delta C(\lambda, \vec{K}), \\ P_c(\lambda, \vec{K}) \geq P_0, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Delta C(\lambda, \vec{K})$ – суммарные затраты на обеспечение ЭМС в комплексе РЭС, \vec{K} – количество и состав режимов обеспечения ЭМС в группировках РЭС (векторное обозначение

определяет совокупность K_1, \dots, K_n). Режимы определяются как одиночные, так и комбинированные.

При условии независимости влияния на комплекс РЭС мешающих средств и аппроксимации (5) справедливо выражение:

$$P_C(\lambda t, \bar{K}) = \prod_{i=1}^n \left\langle 1 - \prod_{j=1}^{K_j} [1 - \exp(-\lambda_{ij} t)] \right\rangle. \quad (7)$$

При условиях $P_C(\lambda t, \bar{K}) \approx 1$, $\lambda_{ij} t \approx 0$ выражение (7) может быть представлено в виде:

$$P_C(\lambda t, \bar{K}) \approx \prod_{i=1}^n \left\langle 1 - \prod_{j=1}^{K_j} (\lambda_{ij} t) \right\rangle. \quad (8)$$

Для однопунктной структуры комплекса РЭС выражение (8) приобретает вид:

$$P_C(\lambda t, K) \approx 1 - \prod_{j=1}^K (\lambda_j t). \quad (9)$$

При известных значениях $\bar{\lambda}$ и ΔC_j , $j=1, 2, \dots, K$, задача сводится к поиску соответствующих комбинаций, характеризующих режимы $p_j(\Delta C_j, \lambda_j)$, $j=1, 2, \dots, K$, удовлетворяющих вариационной задаче:

$$\begin{aligned} \text{Min } \sum_{j=1}^K \Delta C_j, \\ \prod_{j=1}^K (\lambda_j t) \leq 1 - P_0. \end{aligned} \quad (10)$$

Задача (10) по выбору состава режимов является нелинейной с целочисленными и непрерывными переменными, не имеющая аналитического решения. Ее решение возможно методом перебора вариантов с выбором варианта, удовлетворяющего условию минимума стоимости.

При равных интенсивностях отказов ($\lambda_i = \lambda_j = \lambda_p$) решение не зависит от стоимости и определяется только ограничением:

$$K \approx \frac{\ln(1 - P_0)}{\ln(\lambda_p t)}. \quad (11)$$

В выражении (11) значение $\lambda_p t = 1$ не может рассматриваться как особая точка, поскольку это выражение справедливо при условии $\lambda_p t \neq 0$.

Определено количество K необходимых режимов (равноэффективных мер по обеспечению ЭМС радиоэлектронных КСр) для однопунктной структуры РЭС, воспользовавшись выражением (11). Условие равноэффективности характеристик $\lambda_i = \lambda_j = \lambda_p$ позволяет

получить приближенные оценки этих характеристик, однако при дополнительном условии $\lambda_{pt} \approx 0$ такие оценки могут быть признаны достаточными для формирования конкретных количественных требований по ЭМС.

Проведенные оценки для требований по вероятности выполнения отдельных сеансов связи $P_0=0,95$ и $P_0=0,995$ представлены в виде графиков на рисунке 4.

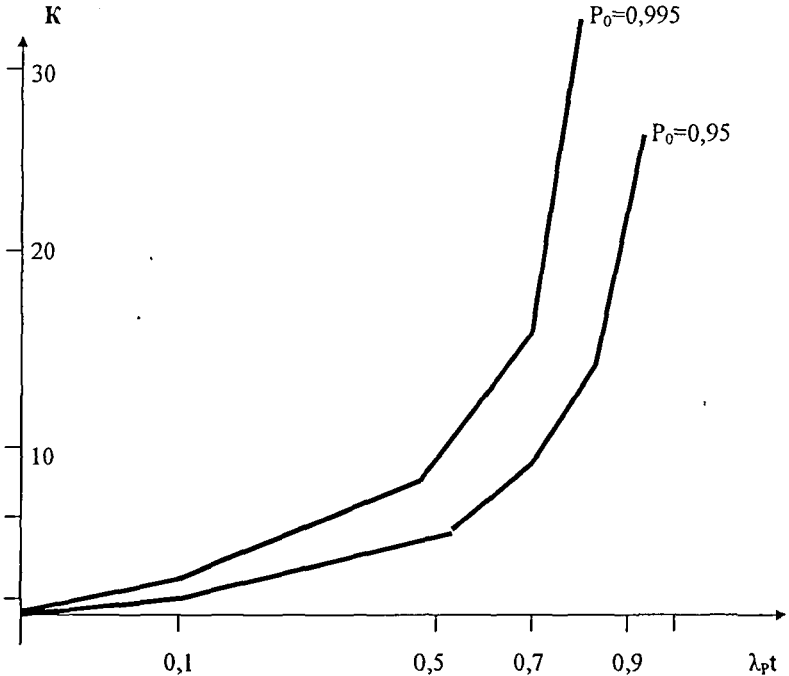


Рисунок 4 – Количество K необходимых режимов (равноэффективных мер по обеспечению ЭМС РЭС КСр) в зависимости от требований к вероятности P_0 выполнения сеанса связи и характеристики λ_{pt}

В третьем разделе проведена оценка ЭМС группировок радиоэлектронных КСр РЭС региона, разработаны требования и рекомендации по обеспечению и контролю ЭМ радиоэлектронных КСр. Полученные результаты представлены в заключении автореферта.

Приложение содержит краткое описание космического комплекса «KazSab», материалы которого использованы в диссертации.

В заключении обобщены выводы по разделам и дана краткая характеристика пол

ченных результатов (их новизны, ожидаемого эффекта от реализации). Сделан вывод о выполнении поставленных задач и достижении цели исследований.

Список использованных источников содержит работы российских и зарубежных авторов, посвященные рассматриваемым вопросам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации поставлена и решена научная задача разработки системы методов оценки, обеспечения и контроля ЭМС региональной группировки КСр, а также группировки КСр с другими РЭС региона в общих рабочих зонах.

В ходе решения научной задачи получены следующие основные научные результаты, вынесенные на защиту:

1. Критерии оценки ЭМС и показатели эффективности региональной группировки КСр; расширенный критерий ЭМС радиолинии РЭС для вариантов воздействия нескольких источников помех в виде стационарных нормальных шумов.

Проведенный анализ существующей методологии оценки, обеспечения и контроля ЭМС, основывающейся на энергетических, временных и вероятностных соотношениях конфликтующих РЭС, выявил ряд недостатков такой методологии, связанных с неполным учетом свойств космических систем.

В соответствии с определением ЭМС предложен критерий пригодности космических систем (комплексов) к выполнению своих функциональных задач в условиях воздействия непреднамеренных помех на их РЭС.

Обеспечение ЭМС определяется достаточностью средств и реализуемых мер в соответствии с критерием выполнения функциональных задач космической системой на требуемом уровне с учетом показателей использования ресурсов РЭС.

Удержание характеристик космических РЭС на требуемом уровне в процессе применения космических систем предполагает их контроль также по критерию пригодности.

В соответствии с этими выводами предложена методическая схема решения поставленной научной задачи, включающая в том числе обоснование расширенного критерия ЭМС радиолинии РЭС для вариантов воздействия нескольких источников помех.

Научная новизна полученного результата заключается в применении специфических для конкретных космических систем критериев и показателей, отражающих выполнение технологических циклов обмена информацией в соответствии с назначением систем в условиях воздействия непреднамеренных помех.

2. Модель функционирования космических систем (комплексов) РЭС КСр и метод оценки показателей их эффективности в условиях отсутствия внешних помех или воздействия помехи в виде стационарного нормального шума.

В основу разработанного алгоритма модели положен типовой алгоритм имитационной статистической модели, предназначенной для оценки эффективности комплекса радиотехнических средств при управлении группировкой КА в различных условиях функционирования, созданный и совершенствующийся организациями космической отрасли России.

Для оценки эффективности функционирования КА (космической системы) и их средств в условиях воздействия помех в имитационной модели должны задаваться характеристики радиоканалов, подвергшихся непреднамеренному воздействию конкретных средств-поставщиков помех (в соответствии с характеристиками ЭМО). Такие исходные данные в модель введены впервые.

В разработанной модели помехи представляются в виде стационарного нормального шума. Помеховые воздействия других структур, характерных для региона, заменяются эквивалентными шумовыми помехами, что также определяет повизну полученного результата.

Алгоритм модели реализован в виде комплекса программ на языке Объект Paskal 7.0 в среде Delphi 5 в виде самостоятельного Windows-приложения.

3. Метод представления помех различных уровней и форм в виде региональных эквивалентов нормального стационарного шума.

Предложен экспериментально-аналитический метод представления различных по структуре помех в виде нормированного эквивалента нормальной шумовой помехи с соответствующими коэффициентами подобия, что составляет научную новизну полученного результата и характеризуется снижением затрат по сравнению с прямыми экспериментальными исследованиями ЭМС.

Эквиваленты нормальной шумовой помехи для помех различных структур предлагается определять с помощью типовой лабораторной установки исследования характеристик чувствительности приемников РЭС КСр.

Предложен алгоритм с необходимыми иллюстративными материалами экспериментального определения нормированных эквивалентов на лабораторной установке.

Получены модифицированные выражения для критериев ЭМС с учетом коэффициентов эквивалентности для одной мешающей станции и при наличии нескольких станций.

Сформулирована и аналитически решена задача оптимизации мер по обеспечению ЭМС РЭС КСр (оптимального выбора состава режимов обеспечения ЭМС РЭС по крите-

рию минимума приращения стоимости РЭС при заданных требованиях к вероятности выполнения сеанса связи).

Разработанные методы позволяют проводить конкретные прикладные исследования по оценке влияния параметров ЭМС на показатели эффективности космических систем.

4. Оценка ЭМС группировок радиоэлектронных КСр и РЭС региона.

Из существующих радиоэлектронных КСр региона рассмотрены командно-измерительные системы типа КИС «KazSat».

4.1. Оценка ЭМС КИС «KazSat» для наземной станции и бортовой аппаратуры при воздействии на них аналогичных аппаратурных комплексов с широкополосным шумоподобным сигналом в совместном диапазоне частот позволяет сделать следующие выводы:

- по воздействию на бортовую аппаратуру КА (прямая радиолиния), находящемся на ГСО, помеховых наземных станций в процессе проведения сеанса передачи командно-программной информации:

При воздействии на КА одиночной наземной станции энергетическое превосходство радиолинии управления в широкополосном режиме составляет 59,9 дБ·Вт, в узкополосном режиме – 23,9 дБ·Вт.

Превосходство радиолинии управления теряется при одновременной работе такого количества станций в совместной зоне радиовидимости управляемого КА, создание которого представляется нереальным.

Из проведенных оценок следует вывод о полной электромагнитной совместимости наземных станций в любых комбинациях, в том числе при работе на одном частотном интервале, с вероятностью выполнения технологических циклов управления ~1.

- по воздействию на наземную станцию (обратная радиолиния), помеховых бортовых комплексов КА, находящихся на ГСО, в процессе проведения сеанса передачи ТМИ:

При воздействии на наземную станцию одиночной помехой (КА на ГСО) энергетическое превосходство радиолинии управления в широкополосном режиме составляет 23,2 дБ·Вт, в узкополосном режиме – дефицит 3,8 дБ·Вт.

Для узкополосного режима необходимо применять меры по обеспечению ЭМС, в частности, обеспечить переход в широкополосный режим.

4.2. Для системы приема телеметрической информации дополнительные потери в энергетике прямой радиолинии по сравнению с КИС составляют 7,7 дБ·Вт, обратной радиолинии – 7,3 дБ·Вт.

Система в широкополосных режимах может быть признана вполне работоспособной. В узкополосном режиме в прямой радиолинии превосходство радиолинии составляет

15,5 дБ·Вт. В обратной радиолинии дефицит в энергетике составляет 11,1 дБ·Вт.

Приведенные оценки показывают, что для узкополосного режима в обратной радиолинии функционирования системы приема телеметрической информации необходимы меры по обеспечению ЭМС.

4.3. Оценка ЭМС группировок радиоэлектронных КСр и РЭС региона с использованием эквивалентов помех в виде нормального стационарного шума.

Рассмотрен вариант мешающих воздействий на бортовую аппаратуру КИС «KazSat» составом разнотипных РЭС региона, одновременно функционирующих в одном диапазоне частот. Отбор одновременно функционирующих РЭС с оценкой показателей выполнения функциональных задач КИС осуществлялся на статистической имитационной модели с учетом вероятностей нахождения РЭС во включенном состоянии. Приведены оценки для одной реализации при следующих исходных данных:

Состав мешающих средств:

- НС «КИС KazSat» – 7 комплектов;
- центральная земная станция (ЦЗС) спутниковой связи – 1 комплект, тип сигнала – непрерывный (цифровой), по ширине спектра не согласован (ширина спектра 500 МГц); мощность передатчика 400 Вт, коэффициент усиления антенны 57 дБ (главный лепесток);
- земные станции (ЗС) первого класса – 100 комплектов, тип сигнала аналогичен ЦЗС, эффективная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) – 95 дБ·Вт; второго класса – 1000 комплектов, ЭИИМ – 45 дБ·Вт (земные станции главным лепестком направлены на спутник-ретранслятор).

Эквиваленты нормальному стационарному шуму сигналов мешающих средств: НС КИС – 1; ЗС всех типов – 62,5.

Расчеты показали, что эквивалентная суммарная мощность в виде нормального стационарного шума на входе бортового приемника КИС составляет 84 дБ·Вт. Запас в энергетике в широкополосном режиме 8 дБ·Вт, в узкополосном – дефицит в энергетике 28 дБ·Вт.

Узкополосный режим в рассматриваемом комплексе средств неработоспособен, что требует использования либо только широкополосного режима, либо временного разделения каналов в ЗС связи с увеличением коэффициентов эквивалентности связанных каналов более, чем на 28 дБ.

5. Требования и рекомендации по обеспечению и контролю ЭМС радиоэлектронных КСр.

Проведены оценки необходимого количества реализуемых мер обеспечения ЭМС для требований по вероятности выполнения отдельных сеансов связи $P_0=0,95$ и $P_0=0,995$ и

средней интенсивности λ_p случаев невыполнения сеансов связи по причине электромагнитной несовместимости РЭС, функционирующей в каждом режиме обеспечения ЭМС.

Реально реализуемые меры по обеспечению ЭМС радиоэлектронных КСр могут быть представлены следующим перечнем:

- повышение ЭИИМ радиолиний;
- расширение полос используемых частот, в частности, использование сложных сигналов и широкополосного (широкобазового) кодирования сигналов;
- использование высоконаправленных наземных и бортовых антенн;
- снижение уровня бокового и заднего излучения антенн, в частности «обнуление» коэффициента направленности антенны в направлении прихода эффективной помехи (режекция помехи); временная режекция импульсных помех; частотная режекция узкополосных помех;
- расширение диапазона скоростей передачи информации, в том числе внедрение режимов со сверхкороткими сеансами связи и управления КА (но с сигналами большей мощности), обеспечивающими уклонение от помех во времени;
- использование областей пространства для проведения сеансов управления КА с приемлемыми характеристиками ЭМО;
- внедрение беззапросных режимов измерения текущих навигационных параметров КА и передачи информации без квитирования (с задержкой квитирования) и синхронизации по обратному каналу;
- введение избыточности (для обеспечения надежности) в комплекс КСр по составу и его топологической структуре;
- технические и организационные меры по предотвращению возможности применения в группировке РЭС эффективных мешающих источников помех, в том числе имитационных при обеспечении требований по аутентификации информации;
- контроль ЭМО.

Сопоставляя возможное количество мер и полученные оценки, можно сделать вывод о диапазоне приемлемых значений произведения λ_{pt} менее $\sim 0,5$. При нормативной длительности t сеанса связи 10 мин. требование к средней интенсивности случаев невыполнения сеансов связи по причине электромагнитной несовместимости РЭС, функционирующей в каждом режиме обеспечения ЭМС, может быть оценено значениями $\lambda_p \leq 5 \cdot 10^{-2} \text{ мин.}^{-1}$.

Требованиями к современным КИС режим контроля ЭМО не предусмотрен и осуществляется другими средствами. Контроль ЭМО может быть реализован методами частотно-энергетической и пространственной селекции помех.

Наиболее проблематичной в этом плане является пространственная селекция (пенгенция) наземных источников помех: с помощью бортовых высоконаправленных антенн или фазовых многоспутниковых измерителей.

Целесообразность реализации режимов контроля ЭМО для радиолиний КИС определяется конкретными условиями их функционирования.

Полученные результаты и достигнутый эффект (возможность выполнения сеанса связи с вероятностью $\sim 0,995$ в условиях воздействия разнородных мешающих факторов; снижение затрат при использовании разработанного метода представления помех различных уровней и форм в виде региональных эквивалентов нормального стационарного шума по сравнению с прямыми экспериментальными исследования ЭМС) позволяют сделать вывод о достижении цели диссертации.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Мурзакулов Г. и др. База разрешений на использование радиочастотного спектра (RS Base). Республика Казахстан, г. Астана. 2001.
2. Мурзакулов Г., Кашеев Н.А. Методика оценки вероятности выполнения суточного технологического цикла управления КА «KazSat» по результатам летных испытаний. В отчете ГКНПЦ им. М.В.Хруничева, 2005. – 7 с.
3. Мурзакулов Г., Кашеев Н.А. Оценка вероятности выполнения суточного технологического цикла управления КА «KazSat» по результатам летных испытаний. В отчете ГКНПЦ им. М.В.Хруничева по летным испытаниям КА «KazSat», 2006. – 5 с.
4. Мурзакулов Г., Лефтер В.Д., Абдрахманов М.К. Методы оценки, обеспечения и контроля электромагнитной совместимости группировки космических средств и радиоэлектронных средств региона в общих рабочих зонах. / Авиакосмическое приборостроение. /, № 4, 2009 – 10 с.
5. Мурзакулов Г. Методы обеспечения и контроля электромагнитной совместимости республиканских космических средств и других радиоэлектронных средств в их общих рабочих зонах. Первая совместная научная конференция Международной академии астронавтики и Российской академии космонавтики «Космос для человечества», 2008, - 1 с.
6. Мурзакулов Г., Кашеев Н.А., Чаплинский В.С. Радиотехнические многофункциональные системы связи и управления космическими аппаратами. В сборнике трудов ГКНПЦ им. М.В. Хруничева. 2008. – 7 с.
7. Мурзакулов Г. и др. Отчет по измерениям параметров земных станций спутниковой связи. ТОО «MD-SatCom». Астана, Казахстан, 2008. – 5 с.
8. Мурзакулов Г., Урличич Ю.М. и др. Развитие наземного комплекса управления космическим аппаратом «KazSat». ФГУП «РНИИ космического приборостроения». АО «Республиканский центр космической связи и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств». Труды международной конференции, посвященной итогам выполнения Государственной программы «Развитие космической деятельности в Республике Казахстан на 2005-2007 годы». 27-28 сентября 2007 г. – 3 с.