

На правах рукописи

ШЕПЕЛЕВ Дмитрий Николаевич

Разработка и практическая реализация алгоритмов обработки импульсных сигналов со случайной субструктурой на фоне помех в условиях параметрической априорной неопределенности

специальность

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

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена на кафедре радиотехнических приборов в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель: Чернояров Олег Вячеславович, доктор физико-математических наук, доцент ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Официальные оппоненты: Шахтарин Борис Ильич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана», кафедра автономных информационных и управляющих систем, профессор

Корчагин Юрий Эдуардович, кандидат физико-математических наук, доцент ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет», кафедра радиофизики, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород

Защита состоится 26 декабря 2013 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, корпус 4 ауд. 305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан «    » ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор

Коротков А.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. К настоящему времени в статистической радиотехнике сложились и интенсивно развиваются два практически важных направления: различение сигналов на фоне помех, включающее как частные случаи задачи обнаружения сигналов, а также фильтрация сигналов из помех, включающая оценивание неизменяющихся во времени параметров этих сигналов. Эти направления рассматривают вопросы как статистического синтеза алгоритмов обработки наблюдаемых данных, так и анализа качества получаемых с помощью этих алгоритмов статистических решений. Кроме того, в последние годы заметный интерес вызывает исследование совместных алгоритмов различения сигналов и оценки их параметров на фоне помех.

Одной из важных теоретических и практических задач статистической радиотехники является синтез и анализ оптимальных алгоритмов обработки стохастических сигналов. Этой теме посвящено достаточно много работ как отечественных (Богданович В.А., Васильев К.К., Сосулин Ю.Г., Тартаковский Г.П., Трифонов А.П. и др.), так и зарубежных (Ван-Трис Г., Дуб Дж., Кайлатц Т., Миддлтон Д., Пикандс Дж. и др.) ученых. Однако значительная часть результатов получена в предположении стационарности исследуемого случайного процесса и в условиях полной параметрической определенности относительно неинформативных параметров. В то же время, во многих приложениях встречаются задачи обнаружения и оценки применительно к существенно нестационарным случайным процессам, когда распределения исследуемых сигналов известны с точностью до конечного числа некоторых параметров (параметрическая априорная неопределенность). Незнание этих параметров может привести к значительному ухудшению характеристик выносимых оценок. Кроме того, при переходе от стационарных к нестационарным случайным сигналам увеличивается число неизвестных параметров.

Одной из возможных моделей нестационарного стохастического сигнала является случайный импульс, представляющий собой мультипликативную комбинацию детерминированной функции произвольной в общем случае формы и отрезка реализации стационарного гауссовского процесса. Примерами таких сигналов могут служить излучаемый или отраженный радиолокационный сигнал, информационный сигнал в системах связи с шумовой несущей, сигнал, искаженный модулирующей помехой, импульс, описывающий вспышку оптического шума, взрывного шума в транзисторах и др. При этом достаточно часто помимо собственных шумов приемного устройства, аппроксимируемых гауссовским белым шумом, принимаемый импульс может искажаться аддитивной непреднамеренной (взаимной) или преднамеренной (заградительной) внешней помехой с неизвестной в общем случае интенсивностью. В известной литературе наиболее конструктивные результаты по обработке гауссовских импульсных сигналов получены проф. Трифоновым А.П. и его учениками. При этом в большинстве рассмотренных задач полагалось, что огибающая импульса имеет прямоугольную форму, либо близкую к прямоугольной.

Разумеется, проблемы, связанные со статистическим анализом случайных импульсов во многом аналогичны соответствующим проблемам анализа квазидетерминированных сигналов, однако, имеются и существенные особенности, обусловленные статистическим характером субструктуры импульса, а также неравномерностью спектральной плотности (СП) внешней помехи и незнанием ее интенсивности. При этом представляет

интерес предложить не только оптимальные (квазиоптимальные) в том или ином смысле алгоритмы обнаружения таких сигналов и измерения их неизвестных информативных параметров, технически более простых по сравнению с существующими аналогами, но и получить аналитические выражения для их точностных характеристик, позволяющие оценить качество их функционирования в каждой конкретной ситуации.

Таким образом, актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью обобщения методов статистического анализа на импульсные сигналы произвольной формы со случайной субструктурой при наличии комплекса искажений с неизвестной интенсивностью и способов количественного определения его эффективности при различных условиях параметрической априорной неопределенности.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью работы является повышение эффективности приема импульсных сигналов произвольной формы со случайной субструктурой и неизвестными параметрами, наблюдаемых на фоне белого шума и коррелированной помехи с неизвестными в общем случае интенсивностями, и разработка способов аналитического расчета характеристик предложенных обнаружителей и измерителей.

Для реализации этой цели в диссертационной работе необходимо было решить следующие основные задачи:

1. Синтезировать новые оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы обнаружения импульсных сигналов со случайной субструктурой и оценки их временных и энергетических параметров, наблюдаемых на фоне суммы гауссовского белого шума и коррелированной помехи с неизвестной в общем случае интенсивностью, допускающих практическую реализацию в виде одноканальных устройств, в отличие от имеющихся многоканальных аналогов. Найти структуру одноканальных алгоритмов, адаптирующихся к неизвестной интенсивности помехи в условиях параметрической априорной неопределенности.

2. Выполнить теоретический анализ эффективности функционирования синтезированных алгоритмов обнаружения импульсных сигналов со случайной субструктурой и оценки их временных и энергетических параметров. Найти условия устойчивости алгоритмов к отклонению принятой при синтезе модели от истинной. Развить методы расчета характеристик алгоритмов обнаружения и оценки при произвольной форме импульса и наличии помехи с неизвестной интенсивностью.

3. Провести экспериментальное исследование алгоритмов обработки случайных импульсных сигналов методами статистического моделирования. Установить работоспособность предложенных алгоритмов и определить границы применимости теоретических зависимостей для характеристик качества функционирования этих алгоритмов.

4. Сопоставить эффективность предложенных алгоритмов обработки случайных импульсных сигналов с неизвестными параметрами и выяснить целесообразность их применения при различном объеме априорной информации о параметрах сигнала и помехи.

Методы проведения исследования. При решении поставленных в диссертации задач использовались аналитические и вычислительные методы статистической радиотехники, а именно:

- а) аппарат теории вероятностей и математической статистики,
- б) методы теории статистических решений,
- в) аппарат теории марковских случайных процессов,

г) методы математической физики, в частности, методы решения краевых задач для уравнений с частными производными второго порядка параболического типа,  
 д) аналитические методы математического анализа,  
 е) современные численные методы и методы программирования,  
 ж) методы моделирования на ЭВМ радиотехнических стохастических процессов и алгоритмов их анализа.

Научная новизна. В работе впервые получены или впервые подробно развиты следующие результаты.

1. Модифицированная методика синтеза алгоритмов статистического анализа импульсных сигналов произвольной формы со случайной субструктурой, наблюдаемых на фоне белого шума и коррелированной помехи с неизвестными в общем случае интенсивностями, основанная на пренебрежении величинами порядка и менее времени корреляции субструктуры импульса и приводящая к одноканальным алгоритмам обработки в отличие от известных многоканальных вариантов.

2. Обобщение методов расчета асимптотически точных характеристик алгоритмов статистического анализа (в том числе метода локально-марковской аппроксимации) применительно к импульсным сигналам произвольной формы со случайной субструктурой на фоне небелых гауссовских помех, позволяющих теоретически определять их точностные характеристики.

3. Полученные с помощью указанных методов новые алгоритмы статистического анализа импульсных сигналов произвольной формы со случайной субструктурой, а именно:

- алгоритмы оценки времени прихода высокочастотного гауссовского импульса и величины СП его случайной субструктуры, наблюдаемого на фоне белого шума и коррелированной помехи, при различной априорной неопределенности относительно интенсивностей помехи и шума и априори известной или неточно известной длительности полезного сигнала,

- алгоритм оценки времени прихода, длительности высокочастотного гауссовского импульса и величины СП его случайной субструктуры, наблюдаемого на фоне белого шума и коррелированной помехи,

- алгоритмы оценки времени прихода низкочастотного гауссовского импульса, математического ожидания (МО) и величины СП его случайной субструктуры, наблюдаемого на фоне белого шума и коррелированной помехи, при различной априорной неопределенности относительно интенсивностей помехи и шума,

- алгоритмы обнаружения высокочастотного и низкочастотного гауссовского импульсного сигнала с неизвестными временем прихода и энергетическими параметрами его случайной субструктуры при различной априорной неопределенности относительно интенсивностей белой и коррелированной помех и длительности импульса,

а также характеристики эффективности этих алгоритмов.

4. Методы статистического моделирования на ЭВМ и практической реализации на цифровых сигнальных процессорах (ЦСП) алгоритмов обработки случайных импульсных сигналов, наблюдаемых на фоне белого шума и коррелированной помехи, позволяющие существенно экономить машинное время, а также повысить быстродействие проектируемой информационной системы.

Практическая ценность результатов работы состоит в том, что они позволяют внедрять в практические разработки радиотехнических систем технически существенно более простые по сравнению с имеющимися аналогами алгоритмы статистического анализа случайных импульсных сигналов. Найденные в работе теоретические зависимости для характеристик эффективности предлагаемых алгоритмов позволяют сделать обоснованный выбор между этими и другими алгоритмами в зависимости от имеющейся априорной информации и в соответствии с требованиями, предъявляемыми к качеству алгоритма обработки и к степени простоты его технической реализации. Результаты работы могут быть использованы при исследовании и анализе

- физических и статистических свойств природных и искусственных объектов по их спонтанным и вынужденным импульсным откликам,
- обработке радио-, гидролокационных и оптических сигналов,
- систем связи с импульсными поднесущими, работающими в сложной помеховой обстановке, характеризуемой наличием как аддитивных, так и мультипликативных искажений,
- перспективных локационных и связных систем, использующих в качестве информационных сигналов импульсы с шумовой несущей,
- сигналов в технической и медицинской диагностике,
- аппаратного анализа случайных процессов.

Практическое применение результаты диссертации нашли при разработке системы связи с шумовой несущей, а также системы мониторинга многочастотных связных сигналов на базе ЦСП семейства TMS320.

Внедрение научных результатов. Полученные в диссертационной работе результаты использовались при выполнении грантов РФФИ (проект № 13-08-97538), и Министерства образования и науки РФ (Соглашения № 14.В37.21.2015, 14.В37.21.2032, 14.В37.21.2102), а также внедрены в Научно-техническом центре "Орион" (г. Железнодорожный), ОАО "Электросигнал" (г. Воронеж) и ЗАО Научно-производственном предприятии "Автоматизированные системы связи" (г. Воронеж), что подтверждается соответствующими документами.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на

1. I, II и III Московской отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества», Москва, 2007 г., 2008 г., 2009 г.
2. V Международной конференции "Телевидение: передача и обработка изображений", С.-Петербург, 2007.
3. Международной конференции "Телекоммуникационные и информационные системы", С.-Петербург, 2007.
4. Научно-практической конференции "Управление созданием и развитием систем, сетей и устройств телекоммуникаций", С.-Петербург, 2008.
5. Международной научно-технической конференции "К столетию со дня рождения В.А. Котельникова", Москва, 2008.
6. LXIV Научной сессии, посвященной дню радио, Москва, 2009.
7. Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «X Королёвские чтения», Самара, 2009.

8. III Всероссийской конференции "Радиолокация и радиосвязь", Москва, 2009.

Публикации. По теме диссертации опубликованы работы [1-16].

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

- применение предложенных методов статистического синтеза алгоритмов обработки быстрофлуктуирующих случайных сигналов позволяет получать эффективные, технически существенно более простые по сравнению с известными многоканальными аналогами обнаружители и измерители импульсов произвольной формы со случайной субструктурой при наличии комплекса гауссовских искажений в условиях различной параметрической априорной неопределенности, реализуемые в виде одноканальных устройств;

- разработанные методы статистического анализа алгоритмов обработки случайных импульсных сигналов с неизвестными разрывными и непрерывными параметрами на фоне белой и коррелированной помех позволяют аналитически (в отличие от известных результатов) находить количественные характеристики эффективности их функционирования, в том числе с учетом аномальных решений;

- использование предложенной методики определения количественных характеристик алгоритмов оценки параметров информационных сигналов при параллельной обработке позволяет аналитически получать численные значения систематических и случайных ошибок измерения, существенно (в 2-4 раза) более точные по сравнению с рассчитываемыми на основе известных подходов и удовлетворительно совпадающие с соответствующими экспериментальными значениями в широком диапазоне выходных отношений сигнал/шум (ОСШ);

- синтезированные новые оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы обработки импульсных сигналов со случайной субструктурой позволяют практически реализовать обнаружители и измерители временных и энергетических параметров случайных импульсов, наблюдаемых на фоне белых и коррелированных помех, при минимальных затратах аппаратных ресурсов и пренебрежимо малом уровне аномальных решений при выходных ОСШ, больших 4...5;

- найденные асимптотические выражения для характеристик качества функционирования синтезированных алгоритмов обработки случайных импульсных сигналов обладают приемлемой точностью в широком диапазоне выходных ОСШ и позволяют сделать обоснованный выбор между этими и другими алгоритмами в зависимости от требований, предъявляемых к качеству функционирования алгоритма обработки и степени простоты его аппаратной реализации;

- разработанные методики моделирования синтезированных алгоритмов обработки импульсных сигналов со случайной субструктурой при наличии белых и коррелированных искажений позволяют минимизировать временные и вычислительные затраты при их программной и аппаратной реализации, полученные на их основе результаты подтверждают корректность и достоверность сформулированных в работе теоретических выводов и рекомендаций.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, приложения, списка литературы, состоящего из 146 наименований. Объем диссертации составляет 212 страниц, включая 194 страницы основного текста, 7 страниц приложений, 11 страниц списка литературы.

## 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 исследуется задача оценки времени прихода высокочастотного импульсного сигнала  $s(t)$  и величины СП его случайной субструктуры, наблюдаемого в течение интервала времени  $[0, T]$  на фоне белой и коррелированной помех, при различной априорной неопределенности относительно длительности  $\tau_0$  импульса. Под высокочастотным случайным импульсным сигналом понимается мультипликативная комбинация отрезка реализации стационарного центрированного гауссовского случайного процесса  $\xi(t)$ , обладающего СП  $G_\xi(\omega) = (d_0/2) \{ I[(\vartheta - \omega)/\Omega_1] + I[(\vartheta + \omega)/\Omega_1] \}$ , и детерминированной функции  $f(t)$ :

$$s(t) = f(t) \xi(t) I[(t - \lambda_0)/\tau_0]. \quad (1)$$

Здесь  $I(x) = 1$  при  $|x| \leq 1/2$  и  $I(x) = 0$  при  $|x| > 1/2$ ,  $\lambda_0$  и  $\tau_0$  – время прихода и длительность импульса,  $\vartheta$ ,  $\Omega_1$  и  $d_0$  – центральная частота, ширина полосы частот и величина СП процесса  $\xi(t)$  соответственно. Сигналами (1) могут описываться излучаемый или отраженный радиолокационный сигнал, импульс со случайной субструктурой, описывающий вспышку оптического шума, информационный сигнал в системах связи с шумовой несущей, сигнал, искаженный модулирующей помехой, и др.

Фоновая помеха  $n(t)$ , аппроксимирующая собственные шумы радиоэлектронной системы, полагается центрированным гауссовским белым шумом с односторонней СП  $N_0$ . В качестве модели внешней помехи  $v(t)$  используется стационарный центрированный гауссовский случайный процесс со СП вида  $G_v(\omega) = (\gamma_0/2) \{ I[(\vartheta - \omega)/\Omega_2] + I[(\vartheta + \omega)/\Omega_2] \}$ . Здесь  $\vartheta$  – центральная частота,  $\Omega_2 \geq \Omega_1$  – ширина полосы частот, а  $\gamma_0$  – величина СП (интенсивность) процесса  $v(t)$ . Примерами таких помех могут служить внешняя непреднамеренная (взаимная) помеха, прошедшая через входной фильтр приемного устройства, или преднамеренная заградительная шумовая помеха.

В результате наблюдению смесь

$$x(t) = s(t) + n(t) + v(t). \quad (2)$$

На основе (2) и имеющейся априорной информации необходимо измерить параметры  $\lambda_0[\Lambda_1, \Lambda_2]$ ,  $d_0 \in [0, \infty)$ . Длительность  $\tau_0$  импульса (1) может быть также априори неизвестна и принимать значения из априорного интервала  $[T_1, T_2]$ . При этом предполагается, что  $0 \leq \Lambda_1 - \tau_0/2 < \Lambda_2 + \tau_0/2 \leq T$  (т.е. сигнал  $s(t)$  при всех  $\lambda_0$ ,  $\tau_0$  лежит внутри интервала наблюдения), а флуктуации  $\xi(t)$  случайного импульса являются "быстрыми", так что выполняются условия  $\mu = \tau_0 \Omega_1 / 2\pi \gg 1$ ,  $\Delta t \gg 2\pi / \Omega_1$ . Здесь  $\Delta t$  – характерное время изменения функции  $f(t)$ .

Синтез алгоритмов оценки времени прихода импульсного сигнала  $s(t)$  (1) и величины СП его случайной субструктуры проводится на основе метода максимального правдоподобия (МП). Согласно этому методу следует формировать решающую статистику – логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОР)



$$L(\lambda, \tau, d, \gamma_0) = \frac{d}{(N_0 + \gamma_0)(N_0 + \gamma_0 + d)} M(\lambda, \tau_0) + \frac{\gamma_0}{N_0(N_0 + \gamma_0)} M_T - \frac{\Omega_2}{2\pi} \left[ \tau \ln \left( 1 + \frac{\gamma_0 + d}{N_0} \right) - (K_\omega T - \tau) \ln \left( 1 + \frac{\gamma_0}{N_0} \right) \right] \quad (3)$$

– как функцию текущих значений неизвестных параметров. В (3) обозначено:

$$M(\lambda, \tau) = \int_{\lambda - \tau/2}^{\lambda + \tau/2} y_1^2(t) dt, \quad M_T = \int_0^T y_2^2(t) dt, \quad (4)$$

$y_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t') h_i(t - t') dt'$ ,  $i = 1, 2$  – выходной сигнал фильтра с передаточной функцией

$H_i(\omega)$ , удовлетворяющей условию  $|H_i(\omega)|^2 = I[(\vartheta - \omega)/\Omega_i] + I[(\vartheta + \omega)/\Omega_i]$ , а

$K_\omega = \Omega_2/\Omega_1$ . Если длительность импульса априори известна, то в качестве оценок времени прихода и величины СП принимается положение наибольшего максимума решающей статистики. Тогда оценки максимального правдоподобия (ОМП)  $\lambda_m$  и  $d_m$  параметров  $\lambda_0$  и  $d_0$  определяются как

$$\lambda_m = \arg \sup_{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2]} L(\lambda, \tau_0, d_m, \gamma_0) = \arg \sup_{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2]} M(\lambda, \tau_0), \quad (5)$$

$$d_m = \arg \sup_{d \geq 0} L(\lambda_m, \tau_0, d, \gamma_0) = \max[0; (M(\lambda_m, \tau_0)/\mu - N_0 - \gamma_0)/c(\lambda_m, \tau_0)].$$

Здесь  $c(\lambda, \tau) = \int_{\lambda - \tau/2}^{\lambda + \tau/2} f^2(t) dt$ .

Техническая реализация МП алгоритма (5) представлена на рис. 1, где обозначено: 1 – ключ, открывающийся на время  $[\Lambda_1 - \hat{\tau}/2, \Lambda_2 + \hat{\tau}/2]$ ; 2 – фильтр с передаточной функцией  $H_1(\omega)\sqrt{2\pi/\hat{\tau}\Omega_1}$ ; 3 – квадратор; 4 – интегратор; 5 – линия задержки на время  $\hat{\tau}$ ; 6 – вычитающее устройство; 7 – экстрематор, фиксирующий в качестве оценки  $\lambda_m$  положение наибольшего максимума входного сигнала; 8 – генератор сигнала  $f^2(t)$ ; 9 – делитель; 10 – нелинейный элемент с характеристикой  $\max(0, x)$ ; 11 – стробирующее устройство, а  $\hat{\tau} = \tau_0$ . Величина отсчета на выходе стробирующего устройства 11 в момент времени  $t = \lambda_m + \tau_0/2$  является оценкой  $d_m$ .

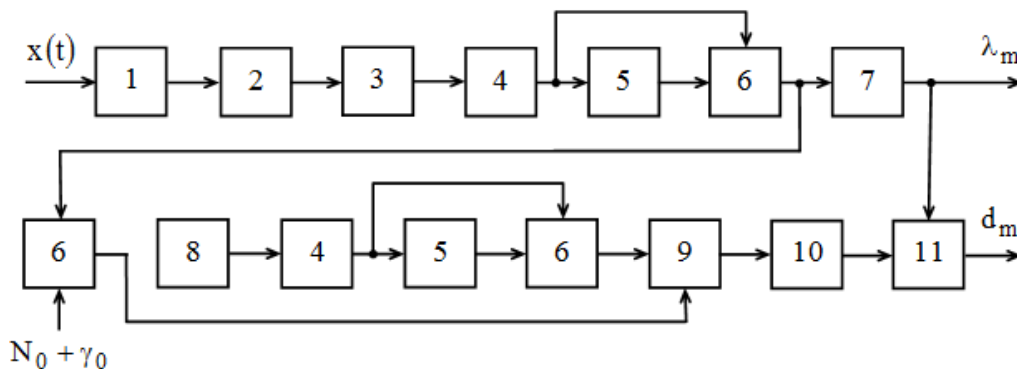


Рис. 1.

Если длительность полезного сигнала (1) априори неизвестна, то предлагается

1. Использовать алгоритм совместного оценивания (5), рассчитанный на некоторое фиксированное ожидаемое (предполагаемое) значение  $\tau^*$  параметра  $\tau_0$ . В результате приходим к оценкам времени прихода  $\lambda_{q\tau}$  и величины СП  $d_{q\tau}$ , которые в отличие от ОМП (5) назовем квазиправдоподобными оценками (КПО):

$$\lambda_{q\tau} = \arg \sup_{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2]} L(\lambda, \tau^*, d_{q\tau}, \gamma_0) = \arg \sup_{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2]} M(\lambda, \tau^*), \quad (6)$$

$$d_{q\tau} = \arg \sup_{d \geq 0} L(\lambda_{q\tau}, \tau^*, d, \gamma_0) = \max \left[ 0; \left( M(\lambda_{q\tau}, \tau^*) / \mu^* - N_0 - \gamma_0 \right) / c(\lambda_{q\tau}, \tau^*) \right].$$

Здесь  $\mu^* = \tau^* \Omega_1 / 2\pi$ .

2. Использовать алгоритм, основанный на совместном оценивании всех неизвестных параметров случайного импульса по методу МП. Получаемые в этом случае ОМП  $\lambda_{m\tau}$ ,  $\tau_m$  и  $d_{m\tau}$  параметров  $\lambda_0$ ,  $\tau_0$  и  $d_0$  определяются как

$$(\lambda_{m\tau}, \tau_m) = \arg \sup_{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2], \tau \in [T_1, T_2]} L(\lambda, \tau, d_{m\tau}, \gamma_0) = \arg \sup_{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2], \tau \in [T_1, T_2]} L_d(\lambda, \tau), \quad (7)$$

$$d_{m\tau} = \arg \sup_{d \geq 0} L(\lambda_{m\tau}, \tau_m, d, \gamma_0) = \max \left[ 0; \left( 2\pi M(\lambda_{m\tau}, \tau_m) / \tau_m \Omega_1 - N_0 - \gamma_0 \right) / c(\lambda_{m\tau}, \tau_m) \right],$$

где

$$L_d(\lambda, \tau) = \left[ \tau \Omega_1 (N_0 + \gamma_0) / 2\pi \right] \left\{ 2\pi M(\lambda, \tau) / \tau \Omega_1 (N_0 + \gamma_0) - 1 - \ln \left[ 2\pi M(\lambda, \tau) / \tau \Omega_1 (N_0 + \gamma_0) \right] \right\}.$$

Структурная схема квазиправдоподобного (КП) измерителя (6) может быть получена из приведенной на рис. 1 при  $\hat{\tau} = \tau^*$ , а структурная схема МП измерителя (7) – путем ее очевидного обобщения на многоканальный вариант.

Для определения качества функционирования предложенных алгоритмов (5)-(7) с помощью выполненного обобщения метода локально-марковской аппроксимации на случай импульсных сигналов произвольной формы найдены асимптотические выражения для характеристик оценок, в качестве которых выбраны условные смещения (систематические ошибки) и рассеяния (средние квадраты ошибок). Рассмотрено влияние на точность оценок времени прихода и величины СП аномальных ошибок, возможных не слишком больших выходных ОСШ. Для измерителей, содержащих два канала и более, предложена универсальная методика определения условных и безусловных центральных моментов оценки при многоканальном приеме, с помощью которой найдены асимптотические зависимости для условных и безусловных смещения и рассеяния ОМП  $\tau_m$ .

На основе найденных в работе характеристик проведено сравнение алгоритмов оценки времени прихода импульсного сигнала (1) и величины СП его случайной структуры при различной априорной неопределенности относительно длительности импульса. В частности, показано, что при отсутствии априорной информации о величине параметра  $\tau_0$  (когда расстройка по длительности полезного сигнала может быть достаточно большой) предпочтительнее использовать оценки (7). При этом число каналов можно выбрать, исходя из заданной точности измеряемых информативных параметров.

Если же можно указать некоторое приближенное значение  $\tau^*$  неизвестной длительности случайного импульса (1), так чтобы ее отклонение от истинной величины  $\tau_0$  было достаточно малым, то целесообразнее использовать более простой КП алгоритм (6) без существенного ухудшения в качестве оценивания.

Во втором разделе рассматриваются оценки времени прихода и величины СП высокочастотного случайного импульса (1) в условиях различной априорной неопределенности относительно его длительности  $\tau_0$  и СП  $\gamma_0$  и  $N_0$  помехи  $v(t)$  и шума  $n(t)$ . Согласно (5), (6) алгоритмы оценки времени прихода сигнала (1), синтезированные по методу МП, не зависят от интенсивностей действующих помех, а при оценивании величины СП случайного импульса можно выделить три случая:

1) априорная информация о помехе  $v(t)$  отсутствует. Тогда оценки величины СП  $\tilde{d}_m$  и  $\tilde{d}_{q\tau}$  сигнала (1) с априори известной и неточно известной длительностью могут быть записаны как

$$\tilde{d}_m = \max \left[ 0; \frac{1}{c(\lambda_m, \tau_0)} \left( \frac{1}{\mu} M(\lambda_m, \tau_0) - N_0 \right) \right], \quad \tilde{d}_{q\tau} = \max \left[ 0; \frac{1}{c(\lambda_{q\tau}, \tau^*)} \left( \frac{1}{\mu^*} M(\lambda_{q\tau}, \tau^*) - N_0 \right) \right], \quad (8)$$

2) СП действующих помех известны неточно, так что вместо истинных значений  $\gamma_0$  и  $N_0$  на этапе синтеза используются их приближенные ожидаемые (предполагаемые) значения  $\gamma^*$  и  $N^*$ . В результате согласно (5), (6) вместо оценок  $d_m$  и  $d_{q\tau}$  получаем соответственно оценки  $d_m^*$  и  $d_{q\tau}^*$ :

$$d_m^* = \max \left[ 0; \left( M(\lambda_m, \tau_0) / \mu - N^* - \gamma^* \right) / c(\lambda_m, \tau_0) \right], \quad (9)$$

$$d_{q\tau}^* = \max \left[ 0; \left( M(\lambda_{q\tau}, \tau^*) / \mu^* - N^* - \gamma^* \right) / c(\lambda_{q\tau}, \tau^*) \right].$$

3) вместо неизвестной интенсивности помехи  $v(t)$  используется ее оценка, найденная по методу МП. Получаемые при этом адаптивные ОМП  $\hat{d}_m$  и КПО  $\hat{d}_{q\tau}$  величины СП сигнала (1) с априори известной и неточно известной длительностью имеют вид

$$\hat{d}_m = \max \left[ 0; \hat{M}(\lambda_m, \tau_0) / \mu c(\lambda_m, \tau_0) \right], \quad \hat{d}_{q\tau} = \max \left[ 0; \hat{M}(\lambda_{q\tau}, \tau^*) / \mu^* c(\lambda_{q\tau}, \tau^*) \right], \quad (10)$$

где  $\hat{M}(\lambda, \tau) = [K_\omega T M(\lambda, \tau) - \tau M_T] / (K_\omega T - \tau)$ , а  $K_\omega$ ,  $M(\lambda, \tau)$ ,  $M_T$  определяются из (3), (4). Оценки  $\lambda_m$ ,  $\lambda_{q\tau}$  в (8)-(10) совпадают с соответствующими оценками (5), (6).

Алгоритмы совместного оценивания  $(\lambda_m, \tilde{d}_m)$ ,  $(\lambda_m, d_m^*)$  (5), (8), (9) и  $(\lambda_{q\tau}, \tilde{d}_{q\tau})$ ,  $(\lambda_{q\tau}, d_{q\tau}^*)$  (6), (8), (9) могут быть получены с помощью измерителя, показанного на рис. 1. Для этого в структурной схеме рис. 1 необходимо заменить  $N_0 + \gamma_0$  на  $N_0$  или  $N^* + \gamma^*$  и при априори известной длительности полезного сигнала (1) положить  $\hat{\tau} = \tau_0$ , а при неточно известной –  $\hat{\tau} = \tau^*$ . Адаптивные алгоритмы (5), (6), (10) можно реализовать в виде, представленном на рис. 2, где обозначено: 12 – фильтр с передаточной функцией

$H_1(\omega)\sqrt{2\pi K_\omega T / (T\Omega_2 - \hat{\tau}\Omega_1)}$ ; 13 – ключ, открывающийся на время  $[0, T]$ ; 14 – фильтр с передаточной функцией  $H_2(\omega)\sqrt{2\pi\hat{\tau} / (T\Omega_2 - \hat{\tau}\Omega_1)}$ ; 15 – решающее устройство, формирующее отсчет входного сигнала в момент времени, определяемый величиной  $\lambda_m(\lambda_{q\tau})$ ;  $\hat{\tau} = \tau_0$  или  $\hat{\tau} = \tau^*$  для МП (5), (10) или КП (6), (10) алгоритма соответственно. Величина отсчета на выходе решающего устройства 15 является оценкой  $\hat{d}_m(\hat{d}_{q\tau})$  (10). Остальные обозначения на рис. 2 совпадают с приведенными на рис. 1.

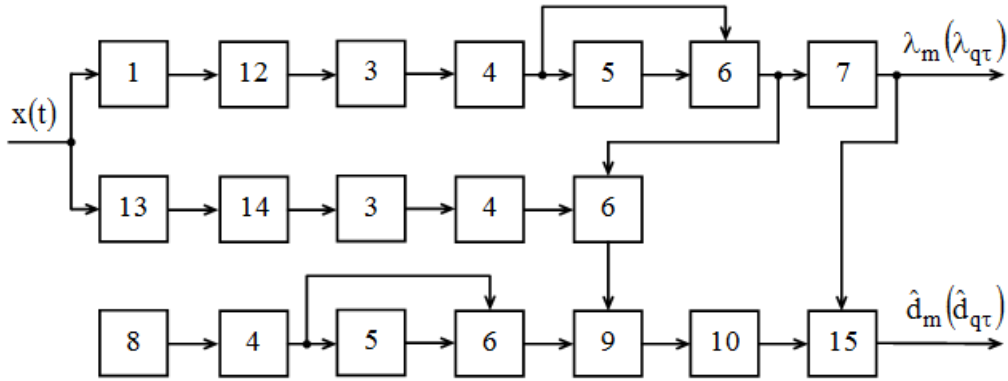


Рис. 2

Для определения качества функционирования алгоритмов оценки величины СП процесса  $\xi(t)$ , синтезированных в условиях различной априорной неопределенности относительно интенсивностей действующих помех, найдены асимптотически точные выражения для смещений и рассеяний оценок (8)-(10) без учета и с учетом влияния аномальных ошибок, возникающих при оценивании времени прихода. Установлено, что при выполнении условия  $K = T\Omega_2 / \tau_0\Omega_1 \gg 1$  использование адаптивных алгоритмов (10) позволяет избежать ухудшения качества оценок величины СП  $d_0$  из-за незнания СП помехи и белого шума.

Посредством сопоставления найденных характеристик проведено сравнение рассмотренных в этом разделе алгоритмов оценки величины СП  $d_0$  между собой и с алгоритмами оценки из первого раздела. Показано, что измерители величины СП субструктуры  $\xi(t)$ , синтезированные по методу МП без учета влияния внешней помехи, в общем случае могут быть далеки от оптимальных, и их применение может приводить к значительным потерям в точности оценки величины СП, монотонно возрастающим с увеличением отношения помеха/шум (ОПШ)  $q_v = \gamma_0 / N_0$ . При этом качество алгоритмов оценки величины СП, учитывающих влияние внешней помехи, существенно зависит от наличия априорных данных о неизвестных неинформативных параметрах. В случае возможных больших расстройках по СП помехи и белого шума предпочтительнее использовать адаптивные алгоритмы совместного оценивания (5), (6), (10). Если же можно указать некоторые приближенные значения интенсивностей действующих помех, так чтобы их относительные отклонения от истинных величин были достаточно малы, то целесообразнее применять более простые КП алгоритмы (5), (6), (9) без заметного ухудшения качества оценки величины СП  $d_0$ .

Полученные результаты позволили также записать выражения для характеристик обнаружения (вероятности ложной тревоги и вероятности пропуска сигнала) высокочастотного импульса (1) с неизвестными временем прихода  $\lambda_0$  и величиной СП  $d_0$  его случайной субструктуры, наблюдаемого на фоне белой и коррелированной помех. Как известно, при обнаружении по методу МП решение о наличии полезного сигнала принимается на основе сравнения величины абсолютного максимума решающей статистики с порогом  $c$ , выбираемым в соответствии с заданным критерием оптимальности обнаружения. Согласно (3) для алгоритмов обнаружения случайного импульса с неизвестными параметрами  $\lambda_0$ ,  $d_0$  при априори известной  $\tau_0$  и неточно известной  $\tau^*$  длительности величины абсолютных максимумов решающих статистик не зависят от интенсивностей белого шума и внешней помехи и определяются соответственно как

$$M(\lambda_m, \tau_0), \quad M(\lambda_{q\tau}, \tau^*). \quad (11)$$

Структурные схемы обнаружителей, построенных с помощью статистик (11), могут быть очевидным образом получены из структурной схемы измерителя, показанного на рис. 1, путем замены экстрематора 8 на пороговое устройство, выносящее решение о наличии/отсутствии случайного импульса (1) при превышении/непревышении порога  $c$  величиной абсолютного максимума входного сигнала.

На основе проведенного анализа установлено, что для каждого значения ОСШ существует оптимальная положительная расстройка по длительности полезного сигнала (1), обеспечивающая наилучшее качество обнаружения по методу МП.

В третьем разделе анализируются оценки времени прихода, МО и величины СП низкочастотного случайного импульсного сигнала, наблюдаемого в течение интервала времени  $[0, T]$  на фоне гауссовского белого шума и коррелированной внешней помехи. Под низкочастотным случайным импульсным сигналом понимается импульс  $s(t)$  (1), субструктура  $\xi(t)$  которого описывается низкочастотным стационарным гауссовским случайным процессом с МО  $a_0$  и СП

$$G_\xi(\omega) = (d_0/2)I(\omega/\Omega_1). \quad (12)$$

При этом время корреляции процесса  $\xi(t)$  существенно меньше длительности импульса  $\tau_0$  и характерного времени изменения  $\Delta t$  огибающей  $f(t)$ , так что выполняются условия  $\mu = \tau_0\Omega_1/4\pi \gg 1$ ,  $\Delta t \gg 4\pi/\Omega_1$ .

Внешняя помеха  $v(t)$  аппроксимируется стационарным центрированным гауссовским случайным процессом, обладающим СП  $G_v(\omega) = (\gamma_0/2)I(\omega/\Omega_2)$ ,  $\Omega_2 \geq \Omega_1$ . Интенсивность  $\gamma_0$  помехи  $v(t)$  может быть априори неизвестна, а границы интервала наблюдения выбираются таким образом, чтобы полезный сигнал (1), (12) всегда находился внутри интервала наблюдения.

Синтез алгоритмов совместного оценивания времени прихода  $\lambda_0 \in [\Lambda_1, \Lambda_2]$ , МО  $a_0 \in (-\infty, \infty)$  и величины СП  $d_0 \in [0, \infty)$  низкочастотного случайного импульса проводился на основе метода МП. Рассмотрены

1) оценки  $\tilde{\lambda}_m$ ,  $\tilde{a}_m$ ,  $\tilde{d}_m$  параметров  $\lambda_0$ ,  $a_0$ ,  $d_0$  сигнала (1), (12), полученные без учета наличия внешней помехи:

$$\tilde{\lambda}_m = \arg \sup_{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2]} F_1(\lambda, 0, N_0), \quad \tilde{a}_m = L_2(\tilde{\lambda}_m) / \tau_0 c_1(\tilde{\lambda}_m), \quad \tilde{d}_m = F_2(\tilde{\lambda}_m, 0, N_0), \quad (13)$$

$$F_1(\lambda, \gamma, N) = L_1(\lambda) / (N + \gamma) - \mu \ln \left[ \left( L_1(\lambda) - L_2^2(\lambda) / \tau_0 \right) / \mu (N + \gamma) \right],$$

$$F_2(\lambda, \gamma, N) = \max \left[ 0; \left( L_1(\lambda) / \mu - N - \gamma \right) / c_2(\lambda) - L_2^2(\lambda) / \tau_0 \mu c_1^2(\lambda) \right]$$

Здесь обозначено:  $c_i(\lambda) = (1/\tau_0) \int_{\lambda - \tau_0/2}^{\lambda + \tau_0/2} f^i(t) dt$ ,  $i = 1, 2$ ,

$$L_1(\lambda) = \int_{\lambda - \tau_0/2}^{\lambda + \tau_0/2} y_1^2(t) dt, \quad L_2(\lambda) = \int_{\lambda - \tau_0/2}^{\lambda + \tau_0/2} x(t) dt, \quad (14)$$

а  $y_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t') h_1(t - t') dt'$  – отклик фильтра с передаточной функцией  $H_1(\omega)$ , удовлетворяющей условию  $|H_1(\omega)|^2 = I(\omega/\Omega_1)$ , на реализацию наблюдаемых данных  $x(t) = s(t) + n(t) + v(t)$ ;

2) оценки  $\lambda_m^*$ ,  $a_m^*$ ,  $d_m^*$  параметров  $\lambda_0$ ,  $a_0$ ,  $d_0$ , учитывающие влияние внешней помехи, но синтезированные при условии, что интенсивности помехи и белого шума известны неточно:

$$\lambda_m^* = \arg \sup_{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2]} F_1(\lambda, \gamma^*, N^*), \quad a_m^* = L_2(\lambda_m^*) / \tau_0 c_1(\lambda_m^*), \quad d_m^* = F_2(\lambda_m^*, \gamma^*, N^*). \quad (15)$$

Здесь  $\gamma^*$ ,  $N^*$  – ожидаемые (предполагаемые) значения СП  $\gamma_0$  и  $N_0$  соответственно;

3) оценки параметров  $\hat{\lambda}_m$ ,  $\hat{a}_m$ ,  $\hat{d}_m$  параметров  $\lambda_0$ ,  $a_0$ ,  $d_0$ , адаптированные к интенсивности помехи  $v(t)$ :

$$\hat{\lambda}_m = \arg \sup_{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2]} F_3(\lambda), \quad \hat{a}_m = L_2(\hat{\lambda}_m) / \tau_0 c_1(\hat{\lambda}_m), \quad \hat{d}_m = F_4(\hat{\lambda}_m), \quad (16)$$

$$F_3(\lambda) = K \ln \left[ \frac{(K-1)L_3}{K(L_3 - L_1(\lambda))} \right] + \ln \left[ \frac{L_3 - L_1(\lambda)}{(K-1)(L_1(\lambda) - L_2^2(\lambda)/\tau_0)} \right],$$

$$F_4(\lambda) = \max \left\{ 0; [KL_1(\lambda) - L_3] / \mu [Kc_2(\lambda) - 1] - L_2^2(\lambda) / \mu \tau_0 c_1^2(\lambda) \right\}.$$

При адаптации неизвестное значение  $\gamma_0$  интенсивности внешней помехи заменяется на ее оценку, найденную по методу МП. В (16) обозначено:  $L_3 = \int_0^T y_2^2(t) dt$ ,

$y_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t') h_2(t - t') dt'$ ,  $h_2(t)$  – функция, спектр  $H_2(\omega)$  которой удовлетворяет условию  $|H_2(\omega)|^2 = I(\omega/\Omega_2)$ , а  $K = T\Omega_2 / \tau_0\Omega_1$ .

Оценки (13), (15) и (16) могут быть получены с помощью измерителей, структурные схемы которых показаны на рис. 3 и 4 соответственно. Здесь обозначено: 1 – ключ, открывающийся на время  $[\Lambda_1 - \tau_0/2, \Lambda_2 + \tau_0/2]$ ; 2 – интегратор; 3 – линия задержки на время  $\tau_0$ ; 4 – вычитающее устройство; 5 – делитель; 6 – квадратор; 7 – фильтр с передаточной функцией  $H_1(\omega) / \sqrt{\mu N_\Sigma}$ ; 8 – логарифмический усилитель; 9 – экстрематор, фик-

сирующий в качестве оценки времени прихода положение наибольшего максимума входного сигнала; 10 – генератор сигнала  $f(t)$ ; 11 – стробирующее устройство; 12 – нелинейный элемент с характеристикой  $\max(0, x)$ ; 13 – ключ, открывающийся на время  $[0, T]$ ; 14 – фильтр с передаточной функцией  $H_2(\omega)\sqrt{2\pi/\Omega_1}$ ; 15 – умножитель; 16 – сумматор; 17 – фильтр с передаточной функцией  $H_1(\omega)\sqrt{2\pi/\Omega_1}$ , а  $N_\Sigma = N_0$  или  $N_\Sigma = N^* + \gamma^*$  для алгоритмов (13) и (15) соответственно.

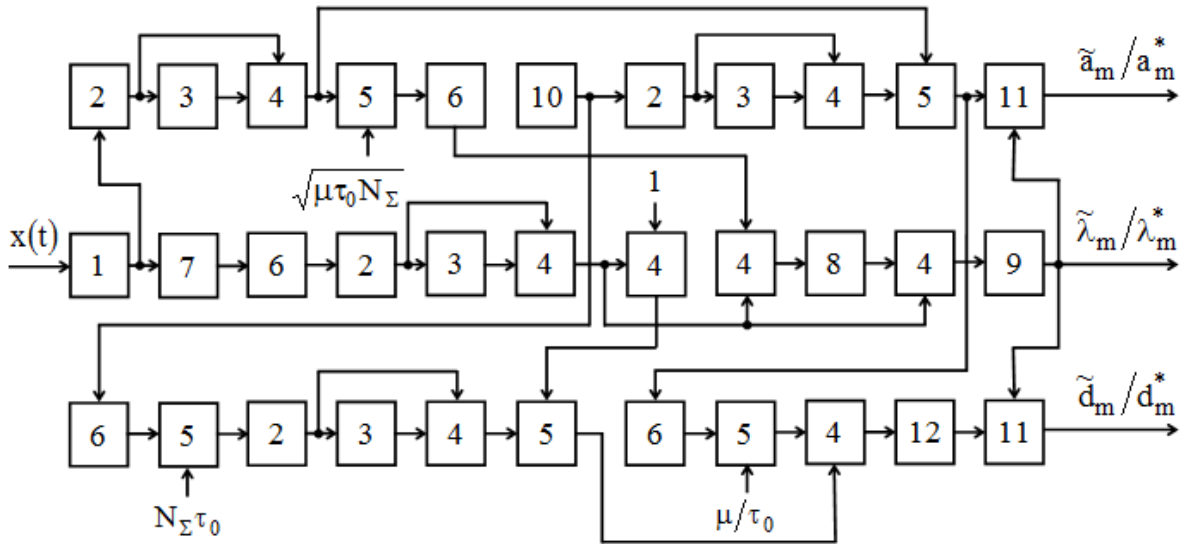


Рис. 3

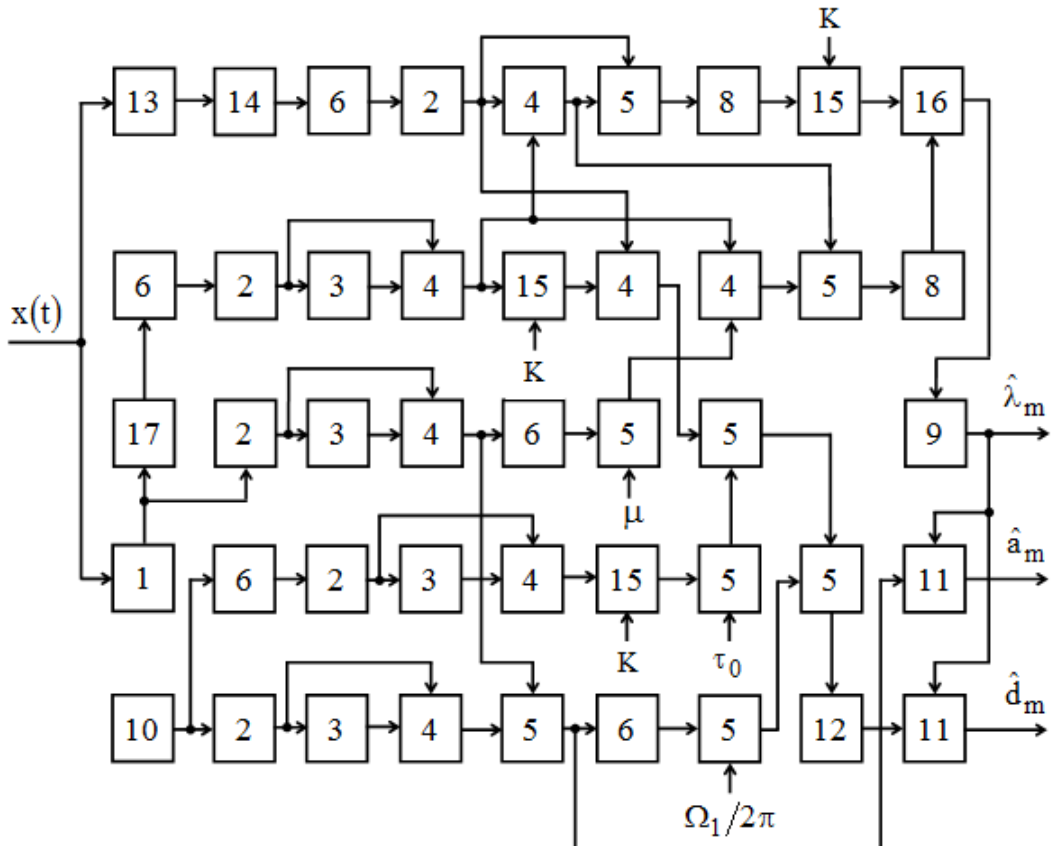


Рис. 4

В качестве характеристик эффективности алгоритмов (13)-(16) найдены асимптотические выражения для смещений и рассеяний оценок. Исследовано влияние пороговых эффектов при измерении времени прихода вследствие возможного появления аномальных ошибок. Установлено, что реализация процедуры адаптации по интенсивности процесса  $v(t)$  позволяет избежать потерь в точности оценивания времени прихода и МО случайного импульса из-за незнания СП действующих помех. Характеристики же адаптивной оценки  $\hat{d}_m$  (16) величины СП процесса  $\xi(t)$  переходят в соответствующие характеристики МП оценки  $d_m = d_m^* \Big|_{\substack{\gamma^* = \gamma_0 \\ N^* = N_0}}$  (15) при выполнении условия  $K \gg 1$ .

На основе полученных результатов были также найдены выражения для характеристик обнаружения низкочастотного случайного импульса, наблюдаемого на фоне белой и коррелированной помех с неизвестными в общем случае интенсивностями, в качестве которых выбраны вероятности ложной тревоги и пропуска сигнала. Показано, что для алгоритмов обнаружения случайного импульса (1), (12) с неизвестными параметрами  $\lambda_0$ ,  $a_0$ ,  $d_0$ , синтезированному по методу МП без учета наличия внешней помехи, в расчете на прогнозируемые значения СП помехи и шума или адаптированному по параметру  $\gamma_0$ , величины абсолютных максимумов решающих статистик, сравниваемых с определяемым согласно выбранному критерию оптимальности порогом  $c$ , запишутся соответственно как

$$F_1(\tilde{\lambda}_m, 0, N_0), \quad F_1(\lambda_m^*, \gamma^*, N^*), \quad F_3(\hat{\lambda}_m). \quad (17)$$

Структурные схемы обнаружителей, построенных с помощью статистик (17), могут быть очевидным образом получены из структурных схем соответствующих измерителей, показанных на рис. 3, 4, путем замены экстрематора 9 на пороговое устройство, выносящее решение о наличии/отсутствии случайного импульса (1), (12) при превышении/непревышении порога  $c$  величиной абсолютного максимума входного сигнала. Установлено, что использование адаптивного обнаружителя позволяет избежать потерь в качестве обнаружения вследствие незнания интенсивностей помехи и белого шума.

Четвертый раздел посвящен исследованию работоспособности полученных в разделах 1-3 алгоритмов оценки параметров случайных импульсных сигналов и определению границ применимости асимптотически точных формул для их характеристик методами программного (на ЭВМ) и аппаратного (на базе цифрового сигнального процессора серии TMS320) статистического моделирования.

В п. 4.1 рассмотрено моделирование алгоритмов обработки низкочастотного случайного импульсного сигнала (1), (12) с неизвестными временем прихода, МО и величиной СП. Для нахождения экспериментальных характеристик измерителей (13)-(16) и обнаружителей (17) получены достаточно простые выражения для формирования нормированной статистики  $\tilde{L}_3 = L_3/N_0$  и отсчетов нормированных статистик  $\tilde{L}_1(l) = L_1(\lambda)/N_0$ ,  $\tilde{L}_2(l) = L_2(\lambda)/\sqrt{\tau_0 N_0}$ ,  $l = \lambda/\tau_0$ . Шаг дискретизации для построения на основе сформированных отсчетов ступенчатых аппроксимаций непрерывных реализаций



случайных процессов  $\tilde{L}_1(l)$ ,  $\tilde{L}_2(l)$  выбирался таким образом, чтобы среднеквадратическая погрешность аппроксимации не превышала 10 %. По полученным значению случайной величины  $\tilde{L}_3$  и реализациям  $\tilde{L}_1(l)$ ,  $\tilde{L}_2(l)$  согласно (13)-(16) определялись нормированные оценки

$$\hat{l} = \hat{\lambda}/\tau_0, \quad \hat{h} = \hat{a}\sqrt{2\tau_0/N_0}, \quad \hat{q} = \hat{d}/N_0$$

и их относительные отклонения  $(\hat{l} - l_0)^n$ ,  $(\hat{h} - h_0)^n$ ,  $(\hat{q} - q_0)^n$ ,  $n = 1, 2$  от истинных значений  $l_0 = \lambda_0/\tau_0$ ,  $h_0 = a_0\sqrt{2\tau_0/N_0}$ ,  $q_0 = d_0/N_0$  соответствующих оцениваемых параметров. Здесь  $\hat{\lambda}$  – одна из оценок  $\tilde{\lambda}_m$ ,  $\lambda_m^*$ ,  $\hat{\lambda}_m$ ;  $\hat{a}$  – одна из оценок  $\tilde{a}_m$ ,  $a_m^*$ ,  $\hat{a}_m$ , а  $\hat{d}$  – одна из оценок  $\tilde{d}_m$ ,  $d_m^*$ ,  $\hat{d}_m$ . Далее путем непосредственного усреднения разностей  $(\hat{l} - l_0)^n$ ,  $(\hat{h} - h_0)^n$ ,  $(\hat{q} - q_0)^n$  по всем обработанным реализациям находились экспериментальные значения условных смещений и рассеяний оценок  $\hat{l}$ ,  $\hat{h}$  и  $\hat{q}$ . Решение о наличии или отсутствии случайного импульса (1), (12) в реализации наблюдаемых данных для алгоритмов (17) выносилось на основе сравнения случайных величин

$$\begin{aligned} \tilde{L}(l_m) &= \tilde{L}_1(\tilde{l}_m)/\mu - \ln[\tilde{L}_1(\tilde{l}_m) - \tilde{L}_2^2(\tilde{l}_m)], \\ L^*(l_m^*) &= \tilde{L}_1(l_m^*)/\mu(1 + q_v)(1 + \delta_E) - \ln[\tilde{L}_1(l_m^*) - \tilde{L}_2^2(l_m^*)], \\ \hat{L}(\hat{l}_m) &= K \ln[\tilde{L}_3/(\tilde{L}_3 - \tilde{L}_1(\hat{l}_m))] + \ln[(\tilde{L}_3 - \tilde{L}_1(\hat{l}_m))/(\tilde{L}_1(\hat{l}_m) - \tilde{L}_2^2(\hat{l}_m))] \end{aligned}$$

с порогом  $c$ . Здесь  $q_v = \gamma_0/N_0$ ,  $\delta_E = (\gamma^* + N^* - \gamma_0 - N_0)/(\gamma_0 + N_0)$ . Полезный сигнал (1), (12) присутствовал в реализации наблюдаемых данных, если  $h_0 \neq 0$ ,  $q_0 \neq 0$ , иначе (при  $h_0 = 0$ ,  $q_0 = 0$ ) считалось, что полезный сигнал в реализации наблюдаемых данных отсутствует. Экспериментальные значения вероятностей ошибок первого рода и второго рода определялись как относительные частоты принятия решений в пользу гипотез  $H_1$  и  $H_0$ , в то время как были верны гипотезы  $H_0$  и  $H_1$  соответственно.

Некоторые результаты статистического моделирования алгоритмов обработки низкочастотного импульсного сигнала (13)-(17) представлены на рис. 5-9, где также показаны соответствующие теоретические зависимости. Каждое экспериментальное значение получено посредством обработки не менее  $10^4$  реализаций  $\tilde{x}(\tilde{t}) = x(t)\sqrt{\tau_0/N_0}$  для случая  $f(\tilde{t}) = \exp[-(\tilde{t} - l_0)^2/2]$ ,  $l_0 = (\tilde{\Lambda}_1 + \tilde{\Lambda}_2)/2$ ,  $\tilde{\Lambda}_1 = 1/2$ ,  $\tilde{\Lambda}_2 = m + 1/2$ ,  $\tilde{T} = m + 1$ . Здесь  $\tilde{\Lambda}_{1,2} = \Lambda_{1,2}/\tau_0$ ,  $\tilde{T} = T/\tau_0$ ,  $\tilde{t} = t/\tau_0$ . При этом с вероятностью 0,9 границы доверительных интервалов отклоняются от экспериментальных значений не более чем на 10...15 %.

На рис. 5, 6 при  $m = 20$  изображены теоретические зависимости вероятностей пропуска сигнала при расстройке по СП действующих помех  $\beta^*$  и в случае адаптации по неизвестной интенсивности внешней помехи  $\hat{\beta}$ . Штриховые линии на рис. 5 рассчитаны для  $\delta_E = 0,25$ , а сплошные – для  $\delta_E = -0,25$ . Кривые 1 соответствуют  $\mu = 100$ ,  $q_v = 0,5$ ;

2 –  $\mu = 200$ ,  $q_v = 0,5$ ; 3 –  $\mu = 200$ ,  $q_v = 0$ . Величина параметра  $\eta = a_0 \sqrt{2\tau_0 / \mu N_0}$ , характеризующего мощность постоянной составляющей (МО), принималась равной 0,25. Экспериментальные значения вероятности пропуска сигнала  $\beta^*$  обозначены плюсиками, кружочками, звездочками для  $\delta_E = 0,25$  и квадратиками, крестиками, ромбиками для  $\delta_E = -0,25$ . На рис. 6 штриховые линии рассчитаны для  $\eta = 0,5$ , а сплошные – для  $\eta = 0,25$ . Остальные обозначения совпадают с приведенными на рис. 5. Величина порога  $c$  при определении вероятностей пропуска сигнала  $\beta^*$ ,  $\hat{\beta}$  рассчитывалась по заданному уровню вероятностей ложной тревоги, равному 0,01.

На рис. 7 приведены теоретические и экспериментальные зависимости нормированного условного рассеяния  $\hat{V}_l = 12V(\hat{\lambda}_m | \lambda_0) / (\Lambda_2 - \Lambda_1)^2$  оценки  $\hat{\lambda}_m$  (16) с учетом аномальных ошибок. Обозначения на рис. 7 такие же, как на рис. 6. На рис. 8 нанесены теоретические зависимости нормированного условного рассеяния  $\hat{V}_\eta = 2\tau_0 V(\hat{a}_m | a_0) / \mu N_0$  оценки  $\hat{a}_m$  (16). Штриховые линии здесь рассчитаны для  $\mu = 100$ , а сплошные – для  $\mu = 200$ . Кривые 1 соответствуют  $q_v = 0,25$ ; 2 – 0,5; 3 – 1. Экспериментальные значения нормированного рассеяния адаптивной ОМП МО (16), полученные при  $\eta = 0,25$ , обозначены на рис. 8 плюсиками, кружочками, звездочками для  $\mu = 100$  и квадратиками, крестиками, ромбиками для  $\mu = 200$ . Величина нормированного априорного интервала возможных значений времени прихода случайного импульса (1), (12) для рис. 7, 8 выбиралась равной  $m = 20$ . Наконец, на рис. 9 показаны теоретические и экспериментальные зависимости нормированного условного рассеяния  $\hat{V}_q = V(\hat{d}_m | d_0) / N_0^2$  адаптивной ОМП  $\hat{d}_m$  (16). Штриховые линии рассчитаны при  $K = 2$ , а сплошные линии – при  $K = 21$  (остальные обозначения совпадают с приведенными на рис. 6, 7). Экспериментальные значения на рис. 9 при  $m = 1$ ,  $K = 2$  (в случае надежной оценки времени прихода принимаемого импульса) изображены плюсиками, кружочками и звездочками, а при  $m = 20$ ,  $K = 21$  (в случае возможных аномальных оценок времени прихода импульсного сигнала) – квадратиками, крестиками и ромбиками.

Как следует из рис. 5-9 и проведенного анализа, теоретические зависимости для характеристик обнаружения случайного импульса (1), (12) и оценивания его времени прихода удовлетворительно аппроксимируют экспериментальные данные, по крайней мере, при  $\mu \geq 50$ ,  $m \geq 20$ , что соответствует выходным ОСШ, большим 0,5. Аналитические выражения для рассеяний оценок МО и величины СП импульсного сигнала (1), (12) хорошо аппроксимируют экспериментальные данные при выходных ОСШ, больших 3...4, для  $m \leq 20$  (когда аномальные ошибки возможны, но их вероятность достаточно мала), и ОСШ, больших 0,5, при  $m \lesssim 1$  (когда оценка времени прихода всегда является надежной).

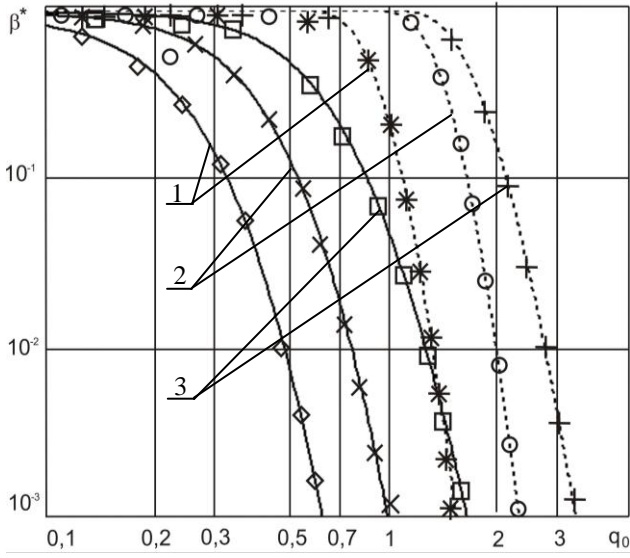


Рис. 5

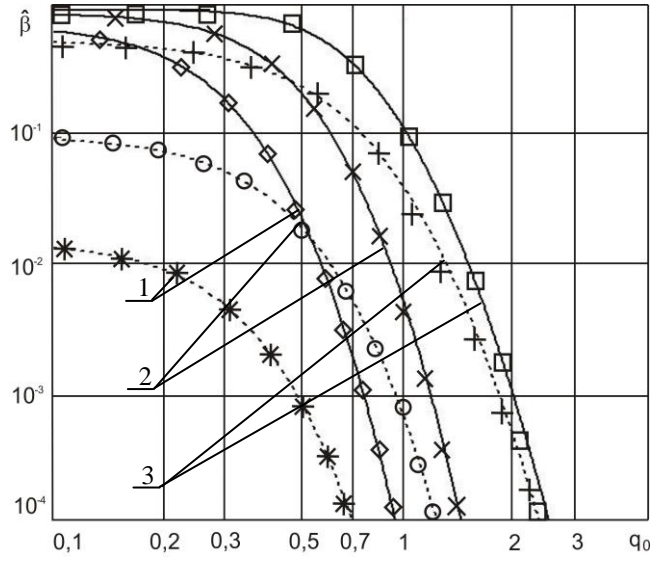


Рис. 6

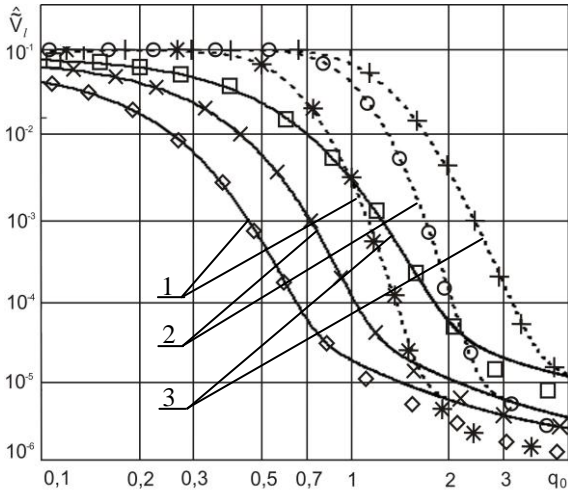


Рис. 7

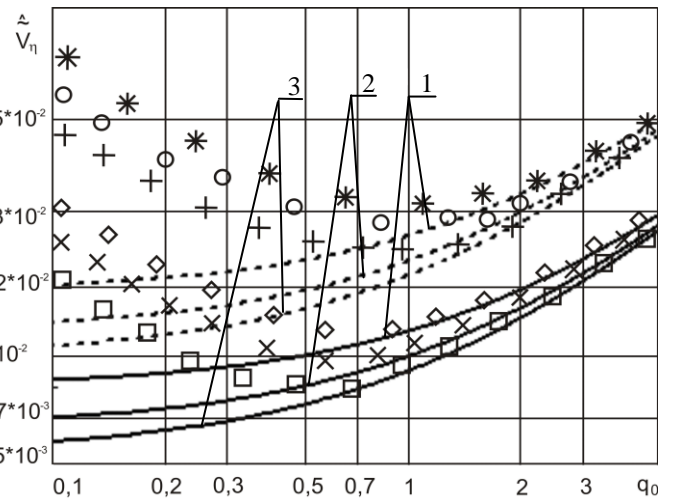


Рис. 8

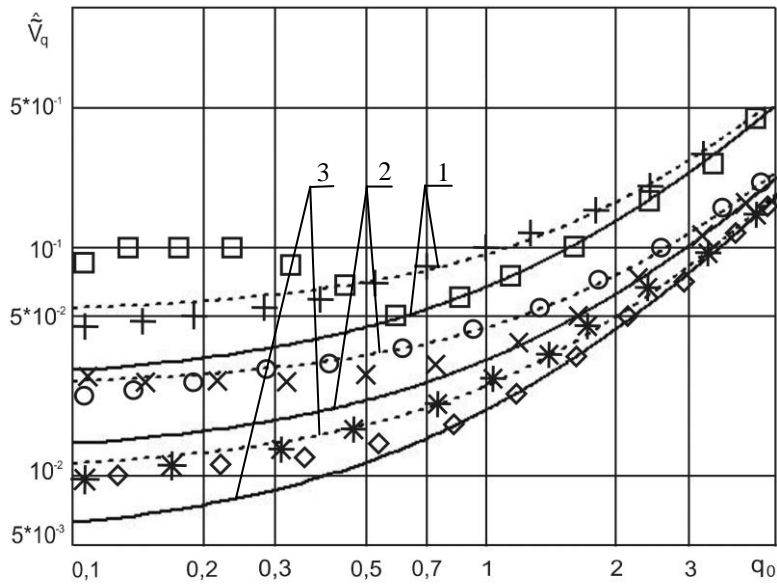


Рис. 9

В п. 4.2 четвертого раздела рассмотрено моделирование обнаружителей высокочастотного случайного импульса (1), наблюдаемого на фоне белой и коррелированной помех, и измерителей его временного и энергетического параметров. В целях экономии машинного времени были получены достаточно простые выражения для формирования отсчетов случайного процесса  $\tilde{M}(l) = M(\lambda, \tau^*)/N_0$ ,  $l = \lambda/\tau_0$  и случайной величины  $\tilde{M}_T = M_T/N_0$  в виде суммы двух низкочастотных квадратур. Далее на основе разработанной в п. 4.1 методики формирования на ЭВМ реализаций функционалов  $\tilde{L}_1(l)$  и  $\tilde{L}_3$  получены алгоритмы моделирования обнаружения (11) и совместных оценок (5), (6), (8)-(10) параметров  $\lambda_0$  и  $d_0$ .

Некоторые результаты статистического моделирования представлены на рис. 10-15, где показаны также соответствующие теоретические зависимости. Каждое экспериментальное значение получено при обработке не менее  $10^4$  реализаций  $\tilde{x}(\tilde{t}) = x(t)\sqrt{\tau_0/N_0}$  (2) для случая  $f(\tilde{t}) = \exp[-(\tilde{t} - l_0)^2/2]$ ,  $l_0 = (\tilde{\Lambda}_1 + \tilde{\Lambda}_2)/2$ ,  $\tilde{\Lambda}_1 = 1/2$ ,  $\tilde{\Lambda}_2 = m + 1/2$ ,  $\tilde{T} = m + 1$ . При этом границы доверительных интервалов отклонялись от полученных в результате опытов данных с вероятностью 0,9 не более чем на 10...15 %.

На рис. 10, 11 для  $m = 20$ ,  $q_v = 0,5$  изображены теоретические зависимости вероятностей пропуска сигнала  $\beta^*(q_0)$  импульсного сигнала (1) с неточно известной длительностью, рассчитанные при  $\delta_\tau = 0,1$  (рис. 10), либо  $\delta_\tau = -0,1$  (рис. 11). Здесь  $\delta_\tau = (\tau^* - \tau_0)/\tau_0$  – относительная расстройка по длительности импульса,  $q_0 = d_0/N_0$ . Кривые 1 соответствуют  $\mu = 50$ , 2 – 100, 3 – 200. Экспериментальные значения вероятности пропуска сигнала для  $\mu = 50$ , 100 и 200 обозначены на рис. 10, 11 квадратиками, крестиками и ромбиками.

На рис. 12 и 13 нанесены теоретические зависимости нормированного условного рассеяния  $V_l^* = 12V(\lambda_{qt}|\lambda_0)/(\Lambda_2 - \Lambda_1)^2$  оценки  $\lambda_{qt}$  (6) с учетом аномальных ошибок при  $m = 20$ ,  $q_v = 0,5$  и  $\delta_\tau = 0,1$  (рис. 12), либо  $\delta_\tau = -0,1$  (рис. 13). Обозначения на рис. 12, 13 совпадают с приведенными на рис. 10, 11.

Наконец на рис. 14, 15 для  $K^* = K/(1 + \delta_\tau) = 2$  и  $\delta_\tau = 0,1$  или  $\delta_\tau = -0,1$  нанесены теоретические зависимости нормированного условного рассеяния  $\hat{V}_{qt} = V(\hat{d}_{qt}|d_0)/N_0^2$  адаптивной оценки  $\hat{d}_{qt}$  (10) от параметра  $q_0$  в случае надежной оценки времени прихода  $\lambda_{qt}$  (6), а на рис. 16, 17 для  $K = 21$  и  $\delta_\tau = 0,1$  или  $\delta_\tau = -0,1$  показаны аналогичные зависимости нормированного рассеяния  $\hat{V}_{qt}$  адаптивной оценки  $\hat{d}_{qt}$  (10) с учетом возможного появления аномальных ошибок при оценивании времени прихода  $\lambda_0$ . Кривые 1 на рис. 14-17 рассчитаны для  $\mu = 100$ ,  $q_v = 1$ ; 2 –  $\mu = 200$ ,  $q_v = 1$ ; 3 –  $\mu = 100$ ,  $q_v = 0$ ; 4 –  $\mu = 200$ ,  $q_v = 0$ . Соответствующие экспериментальные значения рассеяния  $\hat{V}_{qt}$  обозначены квадратиками, крестиками, ромбиками и кружочками.

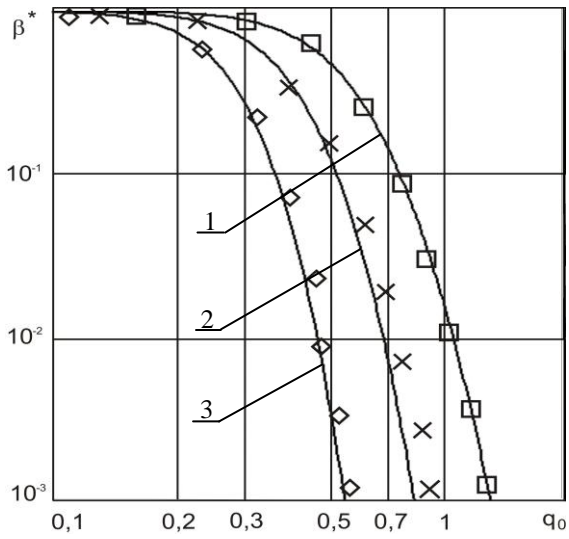


Рис. 10

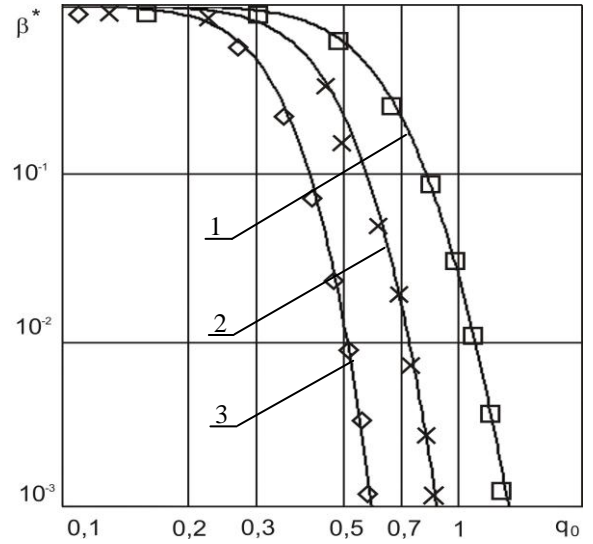


Рис. 11

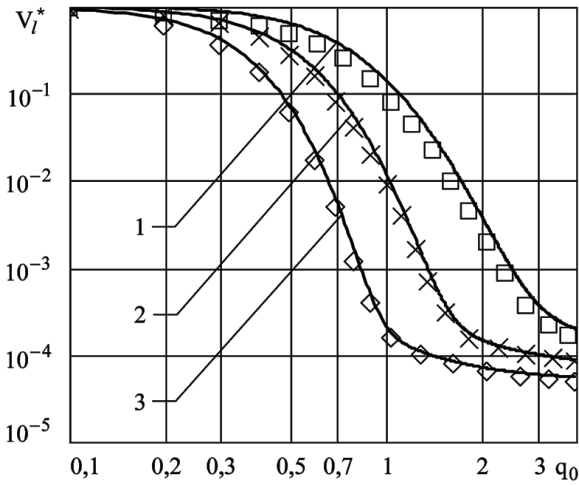


Рис. 12

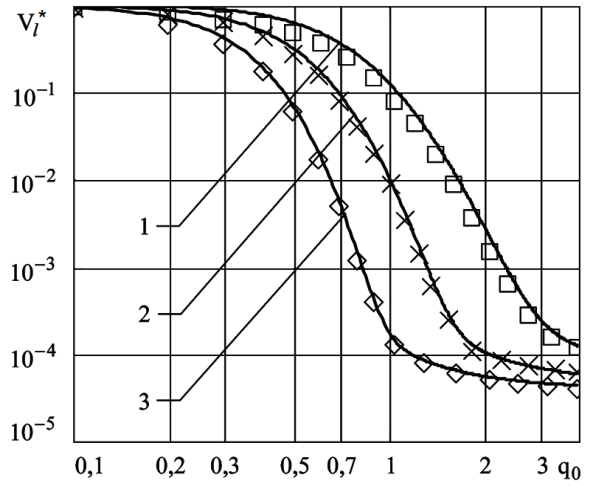


Рис. 13

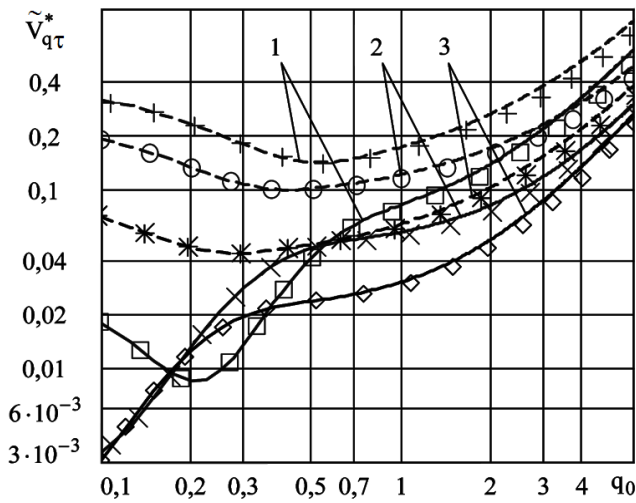


Рис. 14

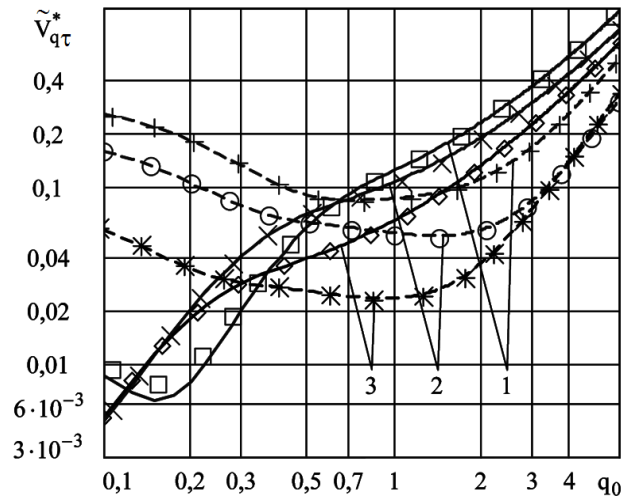


Рис. 15

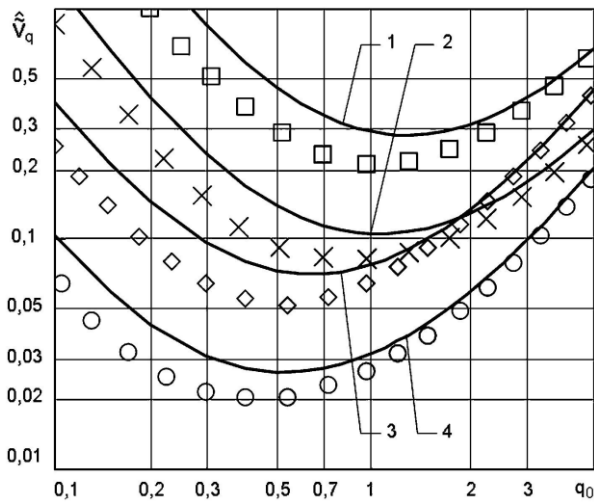


Рис. 16

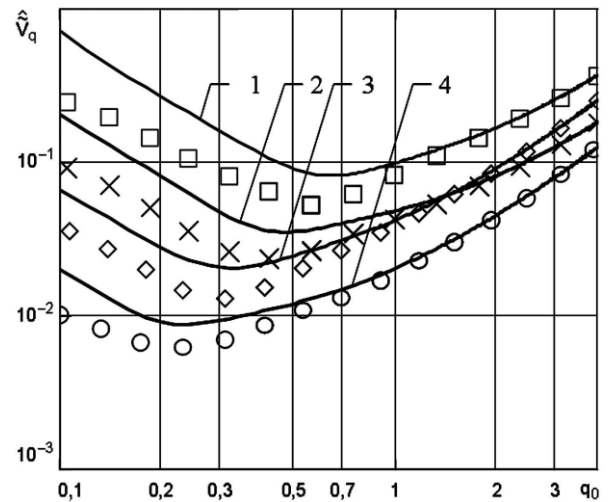


Рис. 17

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы. Теоретические зависимости для характеристик обнаружения высокочастотного случайного импульса (1) и оценивания его временного и энергетического параметров при возможных аномальных ошибках удовлетворительно аппроксимируют экспериментальные данные, по крайней мере, при  $\mu \geq 50$ ,  $m \geq 20$ , что соответствует выходным ОСШ, большим 0,5. Если же оценка времени прихода является надежной, аналитические зависимости для условных рассеяний оценок  $d_m$  (5),  $d_{qt}$  (6),  $\tilde{d}_m$ ,  $\tilde{d}_{qt}$  (8),  $d_m^*$ ,  $d_{qt}^*$  (9),  $\hat{d}_m$ ,  $\hat{d}_{qt}$  (10) обладают удовлетворительной точностью при ОСШ, больших 3...4.

В приложении рассмотрены способы аппроксимации часто встречающихся на практике нелинейных функций для их аппаратной реализации на современной элементной базе.

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

1. Предложена и развита модифицированная методика синтеза алгоритмов статистического анализа импульсных сигналов произвольной формы со случайной субструктурой, наблюдаемых на фоне коррелированных гауссовских помех, основанная на пренебрежении величинами порядка и менее времени корреляции субструктуры импульса.

2. На основе предложенной методики синтезированы алгоритмы обработки высокочастотного случайного импульса с огибающей произвольной формы, искаженного белым шумом и коррелированной гауссовской помехой, а именно: алгоритмы совместной оценки времени прихода импульсного сигнала и величины СП его случайной субструктуры при наличии или отсутствии априорной информации о длительности импульса; алгоритмы совместной оценки времени прихода и величины СП случайного импульса с априори известной или неточно известной длительностью при различной априорной неопределенности относительно и интенсивностей действующих помех; алгоритмы обнаружения случайного импульсного сигнала с неизвестными временем прихода и величиной СП при априори известной или неточно известной длительности импульса.

3. Получены алгоритмы оценки времени прихода, МО и величины СП низкочастотного импульсного сигнала с огибающей произвольной формы, наблюдаемого на фоне гауссовского белого шума и коррелированной гауссовской помехи. При этом интенсивность внешней помехи могла быть неизвестна или известна неточно.

4. Предложены алгоритмы обнаружения низкочастотного импульсного сигнала с неизвестными временем прихода, МО и величиной СП, искаженного белым шумом и коррелированной помехой, при различной априорной неопределенности относительно интенсивностей действующих помех.

5. Метод определения характеристик качества алгоритмов обработки импульсных сигналов, основанный на аппроксимации приращений выходной статистики алгоритма локально-марковским случайным процессом (метод локально-марковской аппроксимации), обобщен применительно к импульсным сигналам произвольной формы со случайной субструктурой, наблюдаемым на фоне небелых искажений. Использование этого метода позволило в пренебрежении величинами порядка и менее времени корреляции случайной субструктуры полезного сигнала получить достаточно простые асимптотические выражения для характеристик эффективности синтезированных в работе алгоритмов обработки.

6. С помощью программного и аппаратного статистического моделирования установлена работоспособность предложенных алгоритмов обнаружения низкочастотных и высокочастотных случайных импульсных сигналов и оценки их неизвестных параметров, а также найдены границы применимости асимптотически точных формул для характеристик эффективности этих алгоритмов.

Результаты работы имеют достаточно общий характер и могут быть использованы при статистическом анализе случайных импульсов оптического, акустического, электромагнитного, гравитационного и других происхождений, в различных областях радиофизики и радиотехники, связанных с регистрацией и измерением 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. Чернойоров О.В., Чернойорова Е.В., Шепелев Д.Н. Оценка дисперсии и временных параметров случайного радиоимпульса на фоне белого шума // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2007. – Т.1. – № 4. – С. 122-127.

2. Трифонов А.П., Чернойоров О.В., Шепелев Д.Н. Оценка дисперсии случайного радиоимпульса с неизвестным временем прихода при наличии помехи с неизвестной интенсивностью // Радиотехника. – 2009. – № 4. – С. 16-22.

3. Шепелев Д.Н., Розанов А.Е., Куприянова Я.А. Байесовская и максимально-правдоподобная оценки времени прихода случайного импульсного сигнала с огибающей произвольной формы // Вестник МЭИ. – 2013. – № 6.

**Публикации в межвузовских сборниках научных трудов и материалах конференций**

4. Федорков Е.Д., Шепелев Д.Н. Анализ сигналов со сложными частотно-временными характеристиками / Прикладные задачи моделирования и оптимизации // Сб. научных трудов. – Воронеж: ВГТУ, 2004. – С. 71.

5. Чернойоров О.В., Чернойорова Е.В., Шепелев Д.Н. Статистическое моделирование оценок времени прихода и параметров случайной субструктуры широкополосного импульсного сигнала на фоне белой и коррелированной помех // Технологии информационного общества: Тезисы докладов московской отраслевой научно-технической конференции. – М.: Инсвязьиздат, 2007. – С. 188-189.

6. Чернояров О.В., Выборнов С.В., Шепелев Д.Н. Полиномиальная аппроксимация нелинейных функций на основе ортогональных многочленов // Телевидение: передача и обработка изображений / Материалы 5-й Международной конференции. – СПб.: СПбГЭТУ, 2007. – С. 78-80.

7. Чернояров О.В., Черноярова Е.В., Шепелев Д.Н. Моделирование квазиправдоподобного и адаптивного алгоритмов оценки времени прихода и параметров случайной субструктуры широкополосного импульсного сигнала на фоне помех с неизвестной интенсивностью // Телекоммуникационные и информационные системы / Труды междунар. конф. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2007. – С. 280-300.

8. Шепелев Д.Н., Сидорова Н.А. Оценка дисперсии узкополосного случайного импульса с неточно известными временными параметрами // Труды Московского технического университета связи и информатики: – М.: “ИД Медиа Паблишер”, 2008. – Т. 1. – С. 324-329.

9. Шепелев Д.Н., Свидченко С.С., Сидорова Н.А. Исследование распределения оценки времени прихода случайного импульса на фоне белого шума с учетом аномальных ошибок // Труды научно-практической конференции "Управление созданием и развитием систем, сетей и устройств телекоммуникаций". – СПб.: СПбГТУ, 2008. – С. 204-214.

10. Чернояров О.В., Черноярова Е.В., Шепелев Д.Н. Оценка времени прихода и энергетических параметров широкополосного случайного импульса на фоне белой и коррелированной помех // Международная научно-техническая конференция К столетию со дня рождения В.А. Котельникова: Москва, 21-23 октября 2008: Тезисы докладов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – С. 41-43.

11. Шепелев Д.Н., Потапкин Д.А. Алгоритмы оценки времени прихода и дисперсии случайных импульсных сигналов на фоне помех с неизвестной интенсивностью // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова, серия: Научная сессия, посвященная дню радио. – Выпуск: LXIV. – Москва: ООО «Инсвязьиздат», 2009. – С.300-302.

12. Шепелев Д.Н. Обнаружение случайных импульсных сигналов произвольной формы на фоне помех в условиях параметрической априорной неопределенности // X Королёвские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием. – Самара: Изд. СГАУ, 2009. – С.307.

13. Шепелев Д.Н. Оценка дисперсии узкополосного случайного импульса с неизвестными временными параметрами на фоне помех // III Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и связь». Доклады – Том 2. – М.: Инсвязьиздат, 2009. – С. 171-175.

14. Шепелев Д.Н. Оценка времени прихода случайного импульса с неточно известной длительностью на фоне помех // Сборник докладов III Всероссийской конференции «Радиолокация и связь». Электронное издание. – М., 2009. – С. 905-915.

15. Шепелев Д.Н., Ссорин В.Н., Рашич А.В. Квазيبайесовская оценка времени прихода случайного радиоимпульса с неизвестной длительностью // Радиотехнические тетради. – 2013. – № 51. – С. 66-72.

16. Шепелев Д.Н., Артеменко А.А., Гельгор А.Л. Особенности распределения оценки времени прихода случайного радиоимпульса при неточно известной длительности // Радиотехнические тетради. – 2013. – № 51. – С. 73-78.

Работы № 1-3 опубликованы в изданиях, соответствующих списку ВАК РФ.