

На правах рукописи



ГОЛПАЙЕГАНИ Лейла Абдолмаджид

Синтез, анализ и моделирование алгоритмов определения скачкообразных изменений статистических характеристик случайных процессов в условиях параметрической априорной неопределенности

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2019

Работа выполнена на кафедре электроники и нанoeлектроники Института радиотехники и электроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель:

Чернояров Олег Вячеславович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), г. Москва

Официальные оппоненты:

Трифонов Павел Андреевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, 51 кафедра радиоэлектронной борьбы и технического обеспечения частей РЭБ, доцент

Токарев Антон Борисович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, кафедра радиотехники, профессор

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород

Защита состоится 07 июня 2019 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д219.003.01 в Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики по адресу: 443090, г. Самара, Московское шоссе, 77.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» и на сайте www.psuti.ru/science/diss-ob.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д219.003.01
доктор физико-математических наук, доцент



Д.С. Ключев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из современных направлений статистической радиотехники является разработка методов синтеза и анализа оптимальных алгоритмов обнаружения и измерения случайных процессов, статистические характеристики которых скачкообразно меняются в некоторый момент времени. Однако, большая часть известных результатов (Бассвиль М., Бурнаев Е.В., Воробейчиков С.Э., Жиглявский А.А., Конев В.В., Красковский А.Е., Мальцев А.А., Никифоров И.В., Робертс С.В., Тартаковский А.Г., Ширяев А.Н. и др.) получена для случая неизвестного момента скачкообразного изменения и полной априорной определенности относительно остальных параметров, что в реальных условиях встречается достаточно редко. При этом помимо предположения о гауссовском характере реализации наблюдаемых данных часто накладываются дополнительные условия, такие как некоррелированность обрабатываемых отсчетов либо принадлежность анализируемого случайного процесса к некоторому узкому классу математических моделей (например, авторегрессионных) и пр. В относительно немногочисленных работах по статистическому обнаружению гауссовских случайных процессов и оценке их неизвестных скачкообразно меняющихся параметров описаны достаточно сложные итерационные алгоритмы, работоспособные только при весьма больших отношениях сигнал/шум (ОСШ). Кроме того, во многих случаях остается открытым вопрос о характеристиках синтезированных алгоритмов обработки, позволяющих аналитически оценить качество их функционирования.

Одной из весьма общих моделей случайных возмущений является быстрофлуктуирующий полосовой гауссовский случайный процесс со скачкообразно меняющимися частотно-энергетическими параметрами. Примерами таких сигналов могут служить излучаемый или отраженный радиолокационный сигнал, информационный сигнал в системах связи с шумовой несущей, сигнал, искаженный модулирующей помехой, сигнал, описывающий вспышку оптического шума, взрывного шума в транзисторах и др. Условие быстроты флуктуаций позволяет существенно упростить структуру приемного устройства, а также найти асимптотически точные аналитические выражения для его характеристик. Наиболее конструктивные результаты здесь получены проф. Трифоновым А.П. и его учениками. Однако в большинстве задач ими рассмотрены способы оптимальной и субоптимальной обработки не кусочно-стационарных случайных процессов, а случайных импульсов, появляющихся или исчезающих в неизвестный момент времени.

Таким образом, актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью развития общих подходов к синтезу технически простых алгоритмов определения скачкообразных изменений случайных процессов в условиях параметрической

априорной неопределенности, предложить структурные схемы соответствующих обнаружителей и измерителей, а также разработать способы аналитического определения их эффективности при заданных условиях и процедуры имитационного моделирования их работы, позволяющие установить границы применимости полученных теоретических результатов.

Разработанность темы исследования. Ряд задач по определению скачкообразного изменения статистических характеристик случайных процессов рассматривался и ранее. В частности, в работах Ванжи А.В., Силаева А.М., Трифонова А.П. и др. выполнен синтез и анализ байесовских и максимально правдоподобных алгоритмов обнаружения и оценки неизвестных момента появления и/или исчезновения прямоугольного квазидетерминированного и стохастического (гауссовского) импульсного сигнала, наблюдаемого на фоне гауссовского белого шума. Далее в работах Трифонова А.П. и его учеников (Захарова А.В., Проняева Е.В. и др.) выполнено обобщение указанных результатов на случай приема импульсов с неизвестными временными и энергетическими параметрами. Ограниченность полученных здесь результатов состоит в предположении, что априори задано направление изменения (увеличение или уменьшение) значений энергетических параметров при разладке. В работах Мальцева А.А. и Силаева А.М. предложен общий подход, позволяющий синтезировать алгоритмы обнаружения и оценки параметров сигнала со скачкообразными изменениями в M (где M – произвольное число) случайных моментов времени; найдена структура и характеристики соответствующих обнаружителей и измерителей. Однако при этом для определения моментов разладки следует решать достаточно сложные нелинейные стохастические дифференциальные уравнения. В работах Бассвиль М., Никифорова И.В., Жиглявского А.А., Красковского А.Е. и др. для обнаружения скачкообразных изменений значений параметров квазидетерминированных и стохастических сигналов рассмотрены различные варианты алгоритма кумулятивных сумм. К сожалению, их применение при наличии неизвестных параметров анализируемого случайного процесса, как правило, сводится к необходимости реализации вычислительно трудоемких итерационным процедур, работоспособных только при весьма малом уровне помех. В ряде других работ (Буркатовская Ю.Б., Воробейчиков С.Э., Конев В.В. и др.) синтез алгоритмов определения скачкообразных изменений статистических характеристик реализации наблюдаемых данных выполнен в основном для некоторых узких классов случайных процессов (авторегрессии, с некоррелированными отсчетами и пр.). Это существенно снижает область применения полученных результатов. Кроме того, во многих указанных случаях остается открытым вопрос о количественных показателях эффективности предложенных алгоритмов. Наконец, в работах Черноярова О.В., Сальниковой А.В., Сай Си Ту Мин предложены достаточно общие подходы для получения технически простых

обнаружителей и измерителей разладки быстрофлуктуирующих гауссовских сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности с аналитическим определением качества их функционирования. Однако решенный там класс задач сводится к определению скачкообразного изменения неизвестного среднего значения низкочастотного случайного процесса и скачкообразного изменения неизвестной средней мощности высокочастотного случайного процесса.

Объектом исследования являются случайные процессы со скачкообразным изменением параметров в неизвестный момент времени.

Предметом исследования являются способы обнаружения и измерения момента разладки и неизвестных скачкообразно меняющихся параметров случайных процессов с аналитическим определением эффективности функционирования синтезированных приемных устройств.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью работы является разработка способов и алгоритмов статистического анализа случайных процессов со скачкообразным изменением неизвестных параметров; получение с использованием развитых подходов структурно более простых (по сравнению с синтезированными на основе известных методик) обнаружителей и измерителей кусочно-стационарных стохастических сигналов с аналитическим определением характеристик качества их функционирования.

Для реализации этой цели в работе поставлены и решены следующие основные задачи:

1) развита общая методика синтеза и анализа алгоритмов обработки быстрофлуктуирующих разрывных случайных сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности.

На основе развитых подходов

2) предложены новые обнаружители и измерители скачкообразного изменения неизвестных параметров низкочастотных информационных процессов, допускающих практическую реализацию в виде одноканальных устройств;

3) найдены замкнутые аналитические выражения для точностных характеристик синтезированных обнаружителей и измерителей;

4) посредством статистического имитационного моделирования подтверждена работоспособность и эффективность синтезированных обнаружителей и измерителей, а также определены погрешности приближенных формул, описывающих качество их функционирования;

5) найдены потери в качестве оценки неизвестного параметра при ошибке в выборе модели принимаемого информационного сигнала.

Методы проведения исследования. При решении поставленных в диссертации задач использовались классические и современные методы статистической радиотехники, а именно, методы теории вероятностей и математической статисти-

ки, аппарат теории марковских случайных процессов, методы теории проверки статистических гипотез и теории оценок параметров (включая метод локально-марковской аппроксимации, метод Ибрагимова-Хасьминского и их обобщения), аналитические методы математического анализа, численные методы и методы программирования. Экспериментальные исследования выполнялись методами статистического имитационного моделирования на ЭВМ.

Научная новизна. В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Общие способы синтеза алгоритмов обнаружения и измерения скачкообразных изменений неизвестных параметров кусочно-стационарных быстрофлуктуирующих низкочастотных случайных процессов, основанные на пренебрежении величинами порядка и менее времени корреляции наблюдаемого случайного процесса. Использование предложенных подходов позволяет получать практически реализуемые алгоритмы обработки, технически более простые по сравнению с известными аналогами.

2. Методика статистического анализа алгоритмов обнаружения и измерения разладки быстрофлуктуирующих низкочастотных случайных процессов с неизвестными параметрами, с применением которой удастся найти аналитические формулы для теоретического расчета характеристик их функционирования, в том числе с учетом аномальных эффектов.

3. Новая методика аналитического определения предельных законов распределения и моментов оценки параметра сигнала при ошибке в выборе типа (регулярности) модели. Найденные на основе данной методики новые скорости сходимости оценок параметров сигналов при различных свойствах регулярности моделей принимаемого и опорного сигналов.

4. Полученные с помощью указанных методов новые алгоритмы обработки кусочно-стационарных низкочастотных случайных процессов со скачкообразно изменяющимися параметрами, а именно:

- адаптивный (по методу максимального правдоподобия) алгоритм обнаружения скачкообразного изменения неизвестной средней мощности случайного процесса,

- максимально правдоподобный алгоритм оценки момента скачкообразного изменения неизвестной средней мощности случайного процесса и ее значений до и после разладки,

- адаптивный (по методу максимального правдоподобия) алгоритм обнаружения скачкообразного изменения неизвестных среднего значения и средней мощности случайного процесса,

- максимально правдоподобный алгоритм оценки момента разладки и неизвестных скачкообразно меняющихся среднего значения и средней мощности случайного процесса,

– адаптивный (по методу максимального правдоподобия) алгоритм обнаружения неизвестного скачкообразного изменения полосы частот случайного процесса,

– максимально-правдоподобный алгоритм оценки момента разладки и неизвестного скачкообразного изменения полосы частот случайного процесса, а также характеристики эффективности этих алгоритмов.

5. Методики статистического имитационного моделирования алгоритмов обработки разрывных случайных процессов с неизвестными параметрами, позволяющие экономить машинное время при реализации соответствующих обнаружителей и измерителей на ЭВМ, а также повысить быстродействие проектируемых радиотехнических систем.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы заключается в том, что они могут быть использованы для проектирования новых и усовершенствования имеющихся радиотехнических систем (радиолокации, связи, мониторинга, технической диагностики и др.), реализующих в процессе своего функционирования процедуры обнаружения и измерения разрывных случайных процессов с неизвестными параметрами. Найденные в работе аналитические выражения для количественного расчета показателей эффективности работы предлагаемых измерителей и обнаружителей стохастических сигналов, характеристики которых описываются ступенчатыми функциями, позволяют сделать обоснованный выбор между этими и другими устройствами обработки в зависимости от ограничений, обусловленных требуемыми точностными характеристиками устройства обработки и возможностями его технической реализации, а также в зависимости от объема имеющихся априорных данных. Результаты работы могут быть использованы при

- обработке радио-, гидролокационных и оптических сигналов,
- проектировании перспективных локационных и связных систем, использующих в качестве информационных сигналов импульсы с шумовой несущей,
- проектировании систем мониторинга радиосигналов сложной формы, систем телеуправления и телесигнализации,
- анализе сигналов в технической и медицинской диагностике,
- исследовании физических и статистических свойств природных и искусственных объектов по их спонтанным и вынужденным импульсным откликам,
- аппаратурном анализе случайных процессов.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

– применение развитых методик статистического синтеза алгоритмов обработки случайных процессов в условиях быстрых флуктуаций реализации наблюдаемых данных позволяет разрабатывать обнаружители и измерители скачкообразных изменений статистических характеристик анализируемых стохастических сигналов в условиях различной параметрической априорной неопределенности, с

возможностью их практической реализации в виде одноканальных устройств, технически более простых по сравнению с получаемыми на основе известных подходов;

– разработанные методики статистического анализа алгоритмов обработки информационных случайных процессов со скачкообразным изменением в неизвестный момент времени одного или нескольких неизвестных параметров позволяют (в отличие от известных способов) теоретически рассчитать количественные характеристики качества их функционирования, в том числе с учетом аномальных эффектов;

– предложенные новые максимально правдоподобные алгоритмы обработки кусочно-стационарных случайных процессов позволяют практически реализовывать обнаружители и измерители их момента разладки и неизвестных скачкообразно меняющихся параметров с минимальными требованиями к аппаратным ресурсам и в условиях высокой апостериорной точности, если удастся достичь выходных ОСШ, больших 4;

– найденные приближенные (асимптотически точные) формулы для характеристик эффективности функционирования синтезированных алгоритмов обработки кусочно-стационарных случайных процессов удовлетворительно описывают соответствующие реальные характеристики в широком диапазоне выходных ОСШ и дают возможность теоретически сделать обоснованный выбор между предложенными и другими алгоритмами в зависимости от требований, предъявляемых к степени простоты аппаратной реализации алгоритма обработки и качеству его работы;

– разработанные методики моделирования синтезированных алгоритмов обнаружения и измерения разладки информационных случайных процессов позволяют оптимизировать вычислительные и временные затраты при программной и аппаратной реализации алгоритмов, полученные с их помощью экспериментальные результаты подтверждают корректность и достоверность сформулированных в работе теоретических выводов и рекомендаций;

– развитый метод статистического анализа характеристик оценки информационного параметра сигнала при различных свойствах регулярности принимаемого и опорного сигналов позволяет аналитические (в отличие от известных результатов) определить потери в точности выносимой оценки, синтезированной с помощью байесовского или максимально правдоподобного подходов, при ошибке в выборе модели анализируемого процесса.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением апробированных современных математических методов статистической радиотехники, удовлетворительным согласованием представленных теоретических расчетов с экспериментальными данными, полученными с помощью статистического моде-

лирования на ЭВМ, совпадением полученных в диссертации новых результатов с известными ранее в ряде частных и предельных случаев.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует пункту 1 «Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки радиосигналов в радиосистемах телевидения и связи при наличии помех. Разработка методов разрушения и защиты информации» и пункту 7 «Разработка методов и устройств передачи, приема, обработки, отображения и хранения информации. Разработка перспективных информационных технологий, в том числе цифровых, а также с использованием нейронных сетей для распознавания изображений в радиотехнических устройствах» паспорта специальности 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Тема и содержание диссертации соответствуют отрасли технических наук.

Внедрение научных результатов. Представленные в диссертационной работе результаты использовались при выполнении проектной части государственного задания Министерства образования и науки РФ (проект № 2.3208.2017/4.6).

Апробация работы. Результаты исследований, приведенные в диссертации, были представлены в виде докладов и обсуждались на

1. 11-й и 12-й Международной конференции «ELEKTRO», Словакия, 2016 г., 2018 г.

2. Международных научно-технических семинарах с элементами научной школы для молодых ученых «Методы статистического синтеза, анализа и моделирования алгоритмов обработки сигналов, изображений и полей», «Обнаружение изменений свойств сигналов и динамических систем», Москва, 2016 г.

3. 4-й Международной конференции по машиностроению и технологиям роста машиностроения (METMG 2017), Сингапур, 2017 г.

4. 3-й Международной конференции по вопросам обработки сигналов (ICFSP2017), Франция, 2017 г.

5. Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2017», Москва, 2017 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, 4 текста докладов в сборниках трудов международных научных конференций, индексируемых в международных базах Web of Science/Scopus, 1 статья в журнале, индексируемом в международной базе MathSciNet, 1 текст доклада в сборнике материалов международной научно-технической конференции, индексируемом в РИНЦ, 1 патент на изобретение.

Личный вклад соискателя. Соискателем самостоятельно найдены базовые выражения для решающих статистик алгоритмов статистического анализа скачкообразных изменений низкочастотных гауссовских процессов в условиях параметрической априорной неопределенности. При разработке новых алгоритмов обнаружения и оценки момента разладки и скачкообразно изменяющихся параметров случайных процессов соискателю принадлежит конкретизация решения задач синтеза, анализ и интерпретация полученных результатов в виде радиотехнических устройств, а также проведение моделирования на ЭВМ синтезированных алгоритмов обработки. Основные результаты, представленные в диссертации, получены соискателем лично.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников, состоящего из 91 наименования, двух приложений. Объем диссертации составляет 156 страниц, включая 122 страницы основного текста, 11 страниц списка использованных источников, 23 страницы приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность темы исследований, приведен краткий обзор известных результатов по теме диссертации. Сформулирована цель работы и в аннотированном виде изложены основные результаты работы.

В первом разделе диссертации рассмотрена задача обнаружения и измерения разладки средней мощности низкочастотного быстрофлуктуирующего гауссовского процесса. Аналитически процесс с возможным скачкообразным изменением средней мощности в момент времени λ_0 можно представить следующим образом:

$$\xi(t) = a + [\sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1)\theta(t - \lambda_0)]v(t). \quad (1)$$

В (1) обозначено: $\theta(t) = 0$ при $t < 0$ и $\theta(t) = 1$ при $t \geq 0$ – функция Хевисайда, a – среднее значение процесса $\xi(t)$, σ_1^2 и σ_2^2 – средняя мощность процесса $\xi(t)$ при $t < \lambda_0$ и $t \geq \lambda_0$ соответственно, а $v(t)$ – стационарный гауссовский случайный процесс с нулевым средним значением и средней мощностью, равной 1. Полагаем, что случайный процесс $v(t)$ занимает всю рабочую полосу частот Ω , так что его спектральную плотность можно представить как

$$G(\omega, \Omega) = \frac{2\pi}{\Omega} \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \Omega/2, \\ 0, & |\omega| > \Omega/2. \end{cases} \quad (2)$$

Будем считать, что в качестве модели помех и погрешностей регистрации процесса (1) может быть использован аддитивный гауссовский белый шум $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 . В результате на вход приемного устройства поступает смесь

$$x(t) = \xi(t) + n(t), \quad t \in [0, T]. \quad (3)$$

Кроме того, полагаем, что время корреляции процесса $\xi(t)$ достаточно мало, так что выполняется условие $\mu_{\min} = T_{\min}\Omega/4\pi \gg 1$, т.е., флуктуации процесса $\xi(t)$ являются «быстрыми». Здесь $T_{\min} = \min(\lambda_0, T - \lambda_0)$. На основе наблюдаемой реализации (3) и имеющейся априорной информации необходимо вынести решение о наличии или отсутствии скачкообразного изменения средней мощности процесса $\xi(t)$ и измерить (оценить) его параметры $\lambda_0 \in [\Lambda_1, \Lambda_2]$, $\sigma_1^2 \geq 0$, $\sigma_2^2 \geq 0$.

При синтезе алгоритма обнаружения скачкообразного изменения средней мощности процесса $\xi(t)$ сформулируем две гипотезы: 1) гипотеза H_0 , состоящая в том, что $\sigma_1 = \sigma_2$, т.е. разладка отсутствует; 2) гипотеза H_1 , состоящая в том что $\sigma_1 \neq \sigma_2$, т.е. разладка имеется. При решении задачи проверки гипотез воспользуемся методом максимального правдоподобия. Согласно этому методу были найдены достаточно простые аппроксимации решающих статистик – логарифмов функционалов отношения правдоподобия (ФОП) – для сформулированных альтернатив и выполнена их аналитическая максимизация по неизвестным регулярным параметрам. Это позволило получить максимально правдоподобный алгоритм обнаружения скачкообразного изменения неизвестной средней мощности гауссовского случайного процесса вида

$$\max_{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2]} M(\lambda) \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} c, \quad M(\lambda) = \ln[M_3/M_2(\lambda)] - (\lambda/T)\ln[M_1(\lambda)/M_2(\lambda)]. \quad (4)$$

Здесь обозначено:

$$M_1(\lambda) = \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda \overset{\circ}{y}^2(t) dt, \quad M_2(\lambda) = \frac{1}{T-\lambda} \int_\lambda^T \overset{\circ}{y}^2(t) dt, \quad M_3 = \frac{1}{T} \int_0^T \overset{\circ}{y}^2(t) dt, \quad (5)$$

$\overset{\circ}{y}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \overset{\circ}{x}(t') h(t-t') dt'$ – отклик фильтра, передаточная функция $H(\omega)$ которого удовлетворяет условию $|H(\omega)|^2 = \Omega G(\omega, \Omega)/2\pi$, на входное воздействие $\overset{\circ}{x}(t) = x(t) - a$, а c – порог, рассчитываемый в соответствии с выбранным критерием оптимальности. Из выражений (5) следует, что для реализации алгоритма (4) не требуется знания спектральной плотности белого шума.

Положим теперь, что средняя мощность случайного процесса $\xi(t)$ меняется скачком на интервале $[\Lambda_1, \Lambda_2]$ и по наблюдаемой реализации необходимо измерить момент ее скачкообразного изменения λ_0 и значения параметров σ_1^2 , σ_2^2 . Используя найденное представление решающей статистики $M(\lambda)$ в виде (4), (5), для оценок максимального правдоподобия (ОМП) λ_m , σ_{1m}^2 , σ_{2m}^2 момента скачко-

образного изменения λ_0 и средней мощности до и после разладки σ_1^2 , σ_2^2 получаем

$$\lambda_m = \arg \max_{\lambda \in [\Lambda_1 \Lambda_2]} M(\lambda), \quad \sigma_{im}^2 = M_i(\lambda_m) - E_N, \quad i = 1, 2. \quad (6)$$

Здесь $E_N = N_0 \Omega / 4\pi$ – средняя мощность шума $n(t)$ в полосе частот Ω .

Для определения эффективности работы предложенных алгоритмов обнаружения (4) и оценивания (6) с помощью метода локально-марковской аппроксимации были найдены асимптотически точные (с ростом μ_{\min}) выражения для вероятностей ложной тревоги α и пропуска разладки β (при обнаружении скачкообразного изменения средней мощности) и условных смещений и рассеяний выносимых оценок временного и энергетических параметров (при измерении разладки средней мощности).

Экспериментальная проверка качества функционирования обнаружителя (4) и измерителя (6) осуществлялась методами статистического моделирования на ЭВМ. Установлено, что полученные теоретические зависимости для вероятностей α , β и рассеяния $V(\lambda_m | \lambda_0) = \langle (\lambda_m - \lambda_0)^2 \rangle$ оценки момента разладки λ_m хорошо соответствуют экспериментальным данным, по крайней мере, при $\mu = T\Omega/4\pi \geq 100$, $|\Delta q| = |\sigma_2^2 - \sigma_1^2|/E_N \geq 0$, $\Lambda_1 \geq 0,05T$, $\Lambda_2 \leq 0,95T$. При $|\Delta q| > 3$ наблюдается расхождение теоретических и экспериментальных значений рассеяния $V(\lambda_m | \lambda_0)$. Это связано с тем, что формулы для характеристик (регулярной составляющей и корреляционной функции шумовой составляющей) решающей статистики $M(\lambda)$ (4) удается получить лишь в пренебрежении величинами порядка времени корреляции процесса $\xi(t)$. Таким образом, когда значения нормированного рассеяния $V(\lambda_m | \lambda_0)/T^2$ оказываются сопоставимыми с величинами порядка μ_{\min}^{-2} , погрешность указанных формул может быть весьма значительной. Полученные аналитические выражения для рассеяний оценок σ_{1m}^2 , σ_{2m}^2 удовлетворительно согласуются с соответствующими экспериментальными данными при выходных ОСШ (по напряжению), больших 4, когда оценка момента разладки λ_m является надежной.

Во втором разделе выполнен синтез, анализ и моделирование алгоритмов обнаружения и измерения скачкообразного изменения неизвестных среднего значения и средней мощности быстрофлуктуирующего низкочастотного случайного процесса в неизвестный момент времени. Представим аналитически разладку в некоторый момент времени λ_0 среднего значения и средней мощности гауссовского случайного процесса $\xi(t)$ следующим образом:

$$\xi(t) = a_{01} + (a_{02} - a_{01})\theta(t - \lambda_0) + [\sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1)\theta(t - \lambda_0)]v(t). \quad (7)$$

Здесь, как и ранее, $\theta(t)$ – функция Хевисайда (1), a_{01} , a_{02} и σ_1^2 , σ_2^2 – средние значения и средние мощности процесса $\xi(t)$ при $t < \lambda_0$ и $t \geq \lambda_0$ соответственно, а $v(t)$ – стационарный гауссовский случайный процесс с нулевым средним значением и спектральной плотностью вида (2).

Помехи и погрешности регистрации процесса (7) аппроксимируем гауссовским белым шумом $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 . Таким образом, на интервале $t \in [0, T]$ наблюдается аддитивная смесь вида

$$x(t) = \xi(t) + n(t), \quad t \in [0, T]. \quad (8)$$

Полагаем, что процесс $\xi(t)$ является быстрофлуктуирующим, так что выполняется условие $\mu_{\min} = T_{\min}\Omega/4\pi \gg 1$, где $T_{\min} = \min(\lambda_0, T - \lambda_0)$. По реализации (8) необходимо обнаружить момент разладки и оценить параметры $\lambda_0 \in [\Lambda_1, \Lambda_2]$, σ_1 , σ_2 .

При синтезе алгоритма обнаружения разладки среднего значения и средней мощности процесса $\xi(t)$ выделялось три возможных случая: 1) гипотеза H_0 : $a_{01} = a_{02}$, $\sigma_1 = \sigma_2$, т.е. разладка отсутствует; 2) гипотеза H_1 : $a_{01} \neq a_{02}$, $\sigma_1 > \sigma_2$; 3) гипотеза H_2 : $a_{01} \neq a_{02}$, $\sigma_2 > \sigma_1$. При решении задачи проверки гипотез использовался метод максимального правдоподобия, в соответствии с которым были найдены выражения решающих статистик (логарифмов ФОП) для сформулированных альтернатив и выполнена аналитически их максимизация по неизвестным регулярным параметрам. Таким образом, было получено правило обнаружения вида

$$\max_{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2]} M(\lambda) \begin{array}{l} \text{\scriptsize } H_1 \text{ или } H_2 \\ > \\ \text{\scriptsize } H_0 \end{array} c, \quad M(\lambda) = \ln[M_3/M_2(\lambda)] - (\lambda/T)\ln[M_1(\lambda)/M_2(\lambda)], \quad (9)$$

которое является инвариантным к спектральной плотности белого шума, а также к направлению (увеличению или уменьшению) изменения среднего значения и средней мощности случайного процесса. В (9) обозначено:

$$\begin{aligned} M_1(\lambda) &= Y_1(\lambda) - X_1^2(\lambda), & M_2(\lambda) &= Y_2(\lambda) - X_2^2(\lambda), & M_3 &= Y_3 - X_3^2, & (10) \\ Y_1(\lambda) &= \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda y^2(t) dt, & X_1(\lambda) &= \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda x(t) dt, & Y_2(\lambda) &= \frac{1}{T-\lambda} \int_\lambda^T y^2(t) dt, \\ X_2(\lambda) &= \frac{1}{T-\lambda} \int_\lambda^T x(t) dt, & Y_3 &= \frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt, & X_3 &= \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt, \end{aligned}$$

$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t')h(t-t')dt'$ – отклик фильтра, определяемого так же как в (5), а c – порог, рассчитываемый в соответствии с выбранным критерием оптимальности.

Положим теперь, что среднее значение и средняя мощность случайного процесса $\xi(t)$ неизвестны и изменяются скачком на интервале $[\Lambda_1, \Lambda_2]$. По наблюдаемой реализации (8) необходимо измерить момент их разладки λ_0 , а также значения энергетических параметров a_{01} , a_{02} , σ_1^2 , σ_2^2 . Используя найденное представление решающей статистики $M(\lambda)$ в виде (9), (10), для ОМП λ_m , σ_{1m}^2 , σ_{2m}^2 параметров λ_0 , a_{01} , a_{02} , σ_1^2 , σ_2^2 находим

$$\begin{aligned} \lambda_m &= \arg \max_{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2]} \{ \ln[M_3/M_2(\lambda)] - (\lambda/T) \ln[M_1(\lambda)/M_2(\lambda)] \}, \\ a_{1m} &= X_1(\lambda_m), \quad a_{2m} = X_2(\lambda_m), \\ \sigma_{1m}^2 &= M_1(\lambda_m) - E_N, \quad \sigma_{2m}^2 = M_2(\lambda_m) - E_N, \end{aligned} \quad (11)$$

где E_N определяется так же, как в (6).

Для определения эффективности работы предложенных алгоритмов обнаружения (9) и оценивания (11) с помощью совместного применения метода малого параметра и метода локально-марковской аппроксимации были найдены асимптотически точные (с ростом μ_{\min}) выражения для вероятностей ложной тревоги α и пропуска разладки β (при обнаружении скачкообразного изменения среднего значения и средней мощности) и условных смещений и рассеяний выносимых оценок временного и энергетических параметров (при измерении разладки среднего значения и средней мощности).

Экспериментальная проверка качества функционирования обнаружителя (9) и измерителя (11) выполнялась посредством статистического моделирования их работы на ЭВМ. Некоторые результаты статистического моделирования, а также соответствующие им теоретические кривые, полученные при $l_0 = \lambda_0/T = 0,75$, $\tilde{\Lambda}_1 = 0,05$, $\tilde{\Lambda}_2 = 0,95$ ($\tilde{\Lambda}_{1,2} = \Lambda_{1,2}/T$) представлены на рис. 1-6.

На рис. 1 сплошными линиями показаны теоретические зависимости вероятности пропуска сигнала $\beta(\Delta q)$ от величины разладки $\Delta q = q_2 - q_1$ нормированной средней мощности процесса $\xi(t)$ (7) при фиксированном значении $q_1 = 0,1$. Здесь $q_i = \sigma_i^2/E_N$, $i = 1,2$. Расчет величины порога c осуществлялся в соответствии с критерием Неймана-Пирсона при выбранном уровне вероятности ложной тревоги, равном 0,01. На рис. 2 штриховыми и сплошными линиями нанесены соответственно теоретические зависимости условных рассеяния V_{0l} нормированной надежной оценки $l_m = \lambda_m/T$ и рассеяния V_l оценки l_m с учетом аномальных ошибок как функций разладки Δq при $q_1 = 0,1$. Наконец, на рис. 3-6 приведены теоретические зависимости нормированных условных рассеяний V_{z1} , V_{z2} норми-

рованных оценок $a_{1m}\sqrt{2T/N_0}$, $a_{2m}\sqrt{2T/N_0}$ и V_{q1} , V_{q2} нормированных оценок σ_{1m}^2/E_N , σ_{2m}^2/E_N как функций значений q_1 и q_2 .

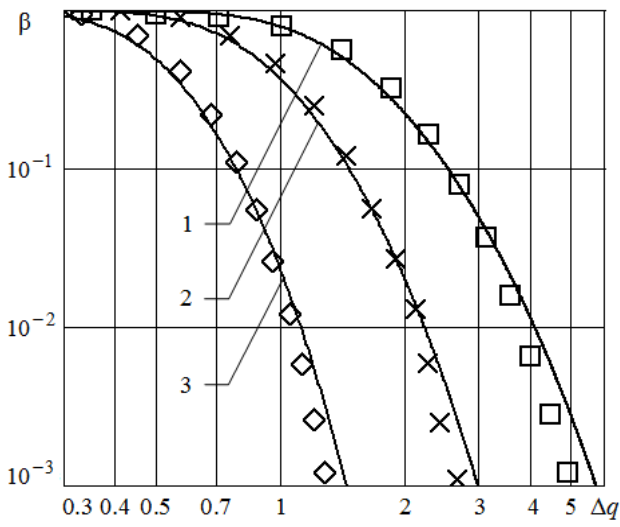


Рис. 1.

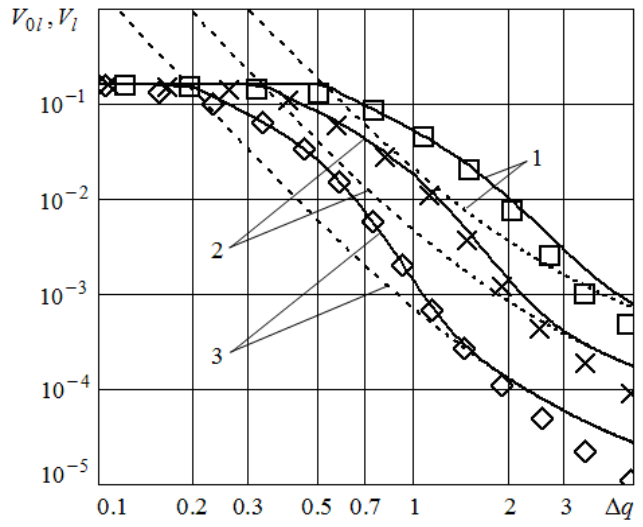


Рис. 2.

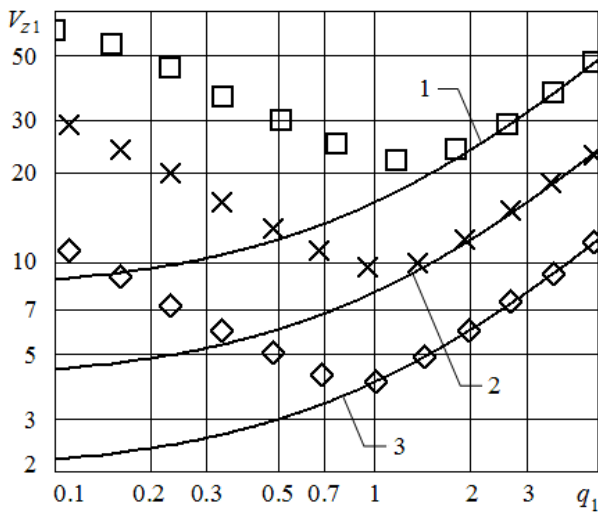


Рис. 3.

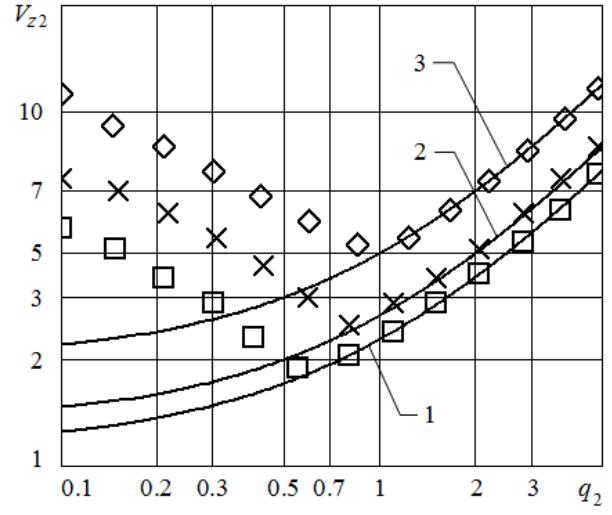


Рис. 4.

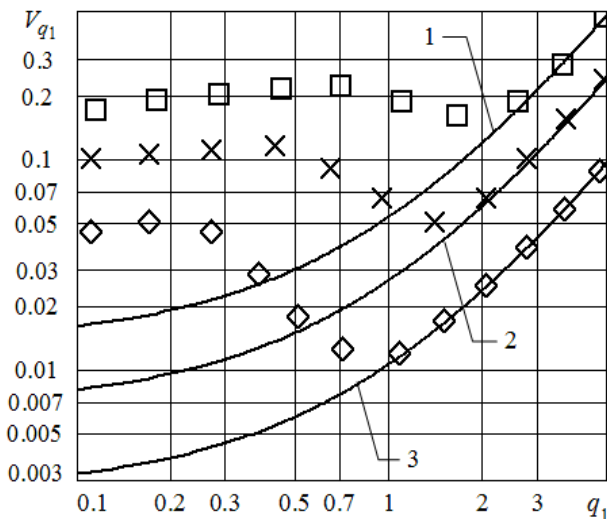


Рис. 5.

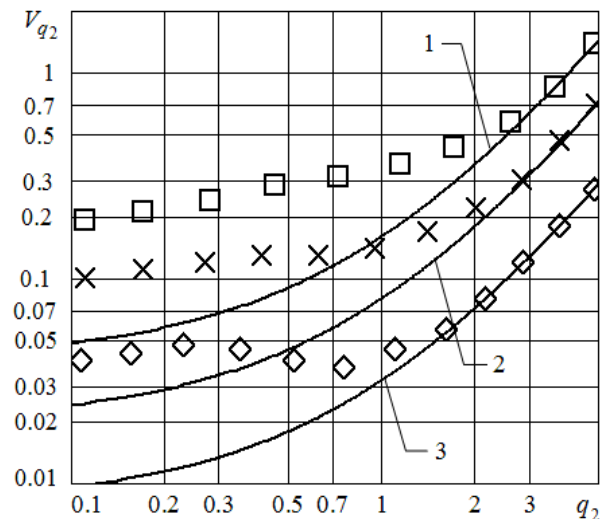


Рис. 6.

Кривые 1 на рис. 1-6 построены при $\mu = 100$, 2 – $\mu = 200$, 3 – $\mu = 500$, где $\mu = T\Omega/4\pi$. Экспериментальные значения характеристик обнаружения и оценивания обозначены квадратами, крестиками и ромбами соответственно для $\mu = 100$, 200 и 500.

Как следует из рис. 1-6 и дополнительного проведенного анализа, полученные теоретические зависимости для вероятностей α , β и рассеяния V_l оценки l_m с учетом аномальных ошибок хорошо соответствуют экспериментальным данным, по крайней мере, при $\mu \geq 100$, $|\Delta q| \geq 0$, $\tilde{\Lambda}_1 \geq 0,05$, $\tilde{\Lambda}_2 \leq 0,95$. При $|\Delta q| > 3$ наблюдается расхождение теоретических и экспериментальных значений рассеяния V_l (V_{0l}). Это объясняется тем, что в выводе формул для характеристик функционала $M(\lambda)$ были опущены величины порядка времени корреляции процесса $\xi(t)$. Таким образом, когда значения рассеяния нормированной ОМП l_m оказываются сопоставимыми с величинами порядка μ_{\min}^{-2} , погрешность указанных формул может быть весьма значительной. Найденные аналитические выражения для рассеяний оценок a_{1m} , a_{2m} , σ_{1m}^2 , σ_{2m}^2 энергетических параметров случайного процесса удовлетворительно согласуются с соответствующими экспериментальными данными при выходных ОСШ (по напряжению), больших 4, когда оценка момента их скачкообразного изменения λ_m является надежной с вероятностью, близкой к 1.

Третий раздел посвящен исследованию алгоритмов обнаружения и измерения неизвестного скачкообразного изменения ширины полосы частот низкочастотного гауссовского процесса. Аналитически такой процесс можно представить следующим образом:

$$\xi(t) = [1 - \theta(t - \lambda_0)]v_1(t) + \theta(t - \lambda_0)v_2(t). \quad (12)$$

Здесь $\theta(t)$ – функция Хевисайда (1), λ_0 – момент возможной разладки, а $v_i(t)$, $i = 1, 2$ – статистически независимые стационарные гауссовские случайные процессы со средними значениями a и спектральными плотностями $G_i(\omega) = (d\Omega_{0i}/4\pi)G(\omega, \Omega_{0i})$, где Ω_{0i} – ширина полосы частот, d – величина спектральной плотности (интенсивность) процесса $v_i(t)$, а $G(\omega, \Omega)$ определяется из (2).

Помехи и погрешности регистрации процесса (12) аппроксимируем гауссовским белым шумом $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 . Таким образом, на интервале $t \in [0, T]$ наблюдается аддитивная смесь вида

$$x(t) = \xi(t) + n(t), \quad t \in [0, T]. \quad (13)$$

На основе наблюдаемой реализации (13) необходимо вынести решение о наличии или отсутствии разладки ширины полосы частот процесса $\xi(t)$ и измерить пара-

метры λ_0 и Ω_{02} , принимающие значения из априорных интервалов $[\Lambda_1, \Lambda_2]$, $[Y_1, Y_2]$. При этом будем считать, что $Y_1 < \Omega_{01} < Y_2$ (Ω_{01} – внутренняя точка интервала $[Y_1, Y_2]$), а флуктуации процесса $\xi(t)$ являются «быстрыми», так что выполняется условие $\mu_{\min} = T_{\min} Y_1 / 4\pi \gg 1$, где $T_{\min} = \min(\lambda_0, T - \lambda_0)$.

При синтезе алгоритма обнаружения разладки ширины полосы процесса $\xi(t)$ выделялось два возможных случая: 1) гипотеза $H_0: \Omega_{01} = \Omega_{02}$, т.е. разладка отсутствует; 2) гипотеза $H_1: \Omega_{01} \neq \Omega_{02}$. Для решения задачи проверки гипотез использовался метод максимального правдоподобия, в соответствии с которым были найдены достаточно простые аппроксимации логарифмов ФОП для сформулированных альтернатив и получено решающее правило вида

$$\max_{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2], \Omega \in [Y_1, Y_2]} L(\lambda, \Omega) > c, \quad L(\lambda, \Omega) = \int_{\lambda}^T [y^2(t, \Omega) - y^2(t, \Omega_{01})] dt - A(\Omega)(T - \lambda). \quad (14)$$

Здесь $A(\Omega) = [N_0(N_0 + d)(\Omega - \Omega_{01}) / 4\pi d] \ln(1 + d/N_0)$.

В задаче оценки момента и величины разладки ширины полосы частот процесса $\xi(t)$ было показано, что нормированные ОМП λ_m/T , Ω_m/Ω_{01} параметров λ_0 , Ω_{02} , где

$$(\lambda_m, \Omega_m) = \max_{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2], \Omega \in [Y_1, Y_2]} L(\lambda, \Omega), \quad (15)$$

а $L(\lambda, \Omega)$ определяется согласно (14), в условиях высокой апостериорной точности являются статистически эквивалентными оценкам l_m , v_m , соответствующим положениям максимумов двух статистически независимых гауссовских марковских случайных процессов диффузионного типа. Это позволило с использованием метода локально-аддитивной и локально-мультипликативной марковской аппроксимации записать асимптотически точные (с ростом μ_{\min}) аналитические выражения для вероятностей ложной тревоги α и пропуска разладки β (при обнаружении скачкообразного изменения ширины полосы частот) и условных смещений и рассеяний выносимых оценок момента разладки и ширины полосы частот после разладки (при измерении скачкообразного изменения ширины полосы частот).

Экспериментальная проверка качества функционирования обнаружителя (14) и измерителя (15) осуществлялась методами статистического моделирования на ЭВМ. Установлено, что полученные теоретические зависимости для вероятностей α , β и условных рассеяний $V(\lambda_m | \lambda_0) = \langle (\lambda_m - \lambda_0)^2 \rangle$, $V(\Omega_m | \Omega_{02}) = \langle (\Omega_m - \Omega_{02})^2 \rangle$ оценок λ_m , Ω_m хорошо согласуются с соответствующими экспериментальными данными, по крайней мере, при $\mu = T\Omega/4\pi \geq 100$, $q = d/N_0 \geq 0,1$, $\Lambda_1 \geq 0,1T$, $\Lambda_2 \leq 0,9T$, $|\Omega_{02} - \Omega_{01}|/\Omega_{01} \geq 0,1$.

В четвертом разделе рассмотрена задача приема сигнала $s(t, \vartheta_0)$ с неизвестным параметром $\vartheta_0 \in \Theta = (\alpha, \beta)$ при ошибке в типе регулярности (по неизвестному параметру) принимаемого сигнала. Полагается, что модель наблюдений допускает представление

$$dX_t = s(t, \vartheta_0)dt + \varepsilon dW_t, \quad X_0 = 0, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (16)$$

где W_t – стандартный винеровский процесс с нулевым средним значением и корреляционной функцией $\langle W_t W_s \rangle = \min(t, s)$, ε – малый параметр, обратно пропорциональный выходному ОСШ. При этом время прогнозируемая (предполагаемая) модель наблюдений имеет вид

$$dX_t = s^*(t, \vartheta_0)dt + \varepsilon dW_t, \quad X_0 = 0, \quad 0 \leq t \leq T. \quad (17)$$

В случае $s(t, \vartheta) \neq s^*(t, \vartheta)$ оценка параметра ϑ_0 , синтезированная по методу максимального правдоподобия:

$$\hat{\vartheta}_\varepsilon = \arg \sup_{\vartheta \in \Theta} V(\vartheta, X^T), \quad V(\vartheta, X^T) = \exp \left[\frac{1}{\varepsilon^2} \int_0^T s^*(t, \vartheta) dX_t - \frac{1}{2\varepsilon^2} \int_0^T s^{*2}(t, \vartheta) dt \right], \quad (18)$$

при $\varepsilon \rightarrow 0$ сходится к значению $\hat{\vartheta}$, минимизирующего меру Кульбака-Лейблера:

$$\inf_{\vartheta} \|s^*(t, \vartheta) - s(t, \vartheta_0)\|^2 = \|s^*(t, \hat{\vartheta}) - s(t, \vartheta_0)\|^2$$

и является состоятельной, если

$$\hat{\vartheta} = \vartheta_0. \quad (19)$$

Очевидно, что характеристики оценки (18) будут определяться свойствами функций $s(t, \vartheta)$, $s^*(t, \vartheta)$. В этой связи рассмотрены следующие ситуации.

1. Принимаемый сигнал – регулярный, прогнозируемый сигнал – разрывный.

Пусть

$$s(t, \vartheta) = \operatorname{sgn}(t - \vartheta) |t - \vartheta|^k, \quad k > 1/2, \\ s^*(t, \vartheta) = h(t) 1_{\{t < \vartheta\}} + g(t) 1_{\{t \geq \vartheta\}}, \quad h(\vartheta) \neq g(\vartheta), \quad (20)$$

где $\operatorname{sgn}(x) = 1$, если $x \geq 0$, и $\operatorname{sgn}(x) = -1$, если $x < 0$. Тогда при выполнении условий 1) $\inf_{\vartheta \in \Theta} \delta(\vartheta) > 0$, 2) функция $\Phi(\vartheta)$ достигает минимума в единственной точке

$\hat{\vartheta} \in (\alpha, \beta)$, 3) функции $h(t)$, $g(t)$ и $s(t, \vartheta)$ непрерывно дифференцируемы по $t \in \Theta$, 4) $\inf_{\vartheta \in \Theta} \gamma(\vartheta) > 0$ оценка $\hat{\vartheta}_\varepsilon$ (18) сходится по распределению к величине (19) как

$$\frac{\hat{\vartheta}_\varepsilon - \vartheta_0}{\varepsilon^{2/(2k+1)}} \Rightarrow \hat{u} = \arg \sup_{u \in (-\infty, \infty)} \left[w(u) - \frac{|u|^{k+1}}{k+1} \right]. \quad (21)$$

Здесь

$$\delta(t) = h(t) - g(t), \quad \Phi(\vartheta) = \int_0^T [s^*(t, \vartheta) - s(t, \vartheta_0)]^2 dt, \quad \gamma(\vartheta) = d^2\Phi(\vartheta)/d\vartheta^2, \quad (22)$$

а $w(u)$ – двусторонний винеровский процесс.

Из (21) следует, что при регулярном принимаемом и разрывном ожидаемом сигналах скорость сходимости оценки (18) к истинному значению оцениваемого параметра хуже по сравнению с регулярным случаем (одинаковой гладкости принимаемого и ожидаемого сигналов). Чем больше значение k , тем меньше скорость сходимости $\varepsilon^{2/(2k+1)}$ и тем медленнее оценка (18) сходится к величине ϑ_0 . Это, в частности, приводит к тому, что рассеяние оценки (18) возрастает по сравнению с регулярным случаем в $\varepsilon^{-(2k-1)/(2k+1)}$ раз.

С целью проверки полученных теоретических результатов и установления конечных значений ε , при которых выполняется соотношение (21), было выполнено статистическое моделирование алгоритма оценивания (18) на ЭВМ при $s^*(t, \vartheta) = \text{sgn}(t - \vartheta)$, $\vartheta_0 = 0,5$, $t \in [0, 1]$. На рис. 7 нанесены найденные в процессе моделирования нормированные значения $\tilde{V} = V(\hat{\vartheta}_\varepsilon | \vartheta_0) / \varepsilon^{2/3}$ рассеяния $V(\hat{\vartheta}_\varepsilon | \vartheta_0) = \langle (\hat{\vartheta}_\varepsilon - \vartheta_0)^2 \rangle$ оценки (18), если $s(t, \vartheta_0) = t - \vartheta_0$. На рис. 8 нанесены аналогичные зависимости $\tilde{V} = V(\hat{\vartheta}_\varepsilon | \vartheta_0) / \varepsilon^{2/5}$, если $s(t, \vartheta_0) = \text{sgn}(t - \vartheta_0) |t - \vartheta_0|^k$, $k = 2$. Каждое экспериментальное значение рассеяния здесь получено в результате обработки не менее 10^4 реализаций наблюдаемых данных. Это позволило обеспечить отклонение границ доверительных интервалов от экспериментальных данных не более чем на 5 % с вероятностью 0,9.

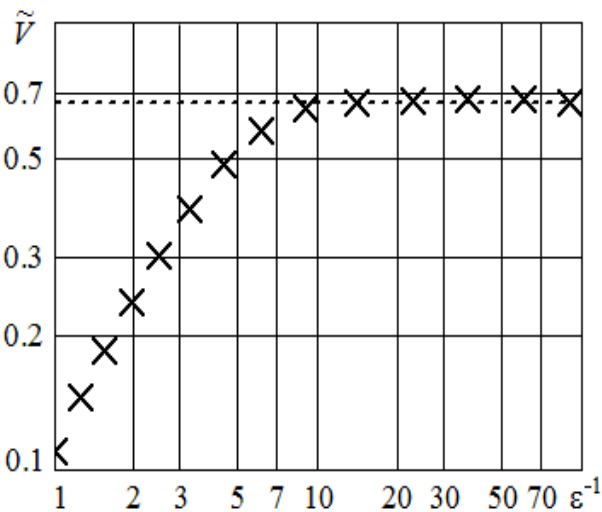


Рис. 7.

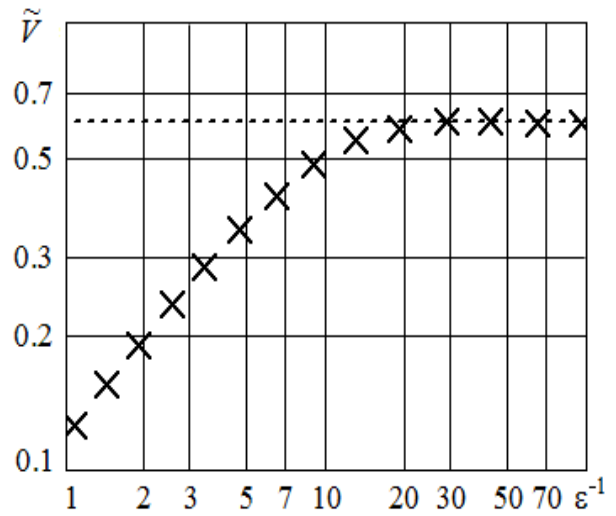


Рис. 8.

Как видно из рис. 7, 8, свойства оценки (18) в случае, если принимаемый полезный сигнал адекватно аппроксимируется регулярной (гладкой) функцией, а прогнозируемый – разрывной функцией, удовлетворительно описываются соотношением (21) при $\varepsilon < 0,05 \dots 0,1$, что соответствует выходным ОСШ по напряжению, большим 10...20.

2. Принимаемый сигнал – разрывной, прогнозируемый сигнал – регулярный.

Пусть принимаемый полезный сигнал $s(t, \vartheta_0)$ описывается моделью (20), а ожидаемый сигнал $s^*(t, \vartheta_0)$ является некоторой гладкой (регулярной) функцией. Тогда при выполнении условий 1) функции $h(t)$ и $g(t)$ ограничены, причем $\inf_{t \in \Theta} |h(t) - g(t)| > 0$, 2) функция $s^*(t, \vartheta)$, по крайней мере, дважды непрерывно дифференцируема по ϑ , 3) функция $\Phi(\vartheta)$, $\vartheta \in \Theta$ имеет единственный минимум в точке $\hat{\vartheta} \in \Theta$, так что $\inf \gamma(\hat{\vartheta}) > 0$ (22), оценка $\hat{\vartheta}_\varepsilon$ (18) сходится по распределению к величине (19) как

$$\frac{\hat{\vartheta}_\varepsilon - \hat{\vartheta}}{\varepsilon} \Rightarrow \hat{\xi} \sim N(0, D(\vartheta_0)), \quad (23)$$

т.е. является асимптотически гауссовской и имеет скорость сходимости ε . Здесь $D(\vartheta) = I(\vartheta) / \gamma^2(\vartheta)$, $I(\vartheta) = \int_0^T \dot{s}^{*2}(\vartheta, t) dt$. Таким образом, ошибка в типе регулярности модели при приеме разрывного полезного сигнала приводит к существенному ухудшению свойств выносимой оценки, в частности, увеличению рассеяния оценки в ε^{-1} раз.

С целью проверки полученных теоретических результатов и установления конечных значений ε , при которых справедливо представление (23), было выполнено статистическое моделирование алгоритма оценивания (18) на ЭВМ при $s(t, \vartheta_0) = \text{sgn}(t - \vartheta_0)$, $s^*(t, \vartheta) = t - \vartheta$, $\vartheta_0 = 0,5$, $t \in [0, 1]$. Некоторые результаты моделирования показаны на рис. 9, где нанесены нормированные экспериментальные значения $\tilde{V} = V(\hat{\vartheta}_\varepsilon | \vartheta_0) / \varepsilon$ рассеяния $V(\hat{\vartheta}_\varepsilon | \vartheta_0) = \langle (\hat{\vartheta}_\varepsilon - \vartheta_0)^2 \rangle$ оценки (18). Каждое

значение рассеяния получено в процессе обработки не менее 10^4 реализаций наблюдаемых данных. Это позволило обеспечить отклонение границ доверительных интервалов от экспериментальных данных не более чем на 5 % с вероятностью 0,9.

Из рис. 9 следует, что свойства оценки (18) в случае, если принимаемый полезный сигнал адекватно аппроксимируется разрывной функцией, а прогнозируемый – регулярной (гладкой) функцией, хорошо описываются приближением (23) при $\varepsilon < 0,2$, что соответствует выходным ОСШ по напряжению, большим 5.

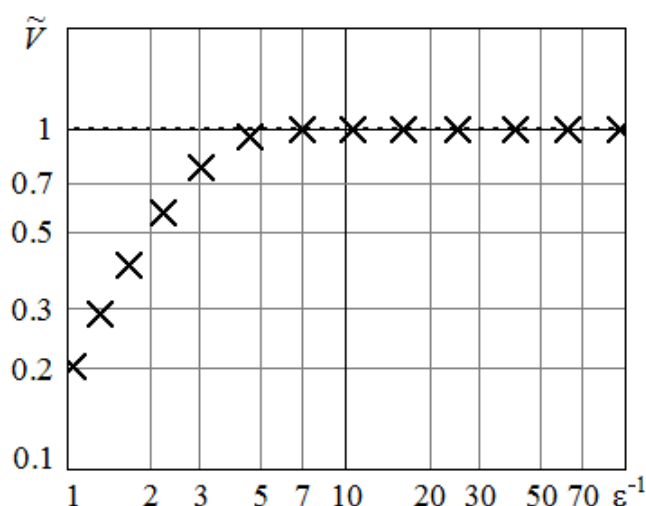


Рис. 9.

Аналогичным образом может быть исследовано асимптотическое поведение оценки, синтезированной с помощью байесовского подхода, при ошибке в типе регулярности модели.

В приложении А описаны методики получения общих выражений для функций распределения абсолютного максимума нестационарного гауссовского процесса. Найдены формулы для вероятностей неперевышения порога стационарными дифференцируемыми и недифференцируемыми гауссовскими случайными процессами.

В приложении Б на примере оценки центральной частоты быстрофлуктуирующего гауссовского случайного процесса предложен технически простой способ получения состоятельных асимптотически эффективных одноканальных оценок параметров информационных сигналов в произвольный (начиная с некоторого) момент времени.

В заключении подведены итоги по диссертации в целом и сформулированы основные результаты работы:

1. Развита общая методика синтеза алгоритмов обработки быстрофлуктуирующих низкочастотных кусочно-стационарных случайных процессов в условиях параметрической априорной неопределенности, в условиях пренебрежения величинами порядка и менее времени корреляции реализации наблюдаемых данных.

2. С использованием данной методики разработаны новые практически реализуемые и технические более простые по сравнению с получаемыми на основе известных подходов алгоритмы обработки быстрофлуктуирующих низкочастотных случайных процессов со скачкообразным изменением неизвестных параметров, а именно: адаптивный (по методу максимального правдоподобия) алгоритм обнаружения скачкообразного изменения неизвестной средней мощности случайного процесса, максимально правдоподобный алгоритм оценки момента скачкооб-

разного изменения неизвестной средней мощности случайного процесса и ее значений до и после разладки, адаптивный (по методу максимального правдоподобия) алгоритм обнаружения скачкообразного изменения неизвестных среднего значения и средней мощности случайного процесса, максимально правдоподобный алгоритм оценки момента разладки и неизвестных скачкообразно меняющихся среднего значения и средней мощности случайного процесса, адаптивный (по методу максимального правдоподобия) алгоритм обнаружения неизвестного скачкообразного изменения полосы частот случайного процесса, максимально-правдоподобный алгоритм оценки момента разладки и неизвестного скачкообразного изменения полосы частот случайного процесса.

3. Метод расчета точностных характеристик эффективности функционирования алгоритмов обработки, основанный на представлении выходной статистики алгоритма или ее приращения локально-марковским случайным процессом диффузионного типа (метод локально-марковской аппроксимации), обобщен применительно к быстрофлуктуирующим стохастическим сигналам с неизвестными скачкообразно меняющимися параметрами. Применение указанного подхода позволило в пренебрежении величинами порядка и менее времени корреляции реализации наблюдаемых данных получить замкнутые асимптотические выражения, позволяющие аналитически оценить качество работы синтезированных алгоритмов обработки.

4. На основе выполненного обобщения метода Ибрагимова-Хасьминского предложен способ аналитического определения предельных законов распределения и моментов оценки параметра сигнала при ошибке в выборе модели принимаемого сигнала, найдены новые скорости сходимости оценок параметров сигналов при различных свойствах регулярности анализируемого и прогнозируемого сигналов.

5. Методами статистического имитационного моделирования подтверждена работоспособность синтезированных алгоритмов обнаружения и оценки момента разладки и скачкообразно меняющихся неизвестных параметров быстрофлуктуирующего низкочастотного случайного процесса, а также найдены погрешности приближенных аналитических формул, описывающих эффективность функционирования предложенных обнаружителей и измерителей.

Таким образом, диссертационное исследование является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные общие подходы к синтезу технически простых алгоритмов определения скачкообразных изменений случайных процессов в условиях параметрической априорной неопределенности, предложены структурные схемы соответствующих обнаружителей и измерителей, а также разработаны способы аналитического определения их эффективности при заданных условиях и процедуры имитационного моделиро-

вания их работы, позволяющие установить границы применимости полученных теоретических результатов, что имеет существенное значение для развития радио-промышленности страны.

Результаты работы имеют достаточно общий характер и могут быть использованы при статистическом анализе резко изменяющихся и быстро протекающих стохастических импульсных сигналов оптического, акустического, электромагнитного, гравитационного и других происхождений, в различных областях радиотехники, связанных с регистрацией и измерением кусочно-стационарных случайных процессов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Публикации в журналах из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук

1. Литвиненко В.П. Вероятностные характеристики абсолютного максимума гауссовского случайного процесса / В.П. Литвиненко, О.В. Чернояр, **Л.А. Голпайегани** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – Т. 13. – № 4. – С. 59-62.

2. **Голпайегани Л.А.** Обнаружение неизвестного скачкообразного изменения энергетических параметров гауссовского процесса / Л.А. Голпайегани, К.С. Калашников, М.М. Шахморadian // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. – 2019. – № 1. – С. 15-28.

3. Матвеев Б.В. Обнаружение неизвестного скачкообразного изменения ширины полосы частот гауссовского процесса / Б.В. Матвеев, **Л.А. Голпайегани**, М.М. Шахморadian // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15. – № 2. – 9 с.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах Web of Science/Scopus

4. Chernoyarov O.V. The comparative analysis of estimates of the time discontinuous parameter of the random pulse synthesized using Bayesian and maximum-likelihood approaches / O.V. Chernoyarov, **L.A. Golpayegani**, M. Kuba, A.V. Salnikova // 11th International Conference “ELEKTRO 2016”: proceedings. Štrbské Pleso-High Tatras, Slovakia, May 16-18, 2016. – Žilina, 2016. – P. 518-522.

5. Chernoyarov O.V. The single-channel measurer of the time of appearance and the duration of the fast-fluctuating stochastic signal / O.V. Chernoyarov, **L.A. Golpayegani**, A.V. Salnikova, A.V. Ostankov // 2017 4th International Conference on Manufacturing Engineering and Technology for Manufacturing Growth (METMG

2017): proceedings. Singapore, Singapore, May 7-8, 2017. – Bellflower, USA, 2017. – P. 17-22.

6. Salnikova A.V. On probability of the Gaussian random processes crossing the barriers / A.V. Salnikova, O.V. Chernoyarov, **L.A. Golpayegani** // 2017 3rd International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP 2017): proceedings. Paris, France, September 6-8, 2017. – Paris, 2017. – P. 1-7.

7. Salnikova A.V. The radio signal phase estimate efficiency under the fast fades / A.V. Salnikova, O.V. Chernoyarov, **L.A. Golpayegani**, A.V. Zakharov // 12th International Conference “ELEKTRO 2018”: proceedings. Mikulov, Czech Republic, May 21-23, 2018. – Žilina, Slovakia, 2018. – P. 1-7.

Публикации в изданиях, индексируемых в базе MathSciNet

8. Chernoyarov O.V. Detection and measurement of the fast-fluctuating Gaussian random process dispersion abrupt change / O.V. Chernoyarov, M. Vaculik, A.V. Salnikova, **L.A. Golpayegani** // International Journal of Control Theory and Applications. – 2017. – Vol. 10. – № 32. – P. 261-276.

Публикации в других изданиях и материалах конференций

9. Черноярв О.В. Асимптотически эффективная и несмещенная оценка центральной частоты спектральной плотности стохастического сигнала / О.В. Черноярв, **Л.А. Голпайегани**, А.А. Макаров, А.Н. Фаульгабер // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2017». – М.: МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2017, часть 4. – С. 905-908.

РИД

10. Черноярв О.В. Устройство для измерения временного положения и длительности случайного импульсного сигнала / О.В. Черноярв, Ю.А. Кутоянц, А.В. Сальникова, **Л.А. Голпайегани**, Е.А. Пчелинцев // Патент на изобретение № 2655465, Россия, МПК G04F10/00, G01R29/02 (заявка № 2017113857, дата подачи заявки 21.04.2017, опубликовано 28.05.2018).