

На правах рукописи



ВАЖЕНИН Николай Афанасьевич

**«ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОСИСТЕМ КОСМИЧЕСКОЙ
СВЯЗИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ»**

05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

05.07.05 - Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 2017

Работа выполнена на кафедре 408 «Инфокоммуникации» и в НИИ прикладной механики и электродинамики ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (НИИ ПМЭ МАИ).

Научный консультант:

доктор технических наук, доцент Плохих Андрей Павлович, ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики, заместитель директора.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Шахтарин Борис Ильич, ФГБОУВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Автономные информационные и управляющие системы».

доктор физико-математических наук, профессор Надеев Адель Фирадович, ФГБОУВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», Институт радиоэлектроники и телекоммуникаций, директор.

доктор технических наук Семёнкин Александр Вениаминович, ГНЦ РФ ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», заместитель генерального директора по космическим аппаратам и энергетике.

Ведущая организация:

АО «Российские космические системы», 111250, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 53.

Защита диссертации состоится «19» декабря 2017 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д.212.125.03 Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <https://mai.ru/> и в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просьба направлять по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, МАИ, Ученый совет МАИ.

Автореферат разослан « » _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д.212.125.03

д.т.н., с.н.с.



М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Накопление и совершенствование научных знаний о Земле и космическом пространстве, предоставление услуг в интересах социально-экономической сферы, науки и международного сотрудничества, создание научно-технического задела для перспективных космических комплексов и систем являются одними из приоритетных целей государственной политики России в области космической деятельности.

Важная роль в решении данных задач отводится электроракетным двигательным установкам (ЭРДУ) на базе электрических ракетных двигателей (ЭРД), которые уже длительное время используются и хорошо зарекомендовали себя при управлении ориентацией, коррекции орбит, довыведении космических аппаратов (КА) в околоземном пространстве и в качестве маршевых двигателей в программах исследования дальнего космоса. При этом дальнейшее развитие ЭРД ожидается в направлении увеличения их мощности, использования в многоразовых межорбитальных космических буксирах, а в перспективе - и межпланетных буксирах с мощными энергодвигательными установками.

Актуальность темы исследования

При реализации проектов с использованием ЭРД необходимо учитывать, что они являются источниками электромагнитного излучения в радиодиапазоне, которое имеет шумоподобный характер и недостаточно изученную спектрально-временную структуру и оказывает электродинамическое воздействие на бортовые радиосистемы КА. При определенных условиях это может существенно повлиять на энергетический потенциал и характеристики помехоустойчивости радиолиний, в особенности при проектировании систем радиосвязи с КА дальнего космоса.

В связи с этим актуальным является решение научно-технической проблемы повышения помехоустойчивости радиосистем космической связи, функционирующих в условиях воздействия радиоизлучения, возникающего при работе ЭРД, в частности таких отработанных и широко распространенных на практике, как стационарные плазменные двигатели (СПД), на основе результатов экспериментального определения характеристик их излучения в наземных условиях.

Степень разработанности темы диссертации

Большой вклад в развитие теории и техники, а также во внедрение ЭРД в космическую технику внесли многие отечественные и зарубежные ученые и инженеры, начиная с таких пионеров практической разработки ЭРД как В.П. Глушко, А.В. Жаринов, А.И. Морозов, Г.А. Попов, В.П. Ким, E. Stuhlinger, H.R. Kaufman, H.W. Loeb и др.

Экспериментальному изучению и теоретическому анализу характеристик излучения ЭРД в радиодиапазоне посвящены работы таких ученых, как E.J. Beiting, J.E. Pollard, D.H. Manzella, J.M. Sankovic, C.J. Sanniento, K. Nishiyama, Y. Shimizu, I. Funaki, H. Kuninaka, K. Toki, Г.Г. Шишкин, К.П. Кирдяшев, А.П. Плохих и др.

Несмотря на то, что экспериментальному изучению и анализу характеристик собственного излучения ЭРД в радиодиапазоне посвящено достаточно большое количество публикаций, в основном они носят локальный характер и ограничиваются частными случаями измерений. С учетом сложной спектрально-временной структуры излучения и его индивидуального характера для различных типов ЭРД, опубликованные результаты не могут

напрямую быть использованы для обобщенного анализа влияния этого излучения на функционирование радиосистем космической связи (РСКС). Кроме того, анализ помехоустойчивости РСКС с учетом наличия импульсной компоненты и негауссовского закона распределения помехи представляет собой достаточно сложную математическую задачу.

В целом вопросам анализа воздействия негауссовских помех на характеристики помехоустойчивости радиосистем передачи информации посвящено большое количество работ зарубежных и отечественных авторов, среди которых следует отметить работы таких исследователей, как D. Middleton, P.A. Bello, R.A. Esposito, A.D. Spaulding, S. Miyamoto, M. Katayama, N. Morinaga, B. Shepelavey, В.С. Понкратов, О.Е. Антонов и др. Однако, полученные в них конечные аналитические результаты, как правило, соответствуют некоторым асимптотическим условиям, которые во многих случаях для реальных режимов работы ЭРД не выполняются.

Таким образом, в настоящее время отсутствуют адекватные математические модели излучения ЭРД, основанные на учете тонкой спектрально-временной структуры излучения ЭРД, а также систематический анализ и количественные оценки влияния этого излучения на достоверность передачи информации и помехоустойчивость радиосистем космической связи.

Цель диссертационной работы и решаемые научно-технические задачи

Целью работы является повышение эффективности функционирования РСКС при воздействии радиоизлучения стационарных плазменных двигателей на основе разработки научно-методической базы и проведения экспериментальных исследований характеристик излучения СПД в радиодиапазоне, разработки математических и имитационных моделей этого излучения и проведения исследования его влияния на характеристики помехоустойчивости РСКС.

Для достижения указанной цели и научно-методического обеспечения проектирования РСКС перспективных КА, оборудованных ЭРД, необходимо решение следующих научно-технических задач:

- экспериментальное исследование спектрально-временной структуры собственного электромагнитного излучения ЭРД в радиодиапазоне;
- разработка на основе результатов экспериментальных исследований феноменологических математических и имитационных моделей собственного излучения ЭРД в радиодиапазоне для их дальнейшего использования при проектировании радиосистем космической связи;
- разработка математических и имитационных моделей радиосистем космической связи, исследование их характеристик помехоустойчивости в условиях воздействия излучения ЭРД;
- анализ и количественная оценка влияния излучения ЭРД в радиодиапазоне на характеристики помехоустойчивости радиосистем космической связи для различных типов РСКС и ЭРД;
- разработка и исследование методов борьбы с негативным влиянием излучения ЭРД в радиодиапазоне на характеристики помехоустойчивости РСКС.

Методология и методы исследования заключаются в комбинированном использовании экспериментальных методов исследования, расчетно-теоретических методов при разработке математических моделей систем и процессов и методов имитационного моделирования на

ЭВМ. В работе использовался математический аппарат теории электрической связи, математического анализа, теории вероятностей и математической статистики.

Программная реализация алгоритмов управления измерительным комплексом, сбора и обработки данных при проведении экспериментальных исследований, имитационного моделирования излучения ЭРД в радиодиапазоне и функционирования РСКС осуществлялась в среде MATLAB/Simulink (лицензия 874554).

Объектом исследования являются функционирующие совместно радиосистемы космической связи и электрические ракетные двигатели типа СПД.

Предметом исследования являются методы экспериментальных измерений собственного излучения ЭРД типа СПД в радиодиапазоне, характеристики, математические и имитационные модели этого излучения, математические и имитационные модели радиосистем космической связи, функционирующих в условиях совместного воздействия теплового шума и излучения ЭРД, и характеристики их помехоустойчивости.

Научная новизна полученных в работе результатов заключается в следующем:

1. Разработаны и апробированы принципы построения экспериментальных стендов для исследования собственного радиоизлучения ЭРД в наземных условиях, которые реализованы при создании многофункционального экспериментального стенда НИИ ПМЭ МАИ, позволяющего исследовать помехоэмиссию различных типов ЭРД мощностью до 20 кВт.

2. Разработан комплекс методов, математических моделей, аппаратно-программных и программно-алгоритмических средств, а также технических решений для экспериментального исследования характеристик радиоизлучения стационарных плазменных двигателей в наземных условиях и анализа влияния этого излучения на помехоустойчивость радиосистем космической связи с КА, оснащенными ЭРД, позволивший впервые получить количественные оценки помехоустойчивости в этих условиях и разработать методы ее повышения.

3. Экспериментально установлено, что радиоизлучение СПД, кроме тепловой компоненты, может иметь выраженную импульсную компоненту, представляющую собой случайную последовательность широкополосных радиоимпульсов. Статистические и энергетические характеристики этой последовательности зависят от типа СПД, режима его работы и рассматриваемого частотного диапазона.

4. Экспериментально определена спектрально-временная структура и параметры излучения СПД в радиодиапазоне, на основе проведенных экспериментальных исследований и их статистической обработки сформирована информационная база данных спектрально-временных характеристик радиоизлучения для различных типов СПД и их интегральных параметров, необходимая для разработки и реализации математических и имитационных моделей такого излучения.

5. Разработана и апробирована методика обработки результатов экспериментальных измерений для определения характеристик структурных составляющих излучения СПД в радиодиапазоне, включающих тепловую и нетепловую компоненты излучения, и их количественных параметров.

6. Исследовано влияние на характеристики излучения СПД его функциональных и конструктивных элементов. Установлено, что электродинамические процессы в катодо-компенсаторе на основе полого катода являются одной из причин возникновения нетеплового

излучения СПД в радиодиапазоне. Показано, что результаты измерения текущих параметров радиоизлучения СПД могут быть использованы для контроля состояния и оптимизации параметров работы СПД.

7. Разработаны и апробированы обобщенные математические модели излучения СПД в радиодиапазоне: на основе модифицированной модели Фурутсу-Ишида и на основе моделей Холла и стробированного гауссовского шума. Для их реализации разработаны методы и алгоритмы имитационного моделирования радиоизлучения СПД, позволяющие создавать программные и аппаратные имитаторы радиоизлучения СПД, которые могут быть использованы как для исследования помехоустойчивости радиосистем космической связи, так и при проведении наземных испытаний бортового оборудования КА.

8. Проведено и апробировано обобщение модели Миддлтона класса А при совместном воздействии белого гауссовского шума и случайных импульсных помех для асимптотического случая импульсной помехи с длительностью импульса много меньше длительности канального символа для анализа помехоустойчивости РСКС в условиях воздействия радиоизлучения СПД.

9. Впервые для типовых методов фазовой и амплитудно-фазовой модуляции ФМн-2, ФМн-4, ФМн-8, ФМн-16, КАМ-16, КАМ-64, используемых в РСКС, получены количественные оценки зависимости вероятности битовой ошибки и энергетического проигрыша радиосистем космической связи от отношения сигнал-шум, отношения сигнал-импульсная помеха и временных параметров импульсного излучения используемых и перспективных моделей СПД.

10. Разработаны новые методы и алгоритмы их реализации для борьбы с влиянием импульсной составляющей излучения СПД, основанные на адаптивном выделении и квадратурной компенсации таких помех. По сравнению с типовым алгоритмом ШОУ («широкая полоса – ограничитель – узкая полоса»), предложенные методы обеспечивают энергетический выигрыш от 1.5 до 5 дБ.

11. Для оптимизации работы квадратурного компенсатора импульсных помех разработаны новые алгоритмы оценки текущего отношения сигнал-шум в условиях воздействия импульсных помех, которые являются работоспособными в широком диапазоне отношений сигнал-шум и сигнал-импульсная помеха, а при отношении сигнал-шум более 5 дБ обеспечивают точность оценки не хуже 10...20%.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что:

1. Разработан и апробирован уникальный многофункциональный экспериментальный стенд НИИ ПМЭ МАИ для исследования собственного радиоизлучения ЭРД в наземных условиях, включающий в себя «радиопрозрачный» вакуумный отсек с исследуемым ЭРД, интегрированный в подвижную безэховую камеру, оснащенную автоматизированным комплексом измерения излучения в радиодиапазоне, соединенный с основной вакуумной камерой, снабженной системой откачки, воспроизводящей условия космического пространства, позволяющий исследовать помехоэмиссию различных типов ЭРД мощностью до 20 кВт.

2. Разработан комплекс методов, математических моделей, аппаратно-программных, программно-алгоритмических средств и технических решений, основанный на использовании многофункционального экспериментального стенда НИИ ПМЭ МАИ, позволяющий проводить экспериментальные исследования и измерения характеристик радиоизлучения электрических

ракетных двигателей в наземных условиях и на этой основе получать оценки помехоустойчивости радиосистем космической связи и разрабатывать методы ее повышения.

3. Исследованы спектрально-временные характеристики радиоизлучения моделей ЭРД (СПД-70, СПД-100, СПД-140, ВЧИД-10, АИПД-50) для различных режимов работы. Экспериментально показано, что минимальный уровень излучения обеспечивается при номинальных режимах работы СПД, а переход к высоковольтным режимам и увеличение расхода рабочего тела могут приводить к увеличению уровня излучения на 10 и более децибел, что необходимо учитывать при проектировании КА, оснащенных ЭРД.

4. Экспериментально установлено, что во временной области излучение СПД состоит из двух компонент, одна из которых представляет собой тепловой шум, а вторая имеет выраженный импульсный характер. Обе компоненты существенно зависят от режима работы СПД. Показано, что закон распределения мгновенных значений излучения СПД является негауссовым, а распределение амплитуды существенно отличается от рэлеевского. Определены и проанализированы статистические характеристики радиоизлучения СПД, что позволяет разрабатывать математические модели нового класса помех, источником которых является СПД.

5. Экспериментально установлено, что на спектральные и временные характеристики излучения СПД может оказывать существенное влияние длительность его временной наработки. Так, например, на частоте 2 ГГц уровни излучения «нового» и «изношенного» на 85% образца СПД могут отличаться на 10 дБ, что необходимо учитывать при расчете энергетического потенциала радиолинии космической связи.

6. Экспериментально показано, что при одновременной работе нескольких СПД из-за взаимного влияния плазменных струй увеличение суммарной интенсивности излучения происходит не пропорционально числу работающих двигателей, что необходимо учитывать при проектировании радиосистем связи с КА, оснащенных кластерами СПД.

7. Разработан имитатор радиоизлучения стационарных плазменных двигателей, алгоритм работы которого базируется на разработанных математических и имитационных моделях радиоизлучения СПД. Имитатор позволяет обеспечить проведение как комплексных наземных испытаний КА, так и исследование влияния излучения СПД на помехоустойчивость конкретных радиосистем космической связи.

8. Впервые получены и исследованы количественные оценки помехоустойчивости радиосистем космической связи в условиях воздействия радиоизлучения стационарных плазменных двигателей, позволяющие принимать обоснованные технические решения при проектировании и выборе параметров радиосистем космической связи. Показано, что при отношении сигнал-импульсная помеха больше 30 дБ и отношении сигнал-шум до 10...16 дБ энергетический проигрыш из-за влияния излучения СПД не превышает 1 дБ, а при отношении сигнал-импульсная помеха менее 20 дБ, что характерно для радиосистем дальней космической связи, может достигать величины от 2 до 12 дБ в зависимости от используемого метода модуляции.

9. Предложены новые методы, алгоритмы и пути их технической реализации для борьбы с импульсными помехами, создаваемыми излучением ЭРД. Проведенные исследования их эффективности показали, что выигрыш по сравнению с алгоритмом ШОУ по вероятности

битовой ошибки может достигать 3.3...4.5 раз, а энергетический выигрыш может быть равен 1.5...5 дБ, в зависимости от отношений сигнал-импульсная помеха и сигнал-шум.

10. Для оптимизации работы квадратурного компенсатора импульсных помех СПД предложены и исследованы новые методы и алгоритмы оценки текущего отношения сигнал-шум в условиях воздействия радиоизлучения стационарных плазменных двигателей, работоспособные в широком диапазоне отношений сигнал-шум и сигнал-импульсная помеха.

11. Разработанные методы, математические модели и алгоритмы доведены до реализации в виде аппаратно-программных и программно-алгоритмических комплексов, которые могут быть использованы в инженерной практике при проектировании радиосистем космической связи и передачи данных, функционирующих в условиях воздействия радиоизлучения ЭРД.

Реализация и внедрение результатов работы

Полученные экспериментальные, теоретические, методические и практические результаты диссертационной работы использовались при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в частности, с ОАО «ИСС им. акад. М.Ф. Решетнева», ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», ФГУП «ЦНИИмаш», МНИИПУ, НИИ ПМЭ МАИ, а также в учебном процессе ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». Внедрение результатов диссертационной работы подтверждается соответствующими актами.

На защиту выносятся:

1. Комплекс методов, математических моделей, аппаратно-программных, программно-алгоритмических средств и технических решений, основанный на использовании разработанного комбинированного экспериментального стенда, включающего в себя «радиопрозрачный» вакуумный отсек с исследуемым ЭРД, интегрированный в мобильную безэховую камеру, оснащенную средствами измерения излучения в радиодиапазоне, и соединенный с основной вакуумной камерой, снабженной системой откачки, воспроизводящей условия космического пространства, позволяющий проводить экспериментальные исследования и измерения характеристик радиоизлучения электрических ракетных двигателей в наземных условиях.

2. Результаты экспериментальных измерений и статистического анализа спектрально-временных и энергетических характеристик радиоизлучения стационарных плазменных двигателей, подтверждающие, что:

- во временной области излучение СПД состоит из двух компонент, одна из которых представляет собой тепловой шум, а вторая - случайную последовательность импульсов с внутриимпульсной амплитудно-частотной модуляцией, с параметрами, зависящими от типа СПД, режима его работы и рассматриваемого частотного диапазона;

- при переходе от номинальных режимов работы к высоковольтным уровень спектральных составляющих излучения ЭРД существенно возрастает, например, в диапазоне 0.8...7 ГГц от 2 до 20 дБ, в зависимости от типа ЭРД и режима его работы. Изменение расхода рабочего тела также оказывает существенное влияние (до 10...20 дБ) на интенсивность радиоизлучения в диапазоне частот 1...9 ГГц;

- энергетический уровень и спектрально-временные характеристики излучения СПД зависят от величины его временной наработки: так, на частоте 2 ГГц уровень излучения «изношенного» на 85% образца СПД по отношению к «новому» может увеличиться на 10 дБ;

- при одновременной работе нескольких СПД увеличение суммарной интенсивности излучения происходит не пропорционально числу работающих двигателей, что связано с взаимным экранированием излучения плазменными струями и ослаблением сигналов в плазменной среде.

- в стационарных плазменных двигателях процессы в катоде-компенсаторе на основе полого катода являются одной из причин возникновения импульсного излучения в радиодиапазоне.

3. Разработанные на основе результатов экспериментальных измерений математические и имитационные модели излучения СПД, обеспечивающие количественную оценку помехоустойчивости радиосистем космической связи в условиях воздействия радиоизлучения стационарных плазменных двигателей и создание имитаторов радиоизлучения СПД для проведения комплексных испытаний КА в наземных условиях.

4. Разработанные методика и программно-алгоритмические средства для оценки помехоустойчивости радиосистем связи, функционирующих в условиях воздействия радиоизлучения СПД, позволяющие определить величину энергетического проигрыша радиосистем связи как функцию отношений сигнал-шум, сигнал-импульсная помеха и временных параметров импульсной помехи. При этом энергетический проигрыш при отношении сигнал-импульсная помеха больше 30 дБ и отношении сигнал-шум до 10...16 дБ не превышает 1 дБ, а при отношении сигнал-импульсная помеха менее 20 дБ может достигать величины от 2 до 12 дБ в зависимости от используемого метода модуляции.

5. Разработанные алгоритмы реализации квадратурного компенсатора импульсных помех, обеспечивающие выигрыш по вероятности битовой ошибки при оптимальных значениях порогов, отношении сигнал-шум 10 дБ и отношении сигнал-импульсная помеха 0 и 5 дБ по сравнению с квадратурным ограничителем импульсных помех (ШОУ) 4.5 и 3.3 раз соответственно, а энергетический выигрыш по сравнению с ШОУ при отношении сигнал-шум от 12 дБ и ниже от 1.5 дБ при отношении сигнал-импульсная помеха 10 дБ ($BER=8 \cdot 10^{-4}$) до 5 дБ при отношении сигнал-импульсная помеха 0 дБ ($BER=1.5 \cdot 10^{-2}$).

6. Разработанные для оптимизации работы квадратурного компенсатора импульсных помех алгоритмы оценки текущего отношения сигнал-шум в условиях воздействия импульсных помех, являющиеся работоспособными в широком диапазоне отношений сигнал-шум (-10 дБ ... 30 дБ), а при отношении сигнал-шум более 5 дБ и отношении сигнал-импульсная помеха от 0 дБ до 30 дБ обеспечивающие точность оценки не хуже 10...20%.

Достоверность результатов работы обеспечивается:

- корректным использованием методов теории вероятностей и математической статистики;

- строгим использованием математического аппарата для всех полученных научных результатов, соответствием в определенных случаях полученных результатов результатам других авторов, опубликованным в отечественной и зарубежной литературе;

– масштабной экспериментальной проверкой предложенных математических моделей и совпадением в частных случаях результатов имитационного моделирования на ЭВМ с известными аналитическими решениями;

- использованием измерительных средств и оборудования, прошедших своевременную поверку и метрологическую аттестацию.

Апробация результатов работы

Результаты исследований докладывались и обсуждались на 30 международных и всероссийских научно-технических конференциях: 25, 27, 32, 33, 34 International Electric Propulsion Conference (1997,2001,2011,2013,2015); The Second World Space Congress, International Astronautical Federation (IAF) (Houston, TX, USA, 10-19 October 2002); The 2004 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC2004) (Sendai/Matsushima, Miyagi-Pref., JAPAN July 6-8, 2004); 9, 10 Российские научно-технические конференции «Электромагнитная совместимость технических средств и электромагнитная безопасность»; 6, 7, 13 Международные конференции "Авиация и космонавтика" (Москва, 2007, 2008, 2014); 37th COSPAR Scientific Assembly 2008. (Montreal, Canada, 13-20 July, 2008); XXIX General Assembly of the International Union of Radio Science. Union Radio Scientific International (URSI). (Chicago, Illinois, USA, August 07-16, 2008); 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. EMC Zurich 2009. (ETH Zurich, Switzerland. 12-16 January, 2009); 8, 9 Международные Симпозиумы по радиационной плазмодинамике. (Москва, 2009, 2012); Международный симпозиум и выставка по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. ЭМС-2011. (Санкт-Петербург, Россия, 13–16 сентября, 2011); 29th International Symposium on Space Technology and Science (29th ISTS). (Nagoya-Aichi, Japan, June 2-9, 2013); 5th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application "Electric Propulsion - New Challenges". (Dresden, Germany, 7-12 Sep, 2014); ВНТК "Системы связи и радионавигации". (Красноярск, 2014,2016); Международная научно-техническая конференция "Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях" "СИНХРОИНФО 2016". (Самара, 2016); The 6th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application. (Samara, 28 August - 2 September, 2016); VI Всероссийская научно-техническая конференция "Электромагнитная совместимость" (Москва, 18-19 Мая 2017).

Публикации по теме диссертации

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 66 работах, из них – 1 монография, 1 учебное пособие с грифом Минобрнауки, 24 статьи, в том числе 22 - в изданиях из списка ВАК Минобрнауки России, из них 8 - в изданиях, входящих в системы Scopus и Web of Science, сделано 30 докладов на международных и всероссийских конференциях, 9 работ опубликовано без соавторов, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2 патента РФ на полезную модель, 2 патента РФ, 3 патента США и 1 патент ЕС на изобретение.

Личный вклад автора

Работа является результатом исследований, проводимых автором с 1995 года по настоящее время.

При разработке и создании экспериментального многофункционального стенда НИИ ПМЭ МАИ для исследования собственного радиоизлучения ЭРД в наземных условиях автор принимал участие в разработке принципов построения и путей технической реализации стенда. Им лично разработан и апробирован комплекс методов, математических моделей, аппаратно-программных и программно-алгоритмических средств и технических решений для автоматизированного измерительного комплекса, обеспечивающего экспериментальные измерения, обработку результатов и анализ характеристик радиоизлучения стационарных плазменных двигателей в наземных условиях,

Им также лично разработаны методики, математические и имитационные модели излучения СПД в радиодиапазоне, программно-алгоритмические средства для имитационного моделирования такого излучения, математические модели и программно-алгоритмические средства для имитационного моделирования воздействия излучения СПД на РСКС, получены и проанализированы количественные оценки достоверности передачи информации в РСКС, функционирующих в условиях воздействия излучения СПД, исследовано влияние этого излучения на достоверность передачи информации и величину энергетического проигрыша для различных методов модуляции, разработаны и исследованы методы компенсации деструктивного воздействия излучения СПД, предложены новые методы измерения текущих значений отношения сигнал-шум, в том числе и при воздействии радиоизлучения СПД.

Постановка и проведение ряда экспериментальных измерений выполнена совместно с научным консультантом Плохих А.П. Часть результатов получена вместе с Волковским А.С., Плохих А.П., Серкиным Ф.Б. и др. В работах, опубликованных в соавторстве, соискатель предложил методы решения задач, разработал методики и программно-алгоритмические средства обработки результатов экспериментов, математические модели, алгоритмы моделирования и программную реализацию основных моделей, провел анализ и интерпретацию полученных результатов.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, восьми глав, заключения, списка использованных источников и 3 приложений, содержит 256 рисунков, 191 формулу, 19 таблиц. Объем работы 385 страниц. Список использованных источников содержит 264 наименования.

Соответствие работы паспорту специальности

Работа соответствует паспорту специальности 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения», пункт 4 «Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки радиосигналов в радиосистемах телевидения и связи при наличии помех. Разработка методов разрушения и защиты информации», пункт 6 «Исследование и разработка радиотехнических систем и устройств передачи информации, в том числе радиорелейных и телеметрических, с целью повышения их пропускной способности и помехозащищенности».

Работа соответствует также паспорту специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», пункт 2 «Характеристики тепловых, электроракетных двигателей летательных аппаратов и их энергетических установок, отдельных узлов и систем при различных условиях их использования», пункт 10 «Методы испытания двигателей, их элементов и агрегатов, системы

автоматизированного сбора, обработки и анализа экспериментальных данных, включая комплексную автоматизацию стендовых испытаний».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, определены цель работы и решаемые научно-технические задачи. Приведены научная новизна и практическая ценность работы, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ особенностей и основных направлений использования ЭРД в задачах освоения ближнего и дальнего космоса, дано систематизированное описание типов ЭРД, принципов их функционирования, основных характеристик и тенденций развития.

Проанализированы виды воздействия ЭРД на радиосистемы КА и выделены основные факторы, влияющие на качество функционирования РСКС, к которым относятся:

- влияние собственного электромагнитного излучения ЭРД в радиодиапазоне, имеющего сложную спектрально-временную структуру и занимающего спектральный диапазон от десятков МГц до десятков ГГц, на характеристики бортовых приемных систем космической связи;

- влияние электрофизических характеристик плазменных струй ЭРД на характеристики, в частности на диаграммы направленности, приемо-передающих антенных систем КА;

- влияние плазменных струй ЭРД на изменение условий прохождения электромагнитных волн на трассе распространения, приводящих к амплитудным и фазовым искажениям радиосигнала, поляризационным искажениям и т.п.



Рисунок 1 – Экспериментальная установка НИИ ПМЭ МАИ

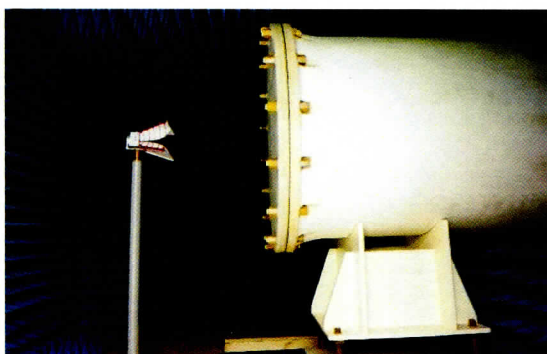


Рисунок 2 – Диэлектрический цилиндр в безэховой камере

Проведен анализ РСКС ближнего и дальнего космоса, определены и систематизированы их основные характеристики и параметры, такие как: диапазоны используемых частот, методы модуляции и кодирования, энергетические характеристики и т.п., необходимые для последующего анализа помехоустойчивости РСКС. Показано, что используемые современными и перспективными РСКС диапазоны частот, например, такие как L (1...2 ГГц), S (2...4 ГГц), C (4...8 ГГц), X (8...12 ГГц), могут попадать в области интенсивного радиоизлучения ЭРД.

На основе проведенного анализа сформулирована цель исследования, определены решаемые научно-технические задачи и направления исследования. Материалы данной главы опубликованы в [1,2,55].

Во второй главе рассмотрены нормативно-

метрологические и методические основы проведения экспериментальных исследований и моделирования излучения ЭРД, проведен анализ современного состояния экспериментальных установок и методов измерения характеристик излучения ЭРД, систематизированы основные известные результаты измерения характеристик излучения ЭРД в радиодиапазоне.

Анализ существующей отечественной и зарубежной экспериментальной базы, предназначенной для исследования помехоэмиссии ЭРД, показал, что в настоящее время разработчиками используется три подхода:

- проведение измерений непосредственно в металлических вакуумных камерах;
- проведение измерений в безэховых вакуумных камерах;
- проведение измерений с использованием комбинированных стендов, в которых зоны измерения и вакуума разделены.

Приведено описание аттестованной комбинированной экспериментальной установки НИИ ПМЭ МАИ с подвижной безэховой камерой (БЭК), на которой в наземных условиях проводились основные экспериментальные исследования и измерения характеристик излучения ЭРД в радиодиапазоне. Данная установка включает вакуумную камеру (Рисунок 1) и подвижную безэховую камеру с диэлектрическим цилиндром для размещения ЭРД (Рисунок 2).

Для решения задачи комплексной автоматизации наземных стендовых экспериментальных исследований спектрально-временных характеристик излучения ЭРД в радиодиапазоне разработаны измерительный аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий автоматизированный сбор, обработку и анализ экспериментальных данных, а также методика планирования и проведения измерений излучения ЭРД в радиодиапазоне.

Разработана и апробирована методика проведения экспериментальных измерений характеристик излучения ЭРД в радиодиапазоне, включающая методы и порядок измерений, процедуры калибровки измерительного комплекса, математическое обеспечение и программные средства для обеспечения проведения, обработки и интерпретации результатов экспериментальных измерений.

Материалы данной главы опубликованы в [1, 10, 26] и докладывались на конференциях [54, 56]. Предложенные новые технические и программно-алгоритмические решения, используемые в реализации измерительного комплекса, защищены патентами РФ [57], [59] и свидетельством о государственной регистрации программ [66].

В третьей главе приводятся и анализируются основные полученные результаты экспериментальных измерений спектрально-временных характеристик собственного излучения ЭРД в радиодиапазоне, выполненных для лабораторных моделей ЭРД типа СПД-70, СПД-100, СПД-140, ВЧИД-10 и АИПД-50, а также для исследования излучения полого катода, с использованием разработанных методики и аппаратно-программного комплекса, описанных в Главе 2.

Исследования характеристик радиоизлучения ЭРД проводились для различных режимов работы ЭРД в диапазоне частот от 800 МГц до 12 ГГц. Измерения характеристик излучения ЭРД во временной области проводились как в «панорамном» режиме от 0.1(0.8) ГГц до 18(12) ГГц с шагом (полосой анализа) 80 или 140 МГц, так и для основных частотных диапазонов каналов «Земля-КА» РСКС: в S-диапазоне 2.072...2.1 ГГц и 2.55...2.6 ГГц, в C-диапазоне 5.9...6.4 ГГц, в X-диапазоне 7.145...7.235 ГГц.

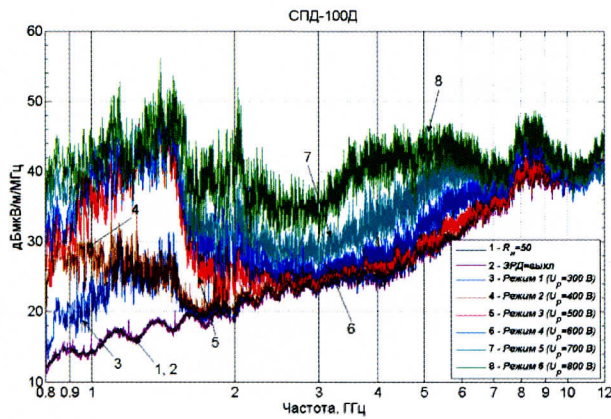


Рисунок 3 – Спектр излучения ЭРД СПД-100-2

выбирались из условия обеспечения устойчивой работы ЭРД. Результаты измерения спектра излучения ЭРД СПД-100-2 для данных режимов работы приведены на Рисунке 3. Из полученных зависимостей видно, что для разрядного напряжения U_p до 400 В основные спектральные компоненты излучения ЭРД СПД-100-2 лежат в частотном диапазоне до 2 ГГц, причем абсолютное значение спектральных характеристик сигнала может достигать 30

Рассмотрим в качестве иллюстрации основных полученных результатов измерения, проведенные для ЭРД модели СПД-100-2, функционирующего в высоковольтном режиме. Изучалось влияние на характеристики излучения ЭРД напряжения разряда, которое менялось от 300 В до 800 В с шагом 100 В. При этом расход рабочего тела поддерживался постоянным на уровне 2.73 мг/с. Ток разряда и токи подмагничивания выбирались из условия обеспечения устойчивой работы ЭРД. Результаты измерения спектра излучения ЭРД СПД-100-2 для данных режимов работы приведены на Рисунке 3. Из полученных зависимостей видно, что для разрядного напряжения U_p до 400 В основные спектральные компоненты излучения ЭРД СПД-100-2 лежат в частотном диапазоне до 2 ГГц, причем абсолютное значение спектральных характеристик сигнала может достигать 30 дБмкВ/м/МГц, что на 16 дБ превышает уровень фона.

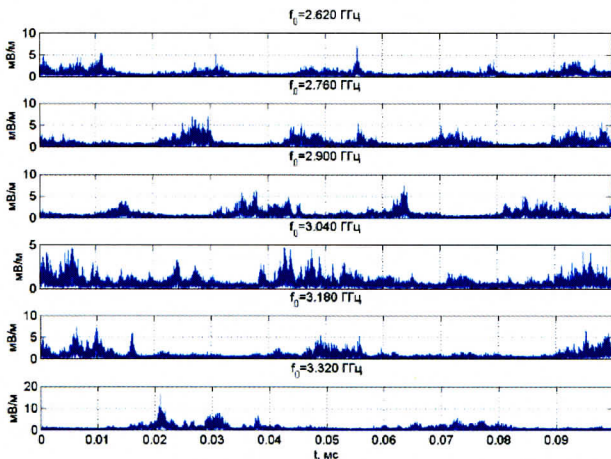


Рисунок 4 – Реализации огибающей принимаемого сигнала (2.62...3.32 ГГц)

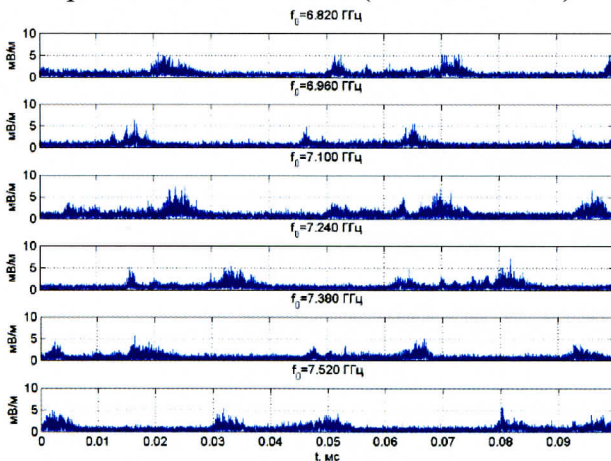


Рисунок 5 – Реализации огибающей принимаемого сигнала (6.82...7.52 ГГц)

При разрядном напряжении 500 В и более, фиксируемый частотный диапазон, занимаемый излучаемым сигналом, расширяется до 12 ГГц. Максимальное значение спектра достигает 50 дБмкВ/м/МГц в области 1.5 ГГц и 45...46 дБмкВ/м/МГц на 6 и 8.5 ГГц, что на 10...15 дБ превышает фоновый уровень измерительной аппаратуры.

Временные реализации огибающей принимаемого сигнала для СПД-100-2 были получены в «панорамном» режиме для частот от 0.1 ГГц до 12 ГГц с шагом 140 МГц для следующих значений напряжения, тока разряда и расхода рабочего тела:

$$U_p = 800 \text{ В}, I_p = 2.95 \text{ А}, \dot{m} = 2.73 \text{ мг/с}.$$

Примеры для диапазонов 2.62...3.32 ГГц и 6.82...7.52 ГГц приведены соответственно на Рисунках 4 и 5. Видно, что для данного режима работы ЭРД характерно наличие импульсных сигналов практически во всех рассматриваемых диапазонах частот.

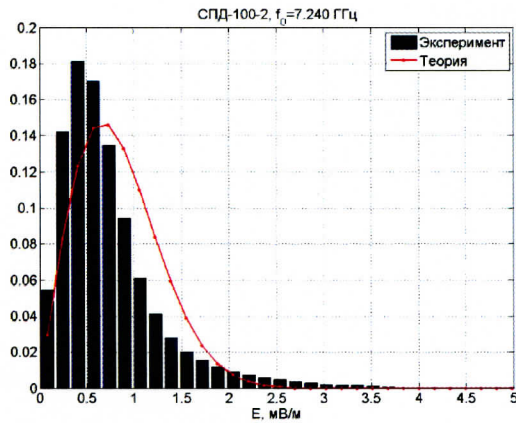


Рисунок 6 – Гистограмма распределения огибающей принимаемого сигнала

Для всех записанных временных реализаций изучались их статистические характеристики: дифференциальные и интегральные законы распределения (ЗР) квадратурных компонент сигнала, амплитудной огибающей и фазы сигнала, корреляционная функция и спектральные характеристики. Примеры ЗР для центральной частоты 7.24 ГГц приведены на Рисунках 6 и 7. Видно, что излучение СПД в этом диапазоне имеет выраженный негауссовский характер.

Аналогичные исследования были проведены и для других вышеперечисленных ЭРД. Особое внимание было уделено холловским двигателям. Анализ показал, что для этого класса ЭРД спектрально-временные характеристики радиоизлучения достаточно похожи, хотя количественно могут различаться в зависимости от конкретного типа СПД, режима его работы и частотного диапазона.

Модель двигателя СПД-100-3 использовалась для изучения влияния геометрических характеристик выходной части разрядной камеры на параметры струи и спектрально-временные характеристики излучения ЭРД. Лабораторная модель ЭРД СПД-100-3 представляла собой инженерную модель, позволяющую оперативно менять фрагменты разрядной камеры с целью имитации степени износа последней. В данном двигателе выходная часть разрядной

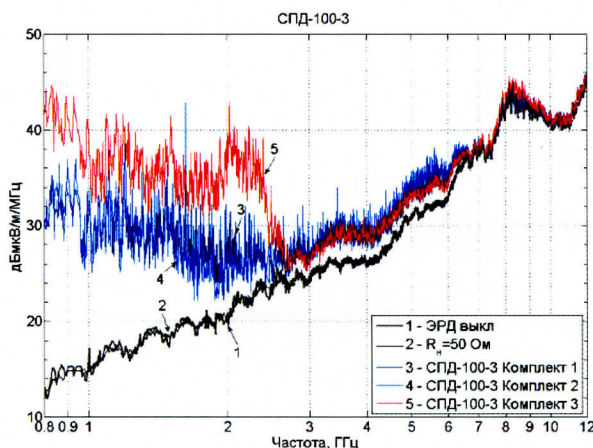


Рисунок 8 – Спектры излучения ЭРД СПД-100-3

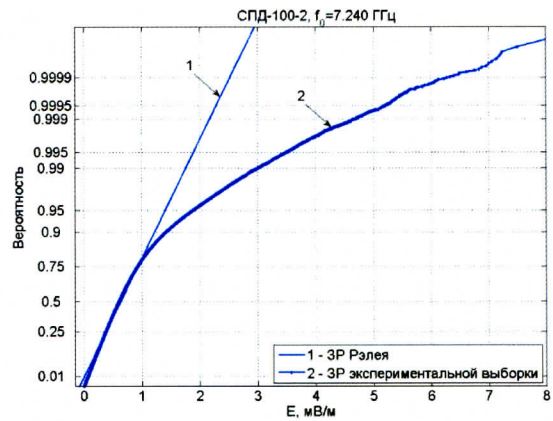


Рисунок 7 – Интегральный ЗР огибающей принимаемого сигнала на «вероятностной бумаге»

камеры была выполнена в виде сменных колец с конфигурацией проточной части, соответствующей разному времени наработки двигателя.

Из графиков Рисунка 8 видно, что изменение характеристик излучения ЭРД для комплектов колец №1 и №2 с малым временем наработки относительно невелико. Однако при использовании комплекта колец №3, соответствующего максимальному времени наработки, наблюдается устойчивое увеличение уровня излучения ЭРД в диапазоне 0.8...2.8 ГГц на

6...10 дБ по сравнению с комплектами колец №1 и №2. В диапазоне 8...9.5 ГГц также имеет место некоторое увеличение уровня излучения: примерно на 1...1.5 дБ. В диапазоне 4...7 ГГц, наоборот, возможно незначительное снижение уровня излучения: примерно на 1...1.5 дБ.

В целом, полученные данные свидетельствуют о том, что износ разрядного канала СПД приводит к возникновению достаточно интенсивного излучения в диапазоне частот от 1 ГГц до 4 ГГц, а также к возникновению заметного излучения в диапазоне 8...9 ГГц.

Были проведены также исследования характеристик радиоизлучения кластера из двух СПД-140-3, которые показали, что увеличение уровня излучения составляет примерно от 1.5 до 2 дБ в зависимости от частоты. Причина того, что увеличение уровня излучения меньше 3 дБ, заключается во взаимном экранировании излучения факелами ЭРД и ослаблении сигнала в окружающей плазме.

Результаты проведенных исследований влияния на характеристики излучения СПД катода-компенсатора позволяют предположить, что именно катод-компенсатор является одним из наиболее существенных источников нетеплового излучения СПД.

Более подробно результаты исследования характеристик излучения рассмотренных ЭРД представлены в диссертации и в [1,7,20,22,26], а также в докладах на конференциях [27,28,33,35,37,39,40,42,43,46,52,54].

Четвертая глава посвящена анализу статистических характеристик и математических моделей радиоизлучения СПД в частотной и временной областях. Рассматриваются феноменологические модели собственного электромагнитного излучения ЭРД различного уровня детализации. Конечной целью создания таких моделей является разработка математических, а затем на их основе и имитационных моделей излучения ЭРД, которые могли бы найти применение в задачах аналитического проектирования и имитационного моделирования радиосистем космической связи.

Анализ результатов экспериментальных исследований собственного электромагнитного излучения ЭРД, проведенный в Главе 3, показал, что излучение ЭРД представляет собой широкополосный случайный процесс. В большинстве случаев можно считать, что в пределах полосы пропускания входных каскадов приемников систем космической связи эти спектральные зависимости примерно постоянны. Учитывая относительную узкополосность

РСКС, в качестве модели первого приближения для описания излучения ЭРД может использоваться модель в виде эквивалентного белого гауссового шума в полосе приемной системы. Подобный подход позволяет в первом приближении относительно просто количественно оценить влияние излучения ЭРД на системы связи.

Пример оценки влияния электромагнитного излучения ЭРД типа СПД-100-2 на деградацию отношения сигнал-шум (ОСШ) на входе приемного тракта приведен на

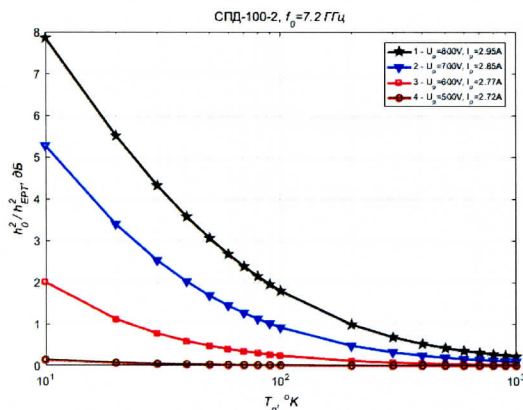


Рисунок 9 – Изменение ОСШ, 7.2 ГГц

Рисунке 9. Видно, что отношение сигнал-шум при работающем ЭРД может ухудшаться на 2...8 дБ при начальной шумовой температуре системы от 100°К до 10°К. При этом максимальная дальность действия системы связи «Земля-КА» может уменьшиться более чем в 2 раза.

На основе статистического анализа результатов экспериментальных измерений показано, что модели излучения СПД должны обладать в полосе измерений (приема) следующими свойствами:

- излучение СПД в общем случае представляется в виде суммы случайной импульсной последовательности (СИП) широкополосных радиоимпульсов и теплового шума;
- значения спектральной плотности мощности теплового шума и средней мощности СИП, а также форма импульсов и параметры внутриимпульсной модуляции, другие параметры импульсной последовательности задаются на основе обработки результатов экспериментальных измерений для конкретного типа СПД;
- закон формирования импульсной последовательности близок к пуассоновскому, закон распределения (ЗР) интервала следования импульсов – экспоненциальный;
- ЗР длительности импульсов аппроксимируется экспоненциальным законом распределения;
- ЗР пикового значения импульсов аппроксимируется рэлеевским ЗР.

Параметры указанных ЗР для каждого типа СПД, режима его работы, частотного диапазона и т.п. определяются на основе обработки результатов соответствующих экспериментальных измерений излучения СПД.

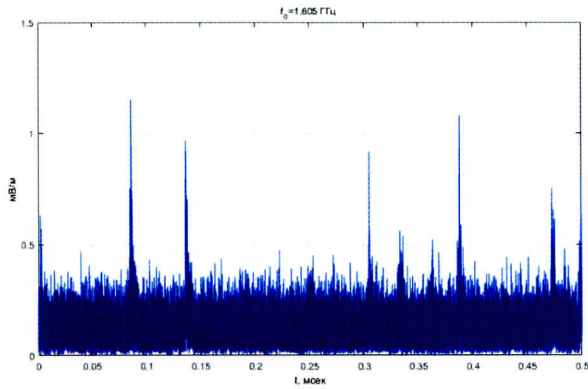
Предложены две обобщенные математические модели излучения СПД в радиодиапазоне: первая - на основе модифицированной модели Фурутсу-Ишида (Модель 1), а вторая – на основе моделей Холла и стробированного гауссовского шума (Модель 2), позволяющие формировать реализации случайных процессов, статистически эквивалентные реальному излучению СПД в радиодиапазоне.

Материалы данной главы опубликованы в [1,3,4,6,9,11,13] и докладывались на конференциях [29,32,40,41,42].

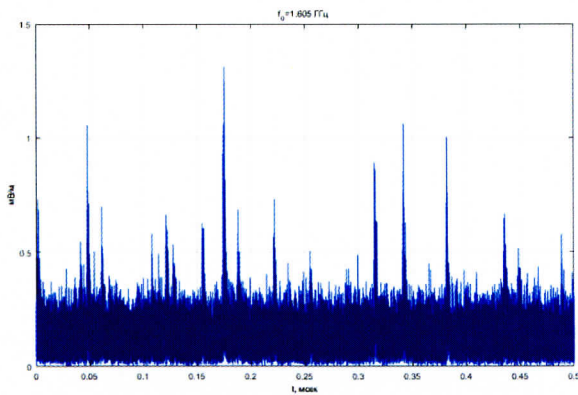
В пятой главе рассматриваются архитектура и алгоритмы реализации программного комплекса для имитационного моделирования излучения СПД в радиодиапазоне, проводится верификация разработанного программно-алгоритмического комплекса для имитационного моделирования излучения СПД в радиодиапазоне.

Для имитационного моделирования собственного излучения СПД в радиодиапазоне в соответствии с математическими моделями и методами, изложенными в Главе 4, разработан специализированный программный комплекс, реализованный в среде MATLAB/Simulink и позволяющий генерировать случайные процессы с заданными статистическими характеристиками.

Проводится верификация программного комплекса для имитационного моделирования радиоизлучения СПД в радиодиапазоне на основе сравнения статистических характеристик реализаций сигналов, полученных при экспериментальных измерениях и при имитационном моделировании. Анализ, который проводился для Модели 1 и Модели 2, показал, что по совокупности показателей обе модели обеспечивают хорошее совпадение с



а)



б)

Рисунок 10 – Фрагменты временных реализаций амплитудной огибающей:

Эксперимент (а), Модель 2 (б)

реализаций - интенсивности суммарного излучения (СПД+фоновый шум), уровня теплового и фонового шума, уровня теплового шума СПД и т.д. составляет от 0.4% до 9.3%. Совпадение

экспериментальными результатами. При этом Модель 2 в ряде случаев имеет более простую программную реализацию.

Примеры сравнения экспериментальных и модельных реализаций сигналов для СПД-100-4 и центральной частоты 1.605 ГГц приведены на Рисунке 10. Примеры сравнения дифференциальных и интегральных законов распределения (ДЗР и ИЗР) экспериментальных и модельных реализаций для СПД-100-2 и центральной частоты 7.19 ГГц приведены на Рисунках 11 и 12. Среднеквадратическое различие ЗР лежит в пределах 2...5%, что с инженерной точки зрения является достаточно хорошим результатом.

Спектральные характеристики реализаций, полученных экспериментально и с помощью имитационных моделей, а также спектр, полученный с помощью анализатора спектра при экспериментальных измерениях, представлены на Рисунке 13. Абсолютные различия уровней средних спектров лежат в пределах 0.25...1 дБмкВ/м/МГц, что соответствует точности 1...5%. Точность совпадения энергетических параметров экспериментальных и модельных (Модель 2)

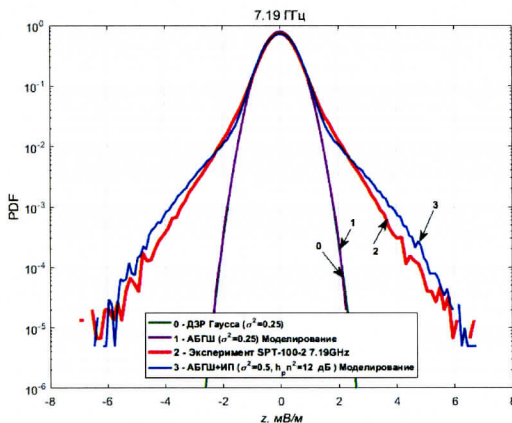


Рисунок 11 – Сравнение ДЗР

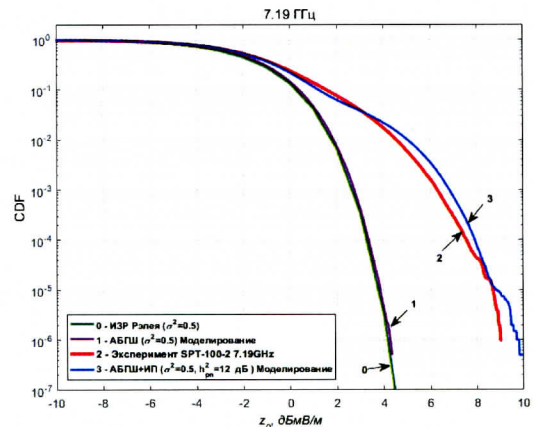
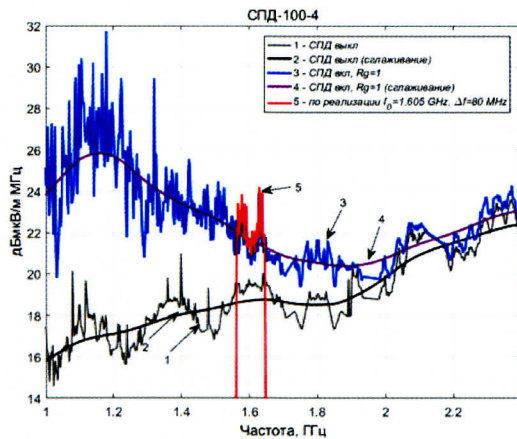
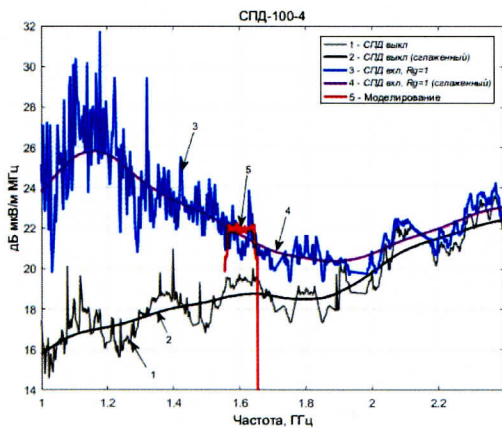


Рисунок 12 – Сравнение ИЗР



а)



б)

Рисунок 13 – Сравнение спектров излучения СПД: Эксперимент (а), Модель 2 (б)

данных результатов подтверждает корректность используемых алгоритмов и методики сравнения результатов, полученных в спектральной и временной областях.

На основе полученных экспериментальных и модельных реализаций сигналов был также проведен сравнительный анализ статистических характеристик интервалов следования импульсов, их длительности и законов распределения пиковых значений импульсов. Показано, что для фиксированных пороговых уровней различие модельных и экспериментальных результатов не превышает 15%.

Основные материалы данной главы опубликованы в [1,12,17,23,65] и докладывались на конференциях [44,47,48,50].

Шестая глава посвящена анализу возможности использования аналитических моделей для исследования влияния радиоизлучения ЭРД на достоверность передачи информации в РСКС и разработке имитационных моделей РСКС, включающих, кроме информационного канала, также каналы фазовой и символьной синхронизации.

Условием применимости модели Миддлтона класса А для анализа достоверности передачи информации в канале с импульсной помехой является неравенство $\mu = \tau_s / \bar{\tau}_p \ll 1$, а методики Белло и Эспозито - $\gamma = \tau_s / \bar{T}_p < 1$. Здесь $\bar{\tau}_p$ - средняя длительность импульсов помехи, τ_s - длительность канального символа, \bar{T}_p - средний период следования импульсов. На основе проведенного анализа было выполнено обобщение модели Миддлтона на случай $\mu \gg 1$, что позволило для этого случая получить аналитические зависимости вероятности битовой ошибки (BER) от отношения сигнал-шум (ОСШ) и отношения сигнал-импульсная помеха (ОСИП) (Рисунок 14), а также от других параметров канала.

В то же время, как было показано, параметры излучения реальных ЭРД и характеристики современных и перспективных РСКС не позволяют в полной мере использовать рассмотренные аналитические модели. В связи с этим актуальной является задача разработки более общих имитационных моделей РСКС и излучения ЭРД. Поэтому были рассмотрены и сформулированы общие принципы имитационного моделирования РСКС в условиях совместного воздействия аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) и излучения ЭРД. Разработан специализированный программно-алгоритмический комплекс для имитационного

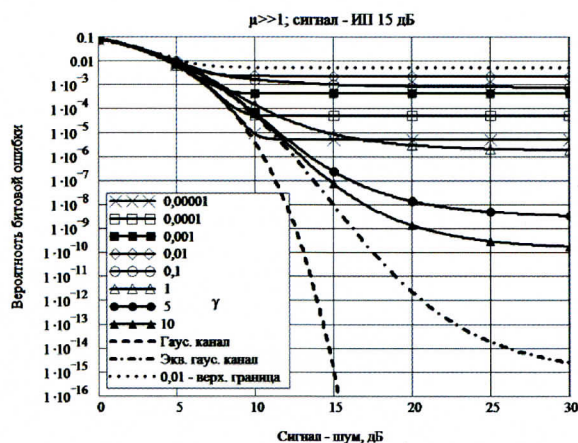


Рисунок 14 – Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал-шум совместного воздействия АБГШ и СИП от ЭРД для наиболее распространенных алгоритмов символьной синхронизации:

- с опережающим и запаздывающим стробированием (Early-Late Gate Timing Recovery);
- по методу Гарднера (Gardner Timing Recovery);
- по методу М&М (Mueller-Muller Timing Recovery).

Анализ результатов моделирования показывает, что воздействие СИП на систему символьной синхронизации тем меньше, чем меньше параметр $\mu = \tau_s / \bar{\tau}_p$. В то же время для $\mu \geq 1$ при уменьшении отношения сигнал-импульсная помеха от 20 дБ до 0 дБ флуктуационная ошибка систем синхронизации увеличивается примерно на порядок. В целом по результатам моделирования наилучшие показатели в условиях совместного воздействия АБГШ и СИП продемонстрировал алгоритм символьной синхронизации Гарднера.

В данной главе также проведена верификация имитационной модели РСКС, которая в пределах применимости аналитических моделей ($\mu \gg 1$ или $\mu \ll 1$) показала хорошее (не хуже 30%) совпадение аналитических и модельных результатов по вероятности битовой ошибки. Разработанные математические и имитационные модели могут быть использованы при анализе и проектировании соответствующих радиолиний.

Основные материалы главы опубликованы в [1,2,3,5,14,16,25] и докладывались на конференциях [38,45].

Седьмая глава посвящена исследованию влияния радиоизлучения СПД на вероятность битовой ошибки при передаче информации в РСКС и анализу зависимости энергетического проигрыша от параметров радиоизлучения СПД.

Для того, чтобы более строго оценить влияние совместного воздействия аддитивного белого гауссового шума и импульсного излучения СПД на достоверность передачи информации, рассматривались системы без помехоустойчивого кодирования. Анализ проводился применительно к РСКС с методами модуляции ФМн-2, ФМн-4, ФМн-8, ФМн-16, КАМ-16 и КАМ-64. В качестве модели радиосистемы передачи информации рассматривалась радиосистема, включающая источник информации в виде бинарного потока символов, модулятор, канал связи с АБГШ и импульсной помехой, формируемой СПД, демодулятор и

моделирования РСКС и исследования характеристик передачи информации с учетом совместного воздействия АБГШ и радиоизлучения СПД не только на информационный канал, но и на каналы фазовой и символьной синхронизации.

С использованием разработанных математических моделей и программного комплекса были определены дискриминационная и флуктуационная характеристики и параметры статистического эквивалента дискриминатора систем символьной синхронизации в условиях

получатель информации. Для распределения кодовых комбинаций по созвездию сигналов в случае многопозиционной модуляции использовался код Грея. С учетом требования эффективного использования частотного ресурса использовались формирующие фильтры «приподнятого косинуса».

Вероятность битовой ошибки (BER) исследовалась, как функция битовых ОСШ, ОСИП и параметра μ для средней скважности СИП $Q=10$. Реализация демодулятора рассматривалась в виде фильтра, согласованного с заданным видом модуляции и обеспечивающего обработку, близкую к оптимальной.

Анализ полученных результатов для ФМн-2 (Рисунок 15) показывает, что для всех рассмотренных значений параметра μ при уменьшении ОСИП от 40 дБ до 0 дБ наблюдается значительный рост вероятности битовой ошибки. Так, при $\mu=0.1$ и ОСШ 10 дБ BER увеличивается с $4 \cdot 10^{-6}$ до $2.5 \cdot 10^{-1}$. При $\mu=1.0$ и ОСШ 10 дБ BER увеличивается с $4.5 \cdot 10^{-6}$ до $4.5 \cdot 10^{-1}$. В случае $\mu=10$ и ОСШ 10 дБ BER увеличивается с $6 \cdot 10^{-6}$ до $8 \cdot 10^{-2}$, а при $\mu=100$ и ОСШ 10 дБ BER увеличивается с $4 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-1}$.

Аналогичные исследования были проведены и для других вышеперечисленных методов модуляции. Анализ результатов показал, что влияние СИП, формируемых ЭРД, является

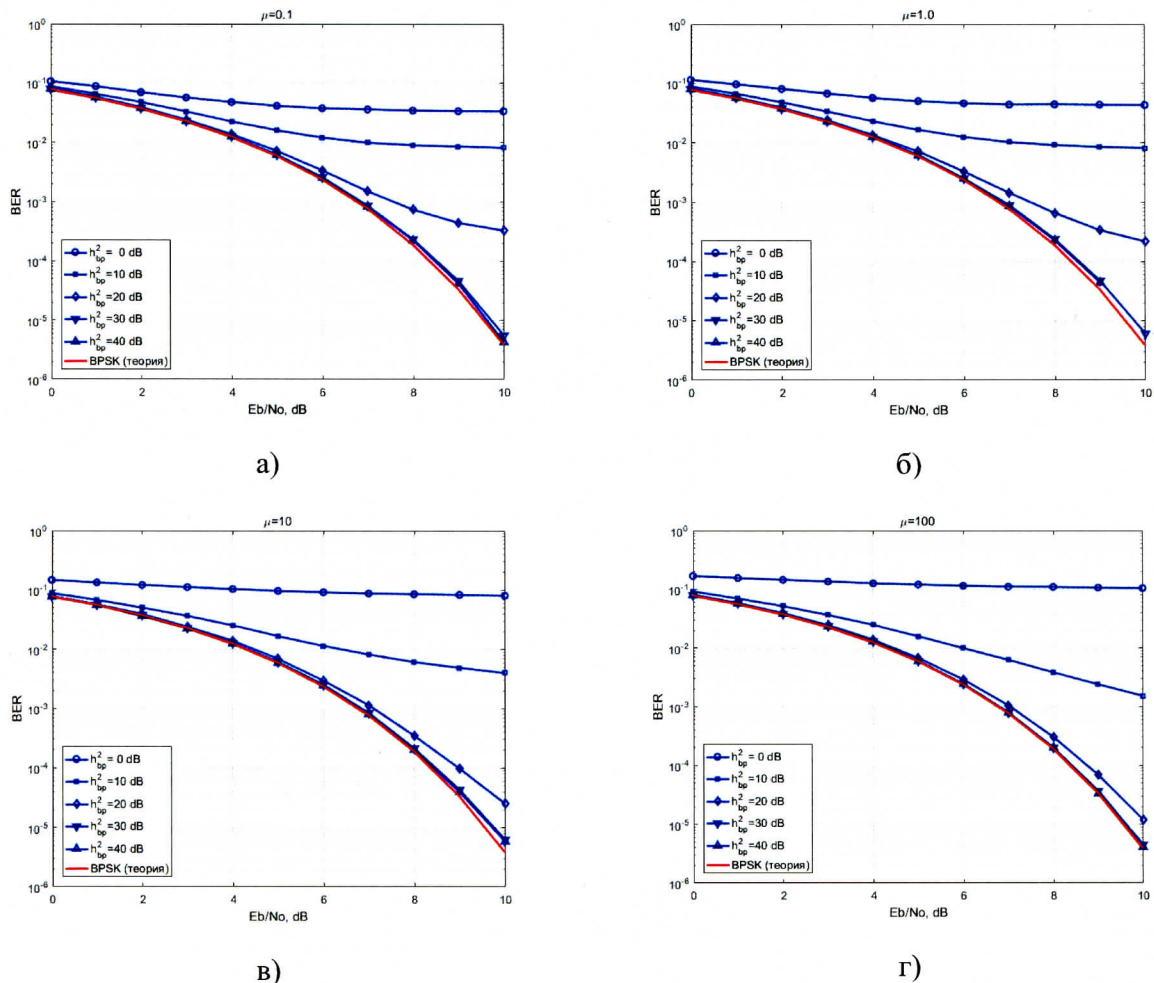


Рисунок 15 – Зависимость вероятности битовой ошибки от битовых отношений сигнал-шум и сигнал-импульсная помеха для модуляции ФМн-2: а) - $\mu=0.1$; б) - $\mu=1.0$; в) - $\mu=10$; г) - $\mu=100$

наиболее существенным для ОСШ выше 8 дБ и ОСИП, меньших 20...30 дБ. При этом влияние излучения СПД на помехоустойчивость радиолинии существенным образом зависит не только от энергетических характеристик информационного сигнала и СИП, то есть от ОСИП, но также и от соотношения их временных параметров (длительности информационного символа, средней длительности импульса помехи и среднего периода следования импульсов СИП).

Для оценки помехоустойчивости функционирования системы связи в условиях совместного воздействия АБГШ и импульсного излучения СПД в качестве эталонной системы связи рассматривается система с помехой только в виде АБГШ, описывающего тепловой шум приемного тракта. Для рассмотренных выше методов модуляции проведен анализ величины энергетического проигрыша за счет воздействия радиоизлучения СПД.

Для расчета ОСШ и ОСИП на входе приемного тракта для конкретных параметров РКСК и радиоизлучения СПД разработаны математические модели, базирующиеся на методах расчета энергетических характеристик радиоканала. С учетом специфики функциональной зависимости BER от ОСШ и ОСИП проведено обобщение определения энергетического проигрыша для случая одновременного воздействия теплового шума и СИП излучения СПД.

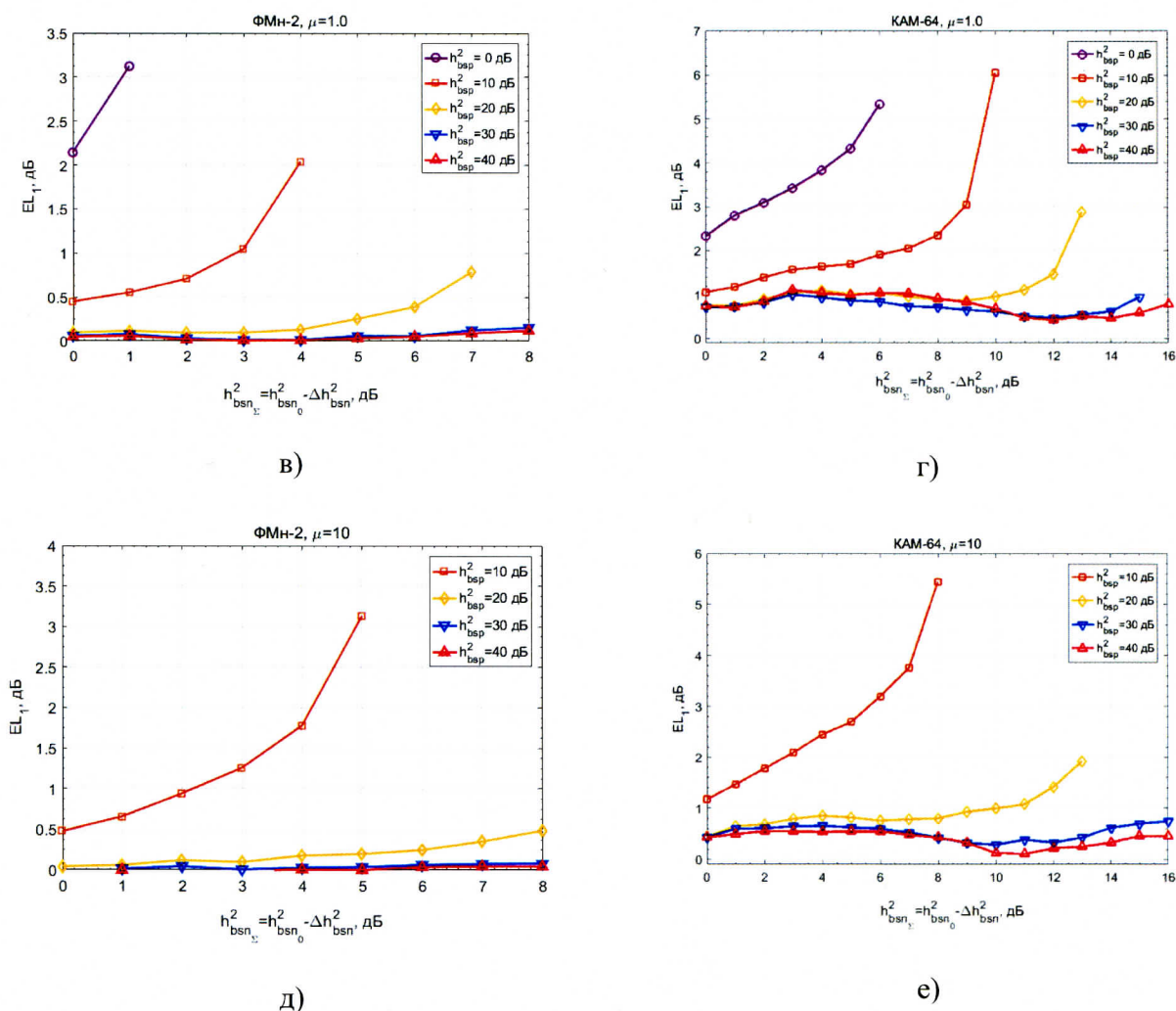


Рисунок 16 – Зависимость энергетического проигрыша EL_1 от суммарного отношения сигнал-шум и отношения сигнал-импульсная помеха для модуляции ФМн-2 и КАМ-64

С использованием результатов имитационного моделирования и на основе решения системы нелинейных уравнений для всех рассматриваемых методов модуляции получены оценки энергетического проигрыша РСКС в условиях воздействия радиоизлучения СПД.

На Рисунке 16 приведены примеры зависимостей энергетического проигрыша EL_1 от суммарного отношения сигнал-шум и отношения сигнал-помеха для модуляций ФМн-2 и КАМ-64.

Энергетический проигрыш для модуляции ФМн-2 существенно зависит от величины параметра μ и ОСИП. Так, для ОСИП от 30 дБ и выше энергетический проигрыш за счет воздействия излучения СПД достаточно мал и не превышает 0.5 дБ для суммарного ОСШ до 8 дБ. Однако, для ОСИП от 20 дБ и меньше энергетический проигрыш увеличивается и может достигать 1...4 дБ.

Для модуляции КАМ-64 величина энергетического проигрыша за счет воздействия излучения СПД для ОСИП от 30 дБ и выше не превышает 0.5...1 дБ для суммарного ОСШ до 16 дБ. Для ОСИП от 20 дБ и меньше энергетический проигрыш увеличивается и может достигать 1...6 дБ.

Полученные результаты позволяют количественно оценивать достоверность передачи информации и энергетический проигрыш РСКС при воздействии радиоизлучения СПД для широкого круга условий функционирования и параметров радиолинии.

Материалы данной главы опубликованы в [1,6,8,14,18,21,24] и докладывались на конференциях [30,31,34,36,38,49,51].

В восьмой главе проводится исследование влияния предложенных методов квадратурной компенсации воздействия импульсной компоненты радиоизлучения СПД на помехоустойчивость РСКС, анализируются новые методы оценки текущих значений ОСШ, в том числе и при воздействии радиоизлучения СПД, обеспечивающие реализацию адаптивного режима компенсации.

Для борьбы с негативным влиянием импульсной компоненты излучения СПД на функционирование РСКС были предложены технические решения в виде квадратурного компенсатора импульсных помех (ККИП) СПД и вариантов его реализации, которые защищены патентами на изобретение РФ [58], США [60] и ЕС [64]. Проведено сравнение эффективности ККИП с традиционным алгоритмом борьбы с импульсными помехами - ШОУ (широкая полоса-ограничитель-узкая полоса), реализованным в виде квадратурного ограничителя импульсных помех (КОИП). Данное сравнение показало, что при комбинированном воздействии АБГШ и СИП для $\mu > 1$ ККИП позволяет получить существенный выигрыш по вероятности ошибочного приема символа фильтрованной ФМн-2 по сравнению с алгоритмом КОИП (ШОУ). Так, при ОСШ 5 дБ и ОСИП 0 и 5 дБ ККИП при оптимальном значении порога обеспечивает выигрыш соответственно в 2.4 и 1.4 раза по вероятности битовой ошибки по сравнению с КОИП. При ОСШ 10 дБ и ОСИП 0 и 5 дБ выигрыш по вероятности битовой ошибки ККИП по сравнению с КОИП составляет 4.5 и 3.5 раза соответственно.

При высоком уровне импульсных помех (ОСИП от 10 дБ и ниже) ККИП обеспечивает энергетический выигрыш по сравнению с КОИП от 1.5 дБ при ОСИП 10 дБ ($BER=8 \cdot 10^{-4}$) до 5 дБ при ОСИП 0 дБ ($BER=1.5 \cdot 10^{-2}$).

При реализации ККИП для достижения максимальной эффективности подавления СИП необходимо выбирать уровень порога в соответствии с текущим ОСШ. Был проведен сравнительный анализ существующих алгоритмов оценки отношения сигнал-шум и предложены новые алгоритмы, позволяющие обеспечить точность оценки, близкую к потенциальной как при отсутствии систематической ошибки в петле фазовой автоподстройки частоты, так и при ее наличии:

$$SNR = \frac{|\overline{I_Y}|^2 + \overline{Q_Y}|^2}{\overline{I_Y}^2 + \overline{Q_Y}^2 - (|\overline{I_Y}|^2 + \overline{Q_Y}|^2)}, \quad (1)$$

$$SNR = \frac{\overline{I_Y}^2 - \overline{Q_Y}^2 + 2\overline{Q_Y}|^2}{2 \cdot (\overline{Q_Y}^2 - \overline{Q_Y}|^2)}, \quad (2)$$

$$SNR = \frac{|\overline{I_Y}|^2 + \overline{Q_Y}|^2}{2 \cdot (\overline{Q_Y}^2 - \overline{Q_Y}|^2)}, \quad (3)$$

$$SNR = \frac{\overline{I_Y}^2 - \overline{Q_Y}^2 + 2\overline{Q_Y}|^2}{\overline{I_Y}^2 + \overline{Q_Y}^2 - (|\overline{I_Y}|^2 + \overline{Q_Y}|^2)}. \quad (4)$$

Здесь I_Y и Q_Y - отсчеты синфазной и квадратурной компонент принимаемого сигнала на выходе согласованного фильтра. Разработанные алгоритмы оценки текущего отношения сигнал-шум на основе обработки квадратурных компонент принимаемого сигнала при отсутствии СИП обеспечивают оценку текущего отношения сигнал-шум с ошибкой менее 0.1 дБ по отношению к границе Крамера-Рао при отсутствии систематической ошибки оценки фазы и при отношениях сигнал-шум более 0 дБ (алгоритм (2)) и с максимальной ошибкой до 1 дБ при значениях систематической ошибки оценки фазы до $\pi/8$ (алгоритмы (2) и (4)).

Разработанные для оптимизации работы квадратурного компенсатора импульсных помех алгоритмы (2) и (3) оценки текущего отношения сигнал-шум в условиях воздействия импульсных помех являются работоспособными во всем рассматриваемом диапазоне ОСШ (-10 дБ ... 30 дБ) и при ОСШ более 5 дБ обеспечивают точность оценки ОСШ не хуже 10...20% при ОСИП от 0 дБ до 30 дБ.

Предложенные технические решения защищены патентом РФ [62] и патентами США [61] и [63]. Материалы главы опубликованы в [1,15,19] и докладывались на конференциях [49,51,53].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе:

1. Разработан и апробирован уникальный многофункциональный экспериментальный стенд НИИ ПМЭ МАИ для исследования собственного радиоизлучения ЭРД в наземных условиях, включающий в себя «радиопрозрачный» вакуумный отсек с исследуемым ЭРД, интегрированный в подвижную безэховую камеру, оснащенную автоматизированным комплексом измерения излучения в радиодиапазоне, соединенный с основной вакуумной

камерой, снабженной системой откачки, воспроизводящей условия космического пространства, позволяющий исследовать помехоэмиссию различных типов ЭРД мощностью до 20 кВт.

2. Разработан комплекс методов, математических моделей, аппаратно-программных, программно-алгоритмических средств и технических решений, основанный на использовании многофункционального экспериментального стенда НИИ ПМЭ МАИ, позволяющий проводить экспериментальные исследования и измерения характеристик радиоизлучения электрических ракетных двигателей в наземных условиях и на этой основе получать оценки помехоустойчивости радиосистем космической связи и разрабатывать методы ее повышения.

3. Проведены экспериментальные исследования характеристик излучения стационарных плазменных двигателей в радиодиапазоне, на основании которых предложены, верифицированы и апробированы математические и имитационные модели такого излучения, которые могут быть использованы при создании имитаторов радиоизлучения стационарных плазменных двигателей при проведении наземных испытаний КА и для анализа влияния этого излучения на помехоустойчивость радиосистем космической связи.

4. Разработаны и апробированы математические и имитационные модели радиосистем космической связи, функционирующих в условиях воздействия радиоизлучения стационарных плазменных двигателей, учитывающие воздействие такого излучения как на информационный канал, так и на каналы синхронизации и позволяющие оценивать достоверность передачи информации для ряда современных методов модуляции.

5. Впервые получены и исследованы количественные оценки помехоустойчивости радиосистем космической связи в условиях воздействия радиоизлучения стационарных плазменных двигателей, позволяющие принимать обоснованные технические решения при проектировании и выборе параметров радиосистем космической связи.

6. Предложены и исследованы новые методы и алгоритмы повышения помехоустойчивости радиосистем космической связи в условиях воздействия радиоизлучения стационарных плазменных двигателей, обеспечивающие энергетический выигрыш от 3 дБ до, в ряде случаев, 12 дБ и более. Сравнение предложенных методов с известными, например, ШОУ, показывает, что предложенные методы, при определенных условиях, имеют энергетический выигрыш от 1.5 до 5 дБ.

7. Для оптимизации работы предложенных алгоритмов компенсации радиоизлучения СПД в адаптивном режиме разработаны и исследованы новые методы и алгоритмы оценки текущего отношения сигнал-шум в условиях воздействия радиоизлучения стационарных плазменных двигателей.

8. Разработанные методы, математические модели и алгоритмы доведены до реализации в виде аппаратно-программных и программно-алгоритмических комплексов, которые могут быть использованы и уже используются в инженерной практике при проектировании радиосистем космической связи и передачи данных. Предложенные технические решения защищены патентами РФ, США и ЕС. Разработанные программные средства прошли государственную регистрацию.

Таким образом, в представленной диссертационной работе решена научная проблема, заключающаяся в разработке эффективных методов повышения помехоустойчивости радиосистем космической связи при воздействии радиоизлучения стационарных плазменных

двигателей, на основе результатов экспериментальных стендовых измерений характеристик излучения в наземных условиях. Данная проблема имеет важное научно-практическое значение, а результаты работы могут быть использованы при реализации проектов освоения ближнего и в особенности дальнего космоса.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии и учебные пособия

1. Важенин Н.А., Обухов В.А., Плохих А.П., Попов Г.А. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов и их влияние на радиосистемы космической связи. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 432 с.

2. Радиосистемы и сети передачи информации: Учебное пособие для вузов / Важенин Н.А., Вейцель В.А., Волковский А.С. и др.; Под ред. Р.Б. Мазепы. — М.: Изд-во МАИ, 2002. — 568 с.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

3. Плохих А.П., Важенин Н.А., Соганова Г.В. Методы исследования влияния собственного электромагнитного излучения электрических ракетных двигателей на характеристики чувствительности бортовых радиотехнических систем КА // "Технологии электромагнитной совместимости". — 2002. — Т. 3. — С. 22-36.

4. Плохих А.П., Важенин Н.А. Анализ влияния электромагнитных помех электрических ракетных двигателей на характеристики чувствительности бортовых радиотехнических систем космических аппаратов в диапазоне сверхвысоких частот // Вестник Московского авиационного института 2004г. — М.: Издательство МАИ, 2004. — Т. 11, №1. — С. 81-93.

5. Вейцель В.А., Важенин Н.А., Волковский А.С., Жодзишский М.И., Мазепа Р.Б., Михайлов В.Ю., Юданов С.Б. Актуальные вопросы построения и выбора параметров современных систем позиционирования, передачи и обработки информации // «Радиотехника». — 2006. — Т. 8. — С. 25-33.

6. Плохих А.П., Важенин Н.А., Волковский А.С. Анализ влияния собственного излучения ЭРД на характеристики командной радиолинии системы дальней космической связи // Вестник Московского авиационного института. — Издательство МАИ, 2007. — Т. 14, №1. — С. 55-70.

7. Плохих А.П., Ким В.П., Важенин Н.А., Сидоренко Е.К. Исследование влияния режимов работы стационарных плазменных двигателей на их помехоэмиссию // "Технологии электромагнитной совместимости". — 2009. — Т. 2, (29). — С. 31-45.

8. Волковский А.С., Важенин Н.А. Помехоустойчивость систем цифровой передачи информации при совместном воздействии шумовых и импульсных помех // Вестник Московского авиационного института. — М.: Издательство МАИ, 2010. — Т. 17, №6. — С. 109-119.

9. Важенин Н.А. Эмпирические модели законов распределения импульсных помех от стационарных плазменных двигателей // Электронный журнал "Труды МАИ". — М.: МАИ, 2012. — №59 — с. 1-15. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?eng=Y&ID=35248>.

10. Плохих А. П., Важенин Н. А. Принципы построения наземных испытательных комплексов для исследования помехоэмиссии электроракетных двигателей // Электронный журнал "Труды МАИ". — М., 2012. — №60. — С. 1-22. — URL: <http://www.mai.ru/upload/iblock/c0f/printsipy-postroeniya-nazemnykh-ispytatelnykh-kompleksovdlya-issledovaniya-pomekhoemissii-elektro-raketnykh-dvigatelay.pdf>.

11. Важенин Н.А. Феноменологические модели импульсных помех от стационарных плазменных двигателей // Электронный журнал "Труды МАИ". — М.: МАИ, 2013. — №66. — С. 1-26. — URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=40277>.

12. Важенин Н.А. Имитационное моделирование электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей // Электронный журнал "Труды МАИ". — М.: МАИ, 2013. — №69. — С. 1-18. — URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=43218>.

13. Важенин Н.А. Влияние электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей на шумовые характеристики радиолиний космической связи // Электронный журнал "Труды МАИ". — М.: МАИ, 2013. — №69. — С. 1-23. — URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=43329>.

14. Важенин Н.А. Анализ совместного воздействия аддитивного белого гауссовского шума и случайных импульсных помех на помехоустойчивость информационного канала и каналов синхронизации радиолинии космической связи // Вестник Московского авиационного института. — М.: Издательство МАИ, 2013. — Т. 20, №5. — С. 111-123.

15. Важенин Н.А. Анализ помехоустойчивости квадратурного компенсатора импульсных помех // Вестник Московского авиационного института. — М.: Издательство МАИ, 2014. — Т. 21, №1. — С. 116-123.

16. Важенин Н.А. Характеристики систем символьной синхронизации в условиях совместного воздействия случайных импульсных помех и АБГШ // Вестник Московского авиационного института. — М.: Издательство МАИ, 2014. — Т. 21, №2. — С. 83-97.

17. Важенин Н.А., Плохих А.П. Имитационное моделирование электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей // Известия Академии наук. Энергетика. — М., 2014. — №6. — С. 118-131.

18. Важенин Н.А. Влияние собственного электромагнитного излучения ЭРД на помехоустойчивость радиосистем космической связи // Успехи современной радиоэлектроники. — М.: Радиотехника, 2015. — №1. — С. 20-23.

19. Серкин Ф.Б., Важенин Н.А., Вейцель В.В. Сравнительный анализ алгоритмов оценки отношения сигнал-шум на основе квадратурных компонент принимаемого сигнала // Журнал "Труды МАИ". — М.: МАИ, 2015. — Вып. 83. — С. 1-24. — Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=62221>.

20. Плохих А.П., Важенин Н.А., Ким В.П., Баранов С.В. Исследование характеристик излучения полого катода стационарного плазменного двигателя в радиодиапазоне // Известия Академии наук. Энергетика. — М., 2016. — №2. — с. 80-91.

21. Важенин Н.А., Волковский А.С., Казачков В.О., Нестеров А.В., Серкин Ф.Б. Анализ энергетических характеристик перспективной системы спутникового ШПД для аэромобильных абонентов // Электросвязь. — М., 2017. — №3. - с. 51-53.

22. Баранов С.В., Важенин Н.А., Плохих П.П., Попов Г.А. Определение помехоэмиссии электрических ракетных двигателей в наземных условиях // Известия Академии наук. Энергетика. — М., 2017. — № 3. — с. 50-61.

23. Важенин Н.А., Плохих П.П., Фоменков А.И. Верификация моделей и программных комплексов для имитационного моделирования электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей // Известия Академии наук. Энергетика. — М., 2017. — № 3. — с. 62-73.

24. Важенин Н.А., Плохих П.П., Фоменков А.И. Воздействие электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей на канал связи "Земля-космический аппарат" // Известия Академии наук. Энергетика. — М., 2017. — № 3. — с. 74-85.

Публикации в других изданиях и сборниках трудов

25. Важенин Н.А., Волковский А.С., Плохих А.П. Принципы анализа помехоустойчивости радиолиний дальней космической связи с космическими аппаратами, оснащенных маршевыми электроракетными двигателями // «Космонавтика и ракетостроение». — М.: ЦНИИМАШ, 2008. — Т. 3, (52). — С. 43-50.

26. Arbatskiy V.M., Baranov S.V., Vazhenin N.A., Plokhikh A.P., Popov G.A. Peculiarities of determination of electromagnetic interference emission from electric propulsion thrusters under ground conditions // Electric Propulsions and Their Application, Procedia Engineering. — ELSEVIER, 2017. — Vol. 185. — P. 97-104. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817314522>.

Публикации в докладах конференций

27. Plokhikh A.P., Vazhenin N.A., Sarmiento C.J., Sankovic J.M. Study of the Hall thruster self-emission effective center. location within the radio frequency band // 25th International Electric Propulsion Conference (IEPC-97). — Cleveland, Ohio, USA, 1997. — P. 1191-1198.

28. Vazhenin N.A., Plokhikh A.P., Soganova G.V. Methods for investigating the spectrum characteristics of emission for the plasma flows of artificial origin injected in the ionosphere of Earth // International Geosciences and Remote Sensing Symposium. — Sydney, Australia, 9-13 July, 2001. — Vol. v.5. — P. 2448-2450.

29. Vazhenin N.A., Plokhikh A.P., Soganova G.V. Methods for Investigating the Influence of Self-Induced Electromagnetic Emission of Electric Propulsions Upon the Sensitivity Characteristics of Onboard Radio Systems of Spacecrafts. — Pasadena, CA, USA: 27-th International Electric Propulsion Conference, 2001. — P. 12.

30. Plokhikh A., Vazhenin N., Volkovsky A., Soganova G. Sustainer Electric Propulsion System as a Risk Factor for Deep Space Radio Communications with Spacecraft // Proceedings of the Second World Space Congress, International Astronautical Federation (IAF). — Houston, TH, USA, 10-19 October 2002, 2002. — Vol. 1. — P. 336. — IAC-02-IAA.6.2.04.

31. Plokhikh A., Vazhenin N., Soganova G. EMC problems on board the remote sensing and communications satellites equipped with electric propulsions // Proceedings of the Second World Space Congress, Committee on Space Research (COSPAR). — Houston, TH, USA, 10-19 October, 2002. — Vol. 34. — P. 853.

32. Vazhenin N.A., Ka Min-Ho, Volkovsky A.S., Plokhikh A.P. Deep Space Radio Communications with Spacecraft Using Electric Propulsion System // The 2004 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC2004). — Sendai/Matsushima, Miyagi-Pref., JAPAN July 6-8, 2004. — P. 1-4. — 7F2P-57.

33. Плохих А.П., Попов Г.А., Антропов Н.Н., Важенин Н.А., Дьяконов Г.А., Шишкин Г.Г. Экспериментальное исследование излучения импульсных плазменных двигателей // Сборник докладов Девятой Российской научно-технической конференции «Электромагнитная совместимость технических средств и электромагнитная безопасность». ЭМС-2006. — Санкт-Петербург, 20-22 сентября, 2006. — С. 498-493.

34. Важенин Н.А., А.С. Волковский А.С., Плохих А.П. Анализ влияния импульсной составляющей излучения СПД на характеристики цифровых систем космической связи // 6-я Международная конференция "Авиация и космонавтика-2007". — Москва. 1 – 4 октября, 2007. — С. 120.

35. Andrey Plokhikh, Garri Popov, Gennady Shishkin, Nikolay Antropov, Nikolay Vazhenin, Galina Soganova. Electromagnetic Safety of Spacecraft during Active Experiments with the Use of

Plasma Accelerators and Ion Injectors // 37th COSPAR Scientific Assembly 2008. — Montreal, Canada, 13-20 July, 2008. — P. 2463. — C52-0031-08.

36. Andrey Plokhikh, Nikolay Vazhenin, Aleksey Volkovsky, Galina Soganova. EMC Analysis for Sustainer Electric Propulsions and Deep Space Communication Systems // XXIX General Assembly of the International Union of Radio Science. Union Radio Scientific International (URSI). — Chicago, Illinois, USA, August 07-16, 2008. — P. 1-4. — E07p9.

37. Важенин Н.А., Кочура С.Г., Максимов И.А., Малюгин Д.В., Надирадзе А.Б., Плохих А.П., Шапошников В.В. Спектрально-временные характеристики помех стационарных плазменных двигателей // Сборник докладов десятой российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности (ЭМС-2008). — Санкт-Петербург, 24-26 сентября, 2008. — С. 586-591.

38. Важенин Н.А., Волковский А.С., Плохих А.П. Имитационное моделирование в задачах оценки помехоустойчивости систем дальней космической связи с КА, оборудованными маршевыми ЭРД // 7-я Международная конференция "Авиация и космонавтика-2008". — Москва, 20 – 23 октября, 2008. — С. 34.

39. Andrey Plokhikh, Nikolay Antropov, Nikolay Vazhenin, Garri Popov, Gennady Shishkin, Galina Soganova. Electromagnetic Emission of Pulsed Plasma Thrusters // 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. EMC Zurich 2009. — ETH Zurich, Switzerland. 12-16 January, 2009. — P. 21-24.

40. Важенин Н.А., Плохих А.П. Статистические характеристики помех стационарных плазменных двигателей // VIII Международный Симпозиум по радиационной плазмодинамике РПД-2009. — Москва, 8 - 11 декабря, 2009. — С. 24-27.

41. Vazhenin N.A., Plokhikh A.P., Shishkin G.G., Shishkin A.G., Soganova G.V. Study for characteristics of fluctuating radiation originating inside a plasma source based on gas discharge with crossed E and H fields // Proc. of Intern. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applications. — Sydney, 2010. — P. 146-150.

42. Важенин Н.А., Плохих А.П. ЭМС электрических двигателей космических аппаратов, предназначенных для исследования планет и малых тел солнечной системы // Труды 9-го Международного симпозиума и выставка по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. ЭМС-2011. — Санкт-Петербург, Россия, 13–16 сентября, 2011. — С. 491-494.

43. Andrey Plokhikh, Nikolay Vazhenin, Vladimir Kim, Evgeniy Sidorenko, and Galina Soganova. Study for the Influence of Stationary Plasma Thruster Operating Modes on its Electromagnetic Emission // The 32nd International Electric Propulsion Conference. — Wiesbaden, Germany. September 11 – 15, 2011. — P. 256-258. — IEPC-2011-094.

44. Важенин Н.А., Плохих А.П. Имитационное моделирование радиопомех, создаваемых стационарными плазменными двигателями // IX Международный симпозиум по радиационной плазмодинамике: Сборник научных трудов. — М.: "Инженер", 2012. — с. 107-111. — ISBN 978-5-7013-0144-1.

45. Serkin F.B., Vazhenin N.A., USRP platform for communication systems research // IEEE Xplore Digital Library, 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). — Spain, 2013. — 4 p.

46. Vazhenin N.A., Plokhikh A.P., Soganova G.V. Electromagnetic Compatibility of Spacecraft Electric Thruster // 29th International Symposium on Space Technology and Science (29th ISTS). — Nagoya-Aichi, Japan, June 2-9, 2013. — P. 60. — 2013-b-60p.

47. Plokhikh A.P., Vazhenin N.A., Soganova G.V. Test Data Analysis and Simulation Modeling for the Electromagnetic Emission from Stationary Plasma Thrusters // 33rd International Electric Propulsion Conference (IEPC-2013). — The George Washington University, Washington, D.C., USA, October 6 – 10, 2013. — P. 1-8. — IEPC-2013-168.

48. Plokhikh A.P., Vazhenin N.A. Simulation Modeling of Electromagnetic Emission from Electric Propulsions // 5th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application "Electric Propulsion - New Challenges" Book of Abstracts. — Dresden, Germany, 7-12 Sep, 2014. — P. 39.

49. Важенин Н.А. Влияние собственного электромагнитного излучения ЭРД на помехоустойчивость радиосистем космической связи // Сб. тезисов ВНТК "Системы связи и радионавигации". — Красноярск: ОАО "НПП "Радиосвязь", 2014. — С. 38-40.

50. Плохих А.П., Важенин Н.А. Математические и имитационные модели помех в радиосистемах космической связи с КА, оборудованными ЭРД // Сб. тезисов ВНТК "Системы связи и радионавигации". — Красноярск: ОАО "НПП "Радиосвязь", 2014. — С. 45-47.

51. Важенин Н.А. Помехоустойчивость цифрового канала связи с КА, использующим электрические ракетные двигатели // 13-я Международная конференция "Авиация и космонавтика-2014". — Москва, МАИ 17—21 ноября: СПб.: Мастерская печати, 2014. — С. 367-369 (710с.).

52. Plokhikh A.P., Vazhenin N.A., Kim V.P., and Baranov S.V. Experimental Investigation of the Hollow Cathode Electromagnetic Radiation // Joint Conference of the 30th International Symposium on Space Technology and Science 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-Satellite Symposium. — Hyogo-Kobe, Japan, July 4 – 10, 2015. — С. 1-6. — IEPC-2015-489p/ISTS-2015-b-489p.

53. Важенин Н.А., Вейцель В.В., Серкин Ф.Б. Алгоритмы оценки текущего отношения сигнал-шум в инфокоммуникационных системах // Международная научно-техническая конференция "Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях" "СИНХРОИНФО 2016". — Самара, 2016. — С. 1-3.

54. A. P. Plokhikh, V.M. Arbatskiy, S.V. Baranov, N.A. Vazhenin, G.A. Popov. Peculiarities of determination of electromagnetic interference emission from electric propulsion thrusters under ground conditions // Book of Abstracts The 6th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application. — Samara, 28th August - 2nd September, 2016. — P. 48.

55. Важенин Н.А., Волковский А.С., Гавриков Н.С., Казачков В.О., Нестеров А.В., Серкин Ф.Б. Основные тенденции и перспективы развития спутникового широкополосного доступа для аэромобильных абонентов. Системы связи и радионавигации // Всерос. научно-технич. конф. (Красноярск, 22-23 сентября 2016 г.): Сб. тезисов. — Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь», 2016, с. 10-13.

56. Баранов С.В., Важенин Н.А., Плохих П.П., Попов Г.А. Опыт применения измерительного комплекса НИИ ПМЭ МАИ для испытаний ЭРД в интересах задач ЭМС // VI Всероссийская научно-техническая конференция "Электромагнитная совместимость"— Москва, 18-19 Мая 2017 г.

Патенты на изобретения и полезные модели

57. Важенин Н.А., Плохих А.П., Попов Г.А., Козлов В.И., Арбатский В.М. Испытательный стенд.: Патент РФ на полезную модель RU 107769 U1, Приоритет от 19.04.2011. Зарегистрирован 27.08.2011.

58. Важенин Н.А., Волковский А.С., Келин Т.Г. Квадратурный компенсатор импульсных помех.: Патент РФ на изобретение RU 2491570 от 07.02.2013. Приоритет от 14.12.2011.

59. Арбатский В.М., Важенин Н.А., Козлов В.И., Плохих А.П., Попов Г.А. Испытательный стенд.: Патент РФ на полезную модель RU 124664 U1 от 10.02.2013, Приоритет от 24.09.2012.

60. Vashenin N.A., Volkovskiy A.S., Kelin T.G. Quadrature Impulse Noise Remover.: US Patent No. 9,191,048 B2, Date of Patent 2015.11.17. Prior Publication Data 2012.12.13.

61. Vazhenin N.A., Veitsel A.V., Serkin F.B., Veitsel V.V. Method and Apparatus for Estimating the Current Signal-to-Noise Ratio: US Patent No. 9,425,908 B1, Date of Patent 2016.08.23. Prior Publication Data 2015.03.25.

62. Важенин Н.А., Вейцель А.В., Вейцель В.В., Серкин Ф.Б. Способ и устройство для оценки текущего отношения сигнал-шум. Патент РФ №2598693 от 27.09.2016, Приоритет от 25.03.2015.

63. Vazhenin N.A., Veitsel A.V., Serkin F.B., Veitsel V.V. Method and Apparatus for Estimating the Current Signal-to-Noise Ratio. US Patent No. 9,621,288 B2, Date of Patent 2017.04.11. Prior Publication Data 2016.12.15.

64. Vashenin N.A., Volkovskiy A.S., Kelin T.G. Quadrature Impulse Noise Remover. EU Patent No. 2,792,077 B2, Date of Patent 05.07.2017. Date of filing 13.12.2012.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

65. Важенин Н.А., Плохих А.П. Программа для моделирования собственного излучения стационарных плазменных двигателей // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015616679. — М., 18 06 2015 г.

66. Важенин Н.А., Плохих А.П. Программа для автоматизации экспериментальных измерений спектральных характеристик излучения стационарных плазменных двигателей в радиодиапазоне в наземных условиях // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016662712 от 21 ноября 2016 г.