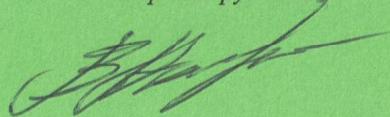


На правах рукописи



Аксенов Виктор Владимирович

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ,
ПОВЫШАЮЩЕЕ УСТОЙЧИВОСТЬ РАДИОРЕЛЕЙНОЙ СТАНЦИИ
К ДЕЙСТВИЮ ИМИТАЦИОННЫХ ПОМЕХ

Специальность 05.11.16

«Информационно-измерительные и управляющие системы»
(технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»).

**Научный
руководитель**

Павлов Владимир Иванович,
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Макаров Олег Юрьевич,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», кафедра «Конструирование и производство радиоаппаратуры», профессор

Быстров Михаил Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, филиал ФГУП «Российская телевизионная и радиовещательная сеть» «Тамбовский областной радиотелевизионный передающий центр», главный инженер

**Ведущая
организация**

ОАО «Тамбовский научно-исследовательский институт радиотехники «ЭФИР»

Защита состоится 27 июня 2014 г. в 11 ч на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 в ФГБОУ ВПО «ТГТУ» по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Ленинградская, д. 1, ауд. 160.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «ТГТУ» www.tstu.ru.

Автореферат разослан «25» апреля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Селиванова Зоя Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие и масштабное распространение радиотехнических систем передачи данных стимулирует разработку новых методов радиоэлектронного противодействия. Эти методы основаны на применении организованных, в том числе имитационных помех, позволяющих на канальном уровне производить передачу ложных данных от имени истинного корреспондента, что влечет за собой большие информационные и материальные потери. Особые сложности возникают в обеспечении имитационной защиты радиосистем передачи данных объектов рассредоточенной структуры, таких как магистральные трубопроводы (газа, нефти и нефтепродуктов), использующих для передачи технологических данных системы передачи на основе цифровых радиорелейных станций (ЦРРС). Наиболее подвержены действию имитационных помех малокабельные радиостанции частотного диапазона 394...410; 434...450 МГц, как наименее технически сложные, распространенные, являющиеся первыми в цепи передачи данных. Наибольшее распространение получили ЦРРС «Азид-5», «МИК-РЛ400ХХ», «Р-6/Е1», «Азид-ЧС», использующие сигналы квадратурной фазовой модуляции QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).

Работа ЦРРС в условиях действия помех осуществляется посредством информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС) с соответствующим алгоритмическим обеспечением.

Для защиты от действия имитационных помех необходимо повышение помехоустойчивости ЦРРС на канальном уровне передачи данных за счет своевременного распознавания действующей ситуации сигнально-помеховой обстановки (СПО) при ее изменении с последующим управлением работой каналов передачи, исключающим прием ложных данных. Данная особенность должна быть учтена в алгоритмическом обеспечении ИИУС ЦРРС.

Степень разработанности темы исследования. При решении задачи распознавания ситуации СПО канала передачи данных традиционно используются выборки наблюдаемых информационных параметров сигнала, представляемых в виде временного ряда. Однако на практике данной информации для эффективного распознавания сложившейся ситуации СПО часто оказывается недостаточно, и задержки в обнаружении изменения ситуации СПО становятся неоправданно большими.

Существующий научно-методический аппарат распознавания ситуации СПО канала передачи данных, основанный: на теории радиосвязи; теории помехоустойчивости; теории последовательных решений (метод кумулятивных сумм, метод обобщенного отношения правдоподобия, метод скользящего среднего); теории управляемого эксперимента; теории систем со случайно изменяющейся структурой, практически достиг своих потенциальных возможностей и не позволяет в полной мере обеспечить требуемую устойчивость к действию имитационных помех.

Для повышения помехоустойчивости каналов передачи необходима модернизация методов распознавания ситуации СПО, направленная на сокращение задержки обнаружения ее изменения. Поэтому поиск путей сокращения времени обнаружения изменения ситуации СПО является актуальной научной задачей.

Объект исследования: информационно-измерительная и управляющая система каналами передачи данных цифровой радиорелейной станции, подверженной действию имитационных помех.

Предмет исследования: устойчивость алгоритмического обеспечения информационно-измерительной и управляющей системы цифровой радиорелейной станции к действию имитационных помех.

Методология и методы исследования: методы системного анализа, математического моделирования сложных систем, компьютерного моделирования; теория радиосвязи; теория помехоустойчивости; теория марковских процессов; теория систем со случайно изменяющейся структурой; метод невязки обновляющегося процесса, метод кумулятивных сумм, метод обобщенного отношения правдоподобия.

Цель работы: повышение помехоустойчивости цифровой радиорелейной станции за счет разработки алгоритмического обеспечения информационно-измерительной и управляющей системы, обеспечивающего своевременное обнаружение имитационной помехи в принимаемом сигнале и управление работой каналов для предотвращения ввода ложных данных.

Для достижения поставленной цели были **решены следующие задачи:**

- проведен анализ возможных ситуаций сигнально-помеховой обстановки канала передачи данных, образующих полную группу несовместных событий;
- обоснован метод распознавания ситуаций СПО канала передачи данных, используемый в качестве базового;
- модернизирован базовый метод для повышения быстродействия распознавания изменения ситуации СПО, обусловленной действием имитационных помех;
- разработан алгоритм, реализующий модернизированный метод распознавания ситуации СПО;
- разработана ИИУС ЦРРС, устойчивой к действию имитационных помех;
- исследована эффективность ИИУС ЦРРС в условиях действия имитационных помех: проведен анализ времени реакции на изменение ситуации СПО и достоверности распознавания действующей ситуации СПО.

Научная новизна:

- модернизирован метод распознавания ситуаций СПО ЦРРС на основе байесовского подхода, в котором в процедуру оценивания ситуации в дополнение к измеренным параметрам сигнала в виде сомножителей вводятся весовые коэффициенты признаков помех путем учета выходных сигналов индикаторов признаков, сопутствующих постановке имитационных и шумовой помех;
- разработано алгоритмическое обеспечение ИИУС, реализующее метод распознавания ситуации СПО канала передачи данных, в котором измеренные значения параметров сигнала подвергаются анализу на предмет наличия признаков, сопутствующих действию имитационных помех, учитываемых в виде весовых коэффициентов вместе с измеренными значениями параметров сигнала в расчете вероятностей соответствующих ситуаций СПО;
- разработана ИИУС ЦРРС, в состав которой на уровне измерителей введены индикаторы сопутствующих признаков, добавлен модуль расчета вероятностей ситуаций СПО, учитывающий информацию измерителей парамет-

ров сигнала и индикаторов сопутствующих признаков, введен модуль оценивания ситуаций СПО, обеспечивающий оценивание вероятностей ситуаций и производство вывода о действующей ситуации СПО.

Положения, выносимые на защиту:

- метод распознавания ситуации СПО, повышающий быстродействие и достоверность обнаружения имитационных помех в канале передачи данных;
- алгоритмическое обеспечение информационно-измерительной и управляющей системы, реализующее метод распознавания ситуации СПО канала передачи данных, учитывающее информацию индикаторов признаков, сопутствующих изменению ситуации СПО;
- информационно-измерительная и управляющая система каналами передачи данных цифровой радиорелейной станции, обеспечивающая повышение устойчивости к действию имитационных помех.

Теоретическая и практическая значимость работы, результаты внедрения. Модернизирован метод распознавания ситуации СПО на основе вероятностного оценивания ситуаций, позволяющий учитывать информацию индикаторов признаков, сопутствующих постановкам имитационных и шумовой помех. Разработано алгоритмическое обеспечение ИИУС, повышающее устойчивость ЦРРС к действию имитационных помех. Результаты имитационного моделирования показали увеличение быстродействия обнаружения смежных состояний СПО в среднем на 16,2% и увеличение вероятностей правильного принятия решения разработанным алгоритмом распознавания СПО в среднем на 12,5%. Внедрение разработанного алгоритмического обеспечения позволяет предотвращать прием ложных данных, вводимых имитационными помехами, обеспечить достоверность и целостность передаваемых данных.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры КРЭМС ФГБОУ ВПО «ТГТУ», ОАО «Тамбовский научно-исследовательский институт радиотехники «ЭФир», ОАО «Тамбовский завод «Октябрь»».

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность результатов исследования обеспечена: формированием исходных данных на основе сведений технической документации рассматриваемых ЦРРС; известностью подхода распознавания ситуаций СПО на основе неинформативных параметров сигнала и содержащихся в них признаков действия помех; применимостью научно-методического аппарата распознавания на основе байесовского подхода в статистической радиотехнике; обоснованностью ограничений распознавания ситуаций СПО; объемом проведенных экспериментов; адекватностью моделирования имитируемых ситуаций СПО; совпадением соответствующих результатов моделирования с результатами других авторов, не использовавших информацию индикаторов сопутствующих признаков.

Основные результаты работы представлялись и обсуждались на: II Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Прогрессивные технологии и перспективы развития» (Тамбов, 2010); Всероссийской научной школе «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники» (Тамбов, 2011); 17-й Международной научно-технической кон-

ференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2012); Всероссийской научно-практической конференции «Военно-воздушные силы – 100 лет на страже неба России: история, современное состояние и перспективы развития» (Воронеж, 2012); региональной НПК курсантов, студентов, молодых ученых, посвященной Дню образования войск связи «Научные чтения имени Александра Степановича Попова» (Воронеж, 2012); Всероссийской НПК курсантов, слушателей, молодых ученых, посвященной Дню образования войск связи «Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией» (Воронеж, 2013).

Публикации. Основные научные результаты по теме диссертации опубликованы в 19 печатных работах, из них 7 статей в журналах, рекомендуемых ВАК РФ для публикации основных результатов диссертации, 1 статья и 11 докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, приложений. Работа изложена на 126 страницах, имеет 50 рисунков и 8 таблиц. Библиографический список литературы имеет 136 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, практическая значимость результатов работы, положения, выносимые на защиту, аннотация работы по главам.

В **первой главе** дана характеристика стационарных объектов рассредоточенной структуры, среди которых выделен класс объектов, нуждающихся в охране от преступных действий третьих лиц (например, магистральные газопроводы, нефтепроводы и нефтепродуктопроводы). Среди составляющих рассредоточенных объектов выделена значимость ЦРПС в обеспечении надлежащей и безаварийной работы объектов, являющаяся основой систем мониторинга технического состояния и управления работой оборудования.

Проведен анализ условий функционирования ЦРПС и угроз безопасности передаваемым данным и обслуживаемым объектам. Показано, что наиболее уязвимыми частями систем передачи данных являются каналы передачи данных. Выделен класс преднамеренных имитационных помех, как наиболее вероятных и опасных угроз безопасности передаваемым данным, влекущих за собой большие информационные и материальные потери.

Для повышения помехоустойчивости каналов передачи данных ЦРПС показана необходимость организации режима приема данных, при котором обеспечивается своевременное распознавание фактов присутствия имитационных помех в принимаемом сигнале и управление работой каналов передачи для предотвращения приема ложных данных.

Для сигналов с фазовой модуляцией проведен литературный обзор применяемых методов распознавания действия имитационных помех, использующих информацию признаков, содержащихся в принимаемом сигнале, вызванных аддитивным взаимодействием помех с полезным сигналом. Произведен критический анализ, определены недостатки методов, ограничивающие их

применяемость и эффективность. Сделан вывод о том, что существующий научно-методический аппарат, применяемый для обнаружения изменения ситуации СПО канала передачи данных, не позволяет в полной мере обеспечить требуемую помехоустойчивость из-за недопустимо больших задержек в обнаружении действия имитационных помех, следствием чего является прием ложных данных приемником канала передачи данных.

В завершении первой главы произведена постановка общей научной и частных задач исследования. **Сущность научной задачи**, решаемой в диссертации, заключается в разработке алгоритмического обеспечения ИИУС каналами передачи данных ЦРРС, обеспечивающего повышение устойчивости к действию имитационных помех за счет повышения быстродействия и достоверности распознавания СПО.

Вторая глава посвящена модернизации метода распознавания ситуаций СПО на основе байесовского подхода; разработке алгоритмического обеспечения, реализующего модернизированный метод; разработке структурной схемы ИИУС ЦРРС.

Показано, что процесс $y(t)$, регистрируемый приемником (ПРМ) канала передачи данных, представляет собой результат аддитивного взаимодействия полезного сигнала $u_c(t, x_c, \alpha_c)$ и помех, где $x_c(t)$ – воспроизводимое сообщение (вектор информационных параметров сигнала), α_c – вектор неинформационных параметров сигнала. Сообщение $x_c(t)$ является нормальным случайным процессом с известными математическим ожиданием $M_x(t)$ и корреляционной функцией $R_x(t_1, t_2)$. Совокупность составляющих процесса $y(t)$ отражает структуру канала передачи данных $y^s(t)$, где s – номер структуры. Под структурой понимается состояние канала передачи данных, определяемое действующей ситуацией СПО. В работе выделены три структуры канала передачи данных, описываемые формулами (1) – (3).

Первой структуре соответствует СПО, при которой в $y(t)$ присутствует полезный сигнал и естественная шумовая помеха $u_{ш}(t)$ (в виде белого шума):

$$y^1(t) = u_c(t, x_c, \alpha_c) + u_{ш}(t). \quad (1)$$

Второй структуре соответствует СПО, обусловленная действием имитационной помехи $u_{п}(t, x_{п}, \alpha_{п})$ совместно с полезным сигналом и естественным шумом:

$$y^2(t) = u_c(t, x_c, \alpha_c) + u_{п}(t, x_{п}, \alpha_{п}) + u_{ш}(t). \quad (2)$$

Отмечено, что имитационная помеха $u_{п}(t, x_{п}, \alpha_{п})$ полностью повторяет полезный сигнал и имеет воспроизводимое сообщение $x_{п}(t)$ и вектор неизвестных в месте приема неинформативных параметров сигнала $\alpha_{п}$.

Третьей структуре соответствует СПО, обусловленная действием преднамеренной имитационной помехи $u_{п}(t, x_{п}, \alpha_{п})$ совместно с заградительной шумовой помехой $u_{ш,п}(t)$, полезным сигналом и естественным шумом:

$$y^3(t) = u_c(t, x_c, \alpha_c) + u_n(t, x_n, \alpha_n) + u_{ш}(t) + u_{ш.п}(t). \quad (3)$$

Процесс функционирования ЦРПС в условиях имитационных помех по своей физической сущности может быть представлен как радиоэлектронный конфликт, в котором, с одной стороны, участвуют ЦРПС, а с другой – система радиоэлектронного противодействия (РЭП) третьих лиц, состоящая в общем случае из станции радиотехнической разведки (РТР) и станции помех. На рисунке 1 в общем виде представлена структурная схема радиоэлектронного конфликта.

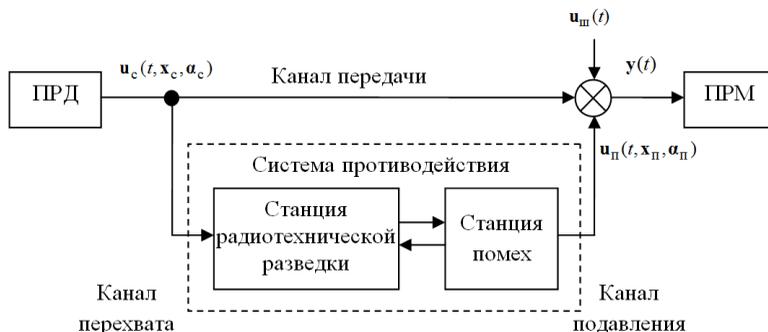


Рис. 1. Структурная схема радиоэлектронного конфликта:

ПРД, ПРМ – передатчик и приемник канала передачи соответственно;

$u_c(t, x_c, \alpha_c)$ – полезный сигнал; $u_{ш}(t)$ – аддитивная помеха в виде белого шума;

$u_n(t, x_n, \alpha_n)$ – имитационная помеха, излучаемая станцией РЭП;

$y(t)$ – случайный процесс на входе приемника

Показано, что структуре канала передачи данных, в зависимости от вида действующих помех, могут соответствовать ряд i ситуаций СПО в виде фазомодулированного сигнала на входе приемника (формулы (4) – (10)):

1) беспомеховая, при которой на выходе антенны ПРМ присутствует сигнал с «несущественным» шумом:

$$y_1(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c(t) + \varphi_{c,0}) + u_{1,ш}(t), \quad (4)$$

где A_c – амплитуда полезного сигнала; ω_c – циклическая частота полезного сигнала; φ_c – фаза полезного сигнала; $\varphi_{c,0}$ – начальная фаза полезного сигнала; $u_{1,ш}(t)$ – уровень естественного шума по мощности.

Наибольшую опасность имеют ситуации СПО, обусловленные действием преднамеренных имитационных помех;

2) имитационная помеха на субчастоте

$$y_2(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c(t) + \varphi_{c,0}) + A_n \cos(\omega_n t + \varphi_n(t) + \varphi_{n,0}) + u_{1,ш}(t) \quad (5)$$

при $\omega_c \approx \omega_n, \quad \omega_c \neq \omega_n,$

где A_n – амплитуда имитационного помехового сигнала; ω_n – циклическая частота полезного сигнала; φ_n – фаза полезного сигнала; $\varphi_{n,0}$ – начальная фаза помехового сигнала; $u_{1,ш}(t)$ – уровень естественного шума по мощности;

3) имитационная помеха на субчастоте с шумом высокой интенсивности

$$y_3(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c(t) + \varphi_{c,0}) + A_n \cos(\omega_n t + \varphi_n(t) + \varphi_{n,0}) + u_{1,ш}(t) + u_{1,ш.п}(t) \\ \text{при } \omega_c \approx \omega_n, \omega_c \neq \omega_n, u_{1,ш}(t) \ll u_{1,ш.п}(t), \quad (6)$$

где $u_{1,ш.п}(t)$ – уровень шумовой заградительной помехи по мощности;

4) имитационная помеха, превосходящая по уровню полезный сигнал:

$$y_4(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c(t) + \varphi_{c,0}) + A_n \cos(\omega_n t + \varphi_n(t) + \varphi_{n,0}) + u_{1,ш}(t) \\ \text{при } A_c < A_n; \quad (7)$$

5) имитационная помеха, превосходящая по уровню полезный сигнал с шумом высокой интенсивности:

$$y_5(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c(t) + \varphi_{c,0}) + A_n \cos(\omega_n t + \varphi_n(t) + \varphi_{n,0}) + u_{1,ш}(t) + u_{1,ш.п}(t) \\ \text{при } A_c < A_n, u_{1,ш}(t) \ll u_{1,ш.п}(t); \quad (8)$$

6) имитационная помеха на субчастоте, превосходящая по уровню полезный сигнал:

$$y_6(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c(t) + \varphi_{c,0}) + A_n \cos(\omega_n t + \varphi_n(t) + \varphi_{n,0}) + u_{1,ш}(t) \\ \text{при } A_c < A_n, \omega_c \approx \omega_n, \omega_c \neq \omega_n; \quad (9)$$

7) имитационная помеха на субчастоте, превосходящая по уровню полезный сигнал с шумом высокой интенсивности:

$$y_7(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c(t) + \varphi_{c,0}) + A_n \cos(\omega_n t + \varphi_n(t) + \varphi_{n,0}) + u_{1,ш}(t) \\ \text{при } A_c < A_n, \omega_c \approx \omega_n, \omega_c \neq \omega_n, u_{1,ш}(t) \ll u_{1,ш.п}(t). \quad (10)$$

Считается, что постановкой имитационной помехи на субчастоте третьи лица пытаются выдать помеху за полезный сигнал. В это время наблюдается: биение амплитуды сигнала; большее отклонение фазы как результат сложения разнофазных сигналов; большее число ошибок. Постановкой шума подавляется полезный сигнал, делая его уровень ниже порога чувствительности приемника. В это же время соотношение сигнал/шум помехового сигнала соответствует уверенному приему. Фиксируется высокий уровень сигнала и шума, сдвиг фазы, высокий коэффициент битовых ошибок.

Отмечено, что непрерывный сигнал канала передачи в приемнике приводится к дискретному виду, и наблюдаемыми в дискретные моменты времени k являются N параметров выходных сигналов первичных измерителей (фазовые координаты) приемника канала передачи данных, составляющих вектор

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{c}_k \mathbf{y}_k + \zeta_k, \quad (11)$$

где k – текущий шаг счета, $k = \overline{0, K}$; n – порядковый номер параметра, $n = \overline{0, N}$; \mathbf{c}_k – матрица дискриминационных характеристик размерности $n \times m$ при $m = \overline{0, \Lambda}$; ζ_k – n -мерный вектор шумов измерений.

Для распознавания ситуации СПО предложено использовать информацию индикаторов сопутствующих признаков, представляющих собой устройства регистрирующего типа, сигнализирующие о наличии или отсутствии признака, сопутствующего изменению СПО. Независимо от типа индикатора его функционирование может быть описано условной вероятностью перехода из состояния r_k в состояние r_{k+1} :

$$\pi(r_{k+1}, k+1 | J_k, p_r, r_k, k), \quad (12)$$

где k – шаг счета, получаемый при дискретизации во времени; J_k – индикаторная функция (например, амплитуда сигнала), соответствующая l -му признаку (например, превышение установленного значения амплитуды); p_r – регистрируемый признак, $p_r = \overline{0, 1}$ (1 – если регистрируется наличие признака, 0 – если признак отсутствует); r_k, r_{k+1} – выходные сигналы индикатора на k -м и $(k+1)$ -м шаге соответственно, $r_k, r_{k+1} = \overline{0, 1}$.

Условие в (12) отражает следующее: в k -й момент времени на входе индикатора сопутствующего признака присутствует индикаторная функция J и регистрируется наличие или отсутствие интересующего признака $p_r = \overline{0, 1}$, выходной сигнал индикатора r на k -м шаге счета может принимать одно из двух состояний $r_k = \overline{0, 1}$, не обязательно совпадающих с $p_r = \overline{0, 1}$. Условная вероятность перехода в состояние r_{k+1} представлена в виде

$$\pi(r_{k+1}, k+1 | J_k, p_r, r_k, k) = \begin{cases} \left. \begin{aligned} & p(J_k) p(p_r = 1) p(r_{k+1} | r_k) \\ & p(J_k) p(p_r = 0) p(r_{k+1} | r_k) \end{aligned} \right\} & \text{при } r_{k+1} = r_k; \\ \left. \begin{aligned} & p(J_k) p(p_r = 1) p(s_{k+1} | r_k) \\ & p(J_k) p(p_r = 0) p(s_{k+1} | r_k) \end{aligned} \right\} & \text{при } r_{k+1} \neq r_k, \end{cases} \quad (13)$$

где $p(J_k)$ – вероятность наличия индикаторной функции на входе индикатора; $p(p_r = 1)$, $p(p_r = 0)$ – вероятности наличия и отсутствия в индикаторной функции регистрируемого признака соответственно; $p(r_{k+1} | r_k)$, $p(s_{k+1} | r_k)$ – вероятности сохранения и изменения выходного сигнала индикатора признака соответственно; s_{k+1} – номер структуры на $(k+1)$ -м шаге.

Правая часть (13) представлена в виде

$$\pi(r_{k+1}|r_k) = \begin{cases} p(p_r = 1)p(r_{k+1}|r_k); \\ p(p_r = 0)p(r_{k+1}|r_k); \end{cases} \quad r_k, r_{k+1} = \overline{0, 1}; \quad (14)$$

$$\pi(s_{k+1}|r_k) = \begin{cases} p(p_r = 1)p(s_{k+1}|r_k); \\ p(p_r = 0)p(s_{k+1}|r_k); \end{cases} \quad r_k, s_{k+1} = \overline{0, 1}, \quad (15)$$

где (14) описывает правильное функционирование индикатора, а (15) – ошибочное. Подстановкой (14) и (15) в (13), получено

$$\pi(r_{k+1}, k+1|J_k, p_r, r_k, k) = \begin{cases} p(J_k)\pi(r_{k+1}|r_k), & \text{при } r_{k+1} = r_k; \\ p(J_k)\pi(s_{k+1}|r_k) & \text{при } r_{k+1} \neq r_k \end{cases} \quad (16)$$

или, используя статические характеристики индикатора признака:

$$\pi(r_{k+1}, k+1|J_k, p_r, r_k, k) = \begin{cases} p(J_k)\pi(r_{k+1}|r_k) [1 - \exp(-\Delta t T^{-1})] + \exp(-\Delta t T^{-1}) \\ \text{при } r_{k+1} = r_k = \overline{0, 1}; \\ p(J_k)\pi(s_{k+1}|r_k) [1 - \exp(-\Delta t T^{-1})] \\ \text{при } r_{k+1} \neq r_k, r_k, s_{k+1} = \overline{0, 1}, \end{cases} \quad (17)$$

где T – постоянная времени.

Показана необходимость использования математического аппарата индикаторов сопутствующих признаков (12) – (17) для распознавания i ситуаций СПО в рамках структур s .

В качестве наблюдаемых параметров сигнала для распознавания ситуации СПО выбраны следующие: уровень сигнала; уровень биения амплитуды сигнала; сдвиг фазы; наличие сигналов на субчастотах; коэффициент битовых ошибок BER; уровень аддитивного шума. Перечисленные параметры подлежат измерению и индикации на предмет наличия признаков, сопутствующих изменению ситуации СПО.

Совокупная обработка индикаторов π , порождаемых воздействием на канал имитационной помехи, может быть представлена в виде

$$\pi_l(r_{l,k+1}, k+1|J_{l,k}, p_r, r_{l,k}, k), \quad (18)$$

где $l = \overline{0, L}$ – номер одного из L индикаторов; k – текущий шаг счета, ($k = \overline{1, K}$); J – индикаторная функция, соответствующая l -му признаку; p_r – вероятность правильного обнаружения признака индикатором; r – выходной сигнал индикатора ($r = \overline{0, 1}$).

Пусть на основе статистических данных имеются априорные вероятности $p_0(i)$ о соответствии векторов \mathbf{z}_k и $\boldsymbol{\pi}_k$ заранее определенным состояниям при $i = \overline{0, I}$. Обозначим через B событие, заключающееся в том, что на $(k+1)$ -м шаге счета действует имитационная помеха. Выдвинем гипотезы H_i ($i = \overline{0, I}$) в

пользу соответствующих i ситуаций СПО. Условная вероятность $p(B|i)$ по группе параметров может быть получена как

$$p(B|i) = \prod_1^N p(z_n). \quad (19)$$

Предполагая, что все параметры z_n вектора \mathbf{z}_k , подлежащие оценке, имеют нормальный закон распределения, условная вероятность для каждого n -го параметра может быть представлена в виде

$$p(z_n) = \frac{1}{\sigma_{zn} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(z_n - M_{zn})^2}{2\sigma_{zn}^2}\right), \quad (20)$$

где M_{zn} – математическое ожидание z_n ; σ_{zn} – среднеквадратическое отклонение z_n . На основании (19) и (20), с учетом заданных интенсивностей переходов $q(i)$ в i ситуацию, апостериорные вероятности гипотез на $(k+1)$ -м шаге счета будут равны

$$p(i|B)_{k+1} = \frac{p_0(i)q_i \prod_1^L \pi_l \prod_1^N \exp\left(-\frac{(z_n - M_{zni})^2}{2\sigma_{zni}^2}\right)}{\sum_0^I p_0(i)q_i \prod_1^L \pi_l \prod_1^N \exp\left(-\frac{(z_n - M_{zni})^2}{2\sigma_{zni}^2}\right)}, \quad (21)$$

где π_l – весовые значения индикаторов сопутствующих признаков.

Отмечено, что весовые значения индикаторов сопутствующих признаков учитываются в формуле (21) только в случае «срабатывания» соответствующего индикатора, увеличивая «вес» в пользу той или иной гипотезы. Они обеспечивают более резкое изменение вероятностей ситуаций СПО, за счет чего достигается увеличение быстродействия обнаружения изменения ситуации СПО и повышение уровня наиболее вероятной ситуации.

Блок-схема алгоритма, реализующего модернизированный метод распознавания ситуаций СПО и управление каналами передачи ЦРРС, изображена на рис. 2.

Исходными данными являются показания измерителей и весовые значения индикаторов сопутствующих признаков, априорная информация о вероятностях ситуаций СПО, математические ожидания и среднеквадратические отклонения измеряемых величин (блок 2). Производится опрос измерителей (блок 4) и индикация L сопутствующих признаков (блок 5), формируются (блок 6) и анализируются (блок 7) выходные сигналы индикаторов r_l , $l = \overline{0, L}$. При срабатывании $r_l = 1$ весовой коэффициент признака $\pi_l = \text{const}$ (блок 8) появляется в соответствующих формулах для оценивания вероятностей СПО. Циклически (блок 9) рассчитываются апостериорные вероятности i ситуаций СПО (блок 10). В качестве действующей принимается ситуация, имеющая максимальную вероятность $p(i|B)_{k+1} = p_{\max}$ (блок 11). Если ситуация беспомеховая

$i=1$ (блок 12), то осуществляется переход на следующий шаг счета; если помеховая $i \neq 1$, то приемная и передающая станции переключаются на другой канал передачи $e+1$ (блок 3). По истечении лимита каналов $e=E$ (блок 13) осуществляется прекращение передачи данных до выяснения причин (блок 14).

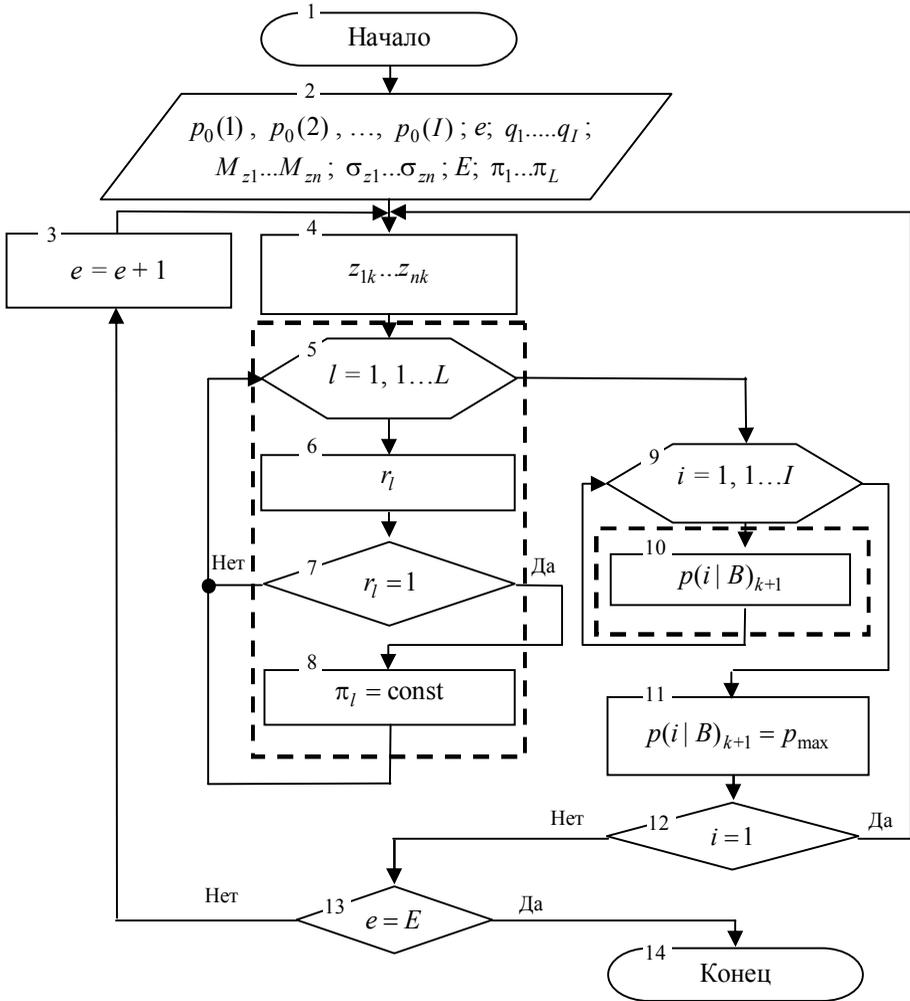


Рис. 2. Алгоритм распознавания СПО

Представлена ИИУС каналами передачи данных ЦРРС, включающая в свой состав две подсистемы: измерительную (ИП) и управляющую (УП). Структурная схема ИИУС представлена на рис. 3. Новыми элементами структуры ИИУС в измерительной подсистеме являются индикаторы сопутствующих признаков («Индикаторы»), добавляющие информацию о СПО и модуль

расчета вероятностей ситуаций СПО, реализующий расчет по формуле (21). В управляющей подсистеме новым элементом является модуль оценивания вероятностей ситуаций СПО и идентификации структуры каналов передачи данных, который в качестве действующей принимает ситуацию, имеющую максимальную апостериорную вероятность. По его сигналам осуществляется прекращение работы соответствующего канала и переключение на резервный канал ЦРРС.

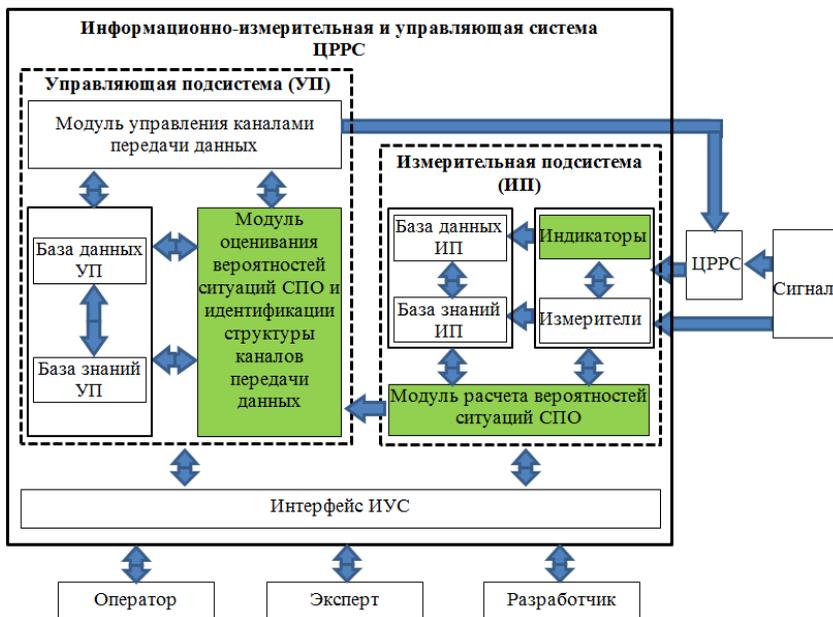


Рис. 3. Структурная схема ИИУС каналами передачи данных ЦРРС

В третьей главе представлены результаты исследования эффективности разработанного алгоритмического обеспечения ИИУС ЦРРС. В качестве критериев эффективности приняты быстродействие и достоверность. Эффективность алгоритмического обеспечения ИИУС ЦРРС по быстродействию определяется временем, затраченным на распознавание изменения ситуации СПО, обусловленного действием имитационных помех.

На рисунке 4, а в качестве примера показан фрагмент графиков изменения вероятностей при смене ситуации СПО с первой (беспомеховой) на пятую (наиболее вероятную помеховую), отражающих временные задержки в распознавании базового (без использования информации индикаторов сопутствующих признаков) и разработанного алгоритмов.

Показателем достоверности распознавания ситуаций СПО является вероятность принятия правильного решения. На рисунке 4, б показан фрагмент графиков, отражающих уровни вероятностей принятия правильного решения о ситуации СПО базовым и разработанным алгоритмами. Показано среднее увеличение

быстродействия обнаружения смены состояний при использовании информации индикаторов сопутствующих признаков на 16,2%. По результатам исследования вероятностей правильного принятия решения алгоритмами распознавания сделан вывод о превосходстве уровней вероятностей, полученных с помощью разработанного алгоритма на 12,5% , что и подтверждено графиками.

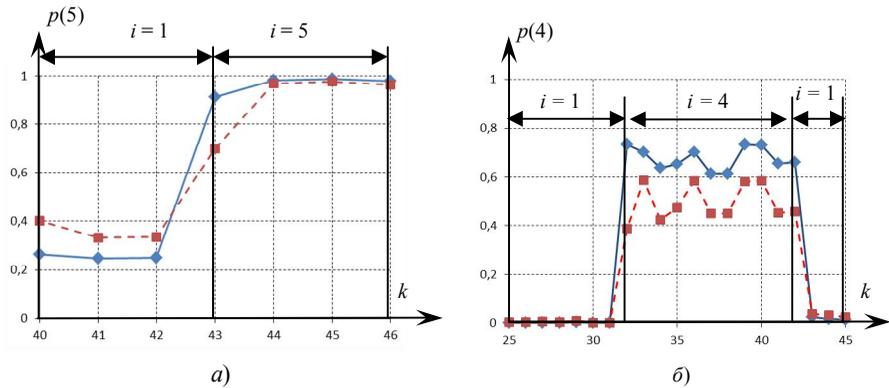


Рис. 4. Графики вероятностей разработанного (ромбические) и базового (пунктирный) алгоритмов:

a – при смене 1-й ситуации СПО на 5-ю; *б* – при смене 1-й ситуации СПО на 4-ю и обратно

Проведены исследования влияния несоответствия априорной вероятности ситуации СПО $p_0(5)$ и интенсивности перехода ситуации q_5 на показатели эффективности. Графики изменения вероятностей наиболее вероятных ситуаций (1-й и 5-й) показаны на рис. 5 и 6. Отмечено, что при формировании априорных данных следует стремиться к достижению баланса, обеспечивающего приемлемые показатели критериев эффективности при изменениях СПО.

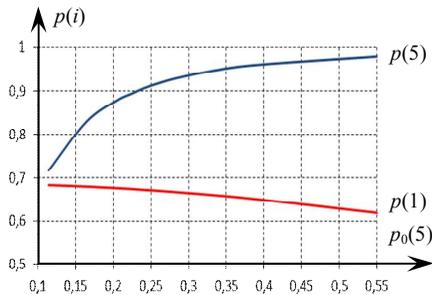


Рис. 5. Вероятности ситуаций СПО от изменения $p_0(5)$

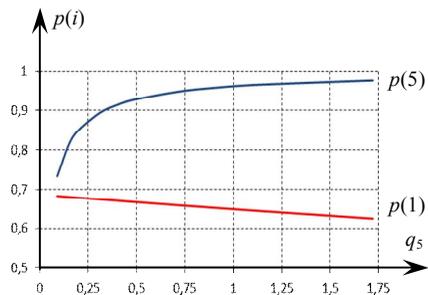


Рис. 6. Вероятности ситуаций СПО от изменения q_5

Проведены исследования влияния весовых коэффициентов индикаторов сопутствующих признаков π_1 и π_6 на показатели эффективности. Графики изменения апостериорных вероятностей при поочередном изменении π_1 и π_6

показаны на рис. 7. Влияние π_1 и π_6 на апостериорные вероятности при ложном срабатывании приведены на рис. 8.

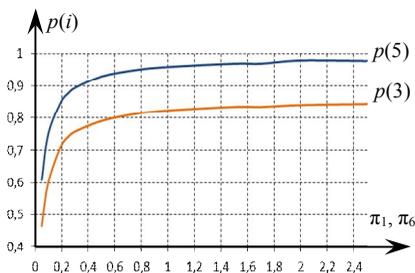


Рис. 7. Вероятности ситуаций СПО от изменения π_1, π_6

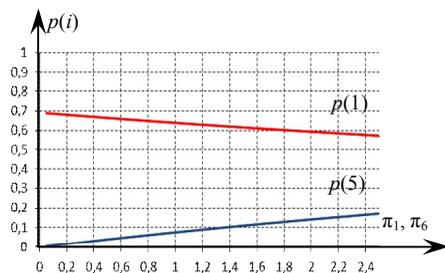


Рис. 8. Вероятности ситуаций СПО от изменения π_1, π_6 при ложном срабатывании

При ложном срабатывании индикаторов π_1 или π_6 происходит снижение вероятности правильного принятия решения алгоритмом для 1-й ситуации СПО менее чем на 0,1, что не является существенным для достоверного распознавания.

В **заключении** приведены результаты работы и основные выводы, указано на решение общей научной задачи и достижение поставленной цели.

В **приложении** вынесены таблицы исходных данных и результатов имитационного моделирования, акты об использовании результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Преднамеренно создаваемые имитационные помехи представляют чрезвычайную опасность передаваемым по радиорелейным каналам данным и обслуживаемым объектам.

2. Для защиты от имитационных помех необходимо выявление и использование информации признаков действия имитационных помех в принимаемом сигнале и управление работой соответствующих каналов передачи данных для предотвращения приема ложных данных.

3. Существующий научно-методический аппарат, используемый для распознавания ситуаций СПО, не способен в полной мере обеспечить требуемую устойчивость к действию имитационных помех, следствием чего являются большие задержки в распознавании и прием ложных данных.

4. Для сокращения времени, затрачиваемого на обнаружение изменения СПО, целесообразно использовать информацию индикаторов сопутствующих признаков.

5. Наиболее информативным при решении задачи распознавания ситуации СПО, учитывающим измерительную, индикаторную и априорную информации, является байесовский подход.

6. Модернизирован метод распознавания ситуации СПО и реализующее его алгоритмическое обеспечение ИИУС ЦРПС, которые позволяют сократить задержку в обнаружении действия имитационных помех за счет комплексирования информации измерителей и индикаторов сопутствующих признаков.

7. Для реализации метода распознавания ситуации СПО в структурную схему ИИУС ЦРПС введены индикаторы сопутствующих признаков, модуль расчета вероятностей ситуаций СПО, модуль оценивания ситуаций СПО и идентификации структуры каналов передачи данных.

8. Результаты моделирования подтвердили реализуемость и эффективность разработанного алгоритмического обеспечения ИИУС. Сокращение длительности задержки в обнаружении действия имитационных помех в некоторых случаях достигает 50%, а в среднем составляет 16,2% по сравнению с аналогичным алгоритмом без использования информации индикаторов сопутствующих признаков, что обеспечивает устойчивость ЦРПС на требуемом уровне.

9. Подход с использованием информации индикаторов сопутствующих признаков в алгоритме распознавания ситуаций СПО может быть применен и в других ИИУС, в том числе и более сложных.

10. Дальнейшие исследования целесообразно направить на повышение помехоустойчивости ЦРПС к действию имитационных помех во время дежурного приема.

В результате выполнения диссертационной работы **решена задача** повышения помехоустойчивости каналов передачи данных ЦРПС за счет своевременного обнаружения присутствия имитационной помехи в принимаемом сигнале путем модернизации метода распознавания и разработки реализующего его алгоритма, использующих дополнительно информацию индикаторов сопутствующих признаков.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России

1. **Павлов, В. И.** Оптимизация функционирования измерительных систем / В. И. Павлов, В. В. Аксенов, Т. В. Белова // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317, № 4. – С. 104 – 106. (Автором предложена математическая модель функционирования измерительной системы)

2. **Павлов, В. И.** Модель защищенного радиоканала для связи с удаленными стационарными объектами / В. И. Павлов, В. В. Аксенов, Т. В. Белова // Радиотехника. – 2010. – № 12. – С. 33 – 36. (Автором предложены способы борьбы с преднамеренными помехами)

3. **Аксенов, В. В.** Помехоустойчивость радиоканала связи с удаленными стационарными объектами / В. В. Аксенов, В. И. Павлов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 4. – С. 922 – 926. (Автором предложены модель сигнала, модель помехи, способы борьбы с помехами)

4. **Павлов, В. И.** Исследование устойчивости подсистемы измерения дальности многопозиционной РЛС двойного назначения к действию имитирующих помех / В. И. Павлов, Д. П. Швец, В. В. Аксенов // Радиотехника. – 2011. – № 12. – С. 25 – 30. (Автором получены результаты статистического компьютерного моделирования)

5. **Павлов, В. И.** Оптимизация функционирования измерительных систем, устанавливаемых на подвижные объекты / В. И. Павлов, В. В. Аксенов, Т. В. Аксенова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 821 – 826. (Автором предложена структура измерительной системы следящего типа)

6. **Аксенов, В. В.** Оценивание сигнально-помеховой обстановки радиорелейного канала передачи данных / В. В. Аксенов // Спецтехника и связь. – 2013. – № 3. – С. 45 – 48.

7. **Аксенов, В. В.** Алгоритм оценивания сигнально-помеховой обстановки в радиотехнических системах передачи данных / В. В. Аксенов, Т. В. Аксенова, В. И. Павлов // Радиотехника. – 2013. – № 9. – С. 102 – 107. (Автором предложены формула расчета апостериорных вероятностей и алгоритм оценивания ситуаций СПО)

Статьи и материалы конференций

8. **Аксенов, В. В.** Повышение помехоустойчивости канала радиосвязи / В. В. Аксенов // Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники : тез. докл. Всерос. научной школы. – Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2011. – С. 146–147.

9. **Аксенов, В. В.** Применение индикаторных функций для адаптации канала связи к помеховой обстановке / В. В. Аксенов // Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники : тез. докл. Всерос. научной школы. – Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2011. – С. 147–148.

10. **Аксенов, В. В.** Помехоустойчивость открытого радиоканала связи / В. В. Аксенов // Актуальные проблемы науки : сб. науч. тр. по материалам докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Ч. 2. – Тамбов : Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2011. – С. 9–10.

11. **Аксенов, В. В.** Имитационные помехи телекоммуникационным каналам связи. Тенденции и перспективы / В. В. Аксенов // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций : Материалы 17-й Междунар. науч.-техн. конф. – Рязань : Изд-во Рязанск. гос. радиотехн. ун-та, 2012. – С. 72 – 74.

12. **Аксенов, В. В.** Системы передачи информации в условиях действия имитационных помех. Проблемы и перспективы / В. В. Аксенов // Военно-воздушные силы – 100 лет на страже неба России: история, современное состояние и перспективы развития : сб. материалов докл. Всерос. науч.-практ. конф. – Воронеж : Изд-во ВАИУ, 2012. – Ч. 3. – С. 199–200.

13. **Аксенов, В. В.** Распознавание и оценивание помеховой обстановки в системах передачи и обработки информации / В. В. Аксенов // Военно-воздушные силы – 100 лет на страже неба России: история, современное состояние и перспективы развития : сб. материалов докл. Всерос. науч.-практ. конф. – Воронеж : Изд-во ВАИУ, 2012. – Ч. 3. – С. 200–201.

14. **Аксенов, В. В.** Концептуальное моделирование канала передачи информации, подверженного имитационному воздействию / В. В. Аксенов // Научные чтения имени Александра Степановича Попова : сб. ст. по материалам докл. регионал. науч.-практ. конф. курсантов, студентов, молодых ученых. – Воронеж : ВУНЦ ВВС «ВВА», 2012. – Вып. 1. – С. 120–121.

15. **Аксенов, В. В.** Анализ сигнально-помеховой обстановки в условиях имитационного воздействия / В. В. Аксенов // Научные чтения имени Александра Степановича Попова : сб. ст. по материалам докл. региональной НПК курсантов, студентов, молодых ученых, посвященной Дню образования войск связи. – Воронеж : ВУНЦ ВВС «ВВА», 2012. – Вып. 1. – С. 121 – 123.

16. **Аксенов, В. В.** Функционирование радиоканала передачи данных при действии имитационных помех / В. В. Аксенов // Информационные технологии XXI века : материалы Междунар. науч. конф. Хабаровск, 20 – 24 мая 2013. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – С. 182 – 187.

17. **Аксенов, В. В.** Байесовский подход в задаче скорейшего обнаружения изменения сигнально-помеховой обстановки / В. В. Аксенов // Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией : сб. ст. по материалам докл. Всерос. науч.-практ. конф. курсантов, слушателей, молодых ученых. – Воронеж : ВУНЦ ВВС «ВВА», 2013. – Вып. 1. – С. 273–274.

18. **Аксенов, В. В.** Концепция защиты систем связи от имитационных помех / В. В. Аксенов // Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией : сб. ст. по материалам докл. Всерос. науч.-практ. конф. курсантов, слушателей, молодых ученых. – Воронеж : ВУНЦ ВВС «ВВА», 2013. – Вып. 1. – С. 274 – 276.

Подписано в печать 23.04.2014.

Формат 60 × 84/16. 0,93 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 204

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»

392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14

Тел./факс (4752) 63-81-08, 63-81-33. E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru