

На правах рукописи



Титов Константин Дмитриевич

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ КВАЗИРАДИОСИГНАЛОВ
С НЕИЗВЕСТНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ

Специальность 01.04.03 – «Радиофизика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Корчагин Юрий Эдуардович

Официальные оппоненты: **Конев Виктор Васильевич**,
доктор физико-математических наук, профессор;
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»
(г. Томск), заведующий кафедрой высшей
математики и математического моделирования

Ашихмин Александр Владимирович
доктор технических наук, профессор,
АО «ИРКОС» (г. Москва), главный инженер

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный
технический университет»**

Защита состоится 21 июня 2018 года в 17:00 на заседании диссертационного совета Д 212.038.10 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, ВГУ, физический факультет, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Воронежского государственного университета и на сайте:

<http://www.science.vsu.ru/disserinfo&cand=3093>

Автореферат разослан 18 мая 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



СТЕПКИН
Владислав Андреевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Развитие информационных технологий требует совершенствования существующих и построения новых телекоммуникационных и локационных систем с целью повышения пропускной способности при передаче информации по беспроводному каналу. Значительная часть известных оптимальных алгоритмов обработки сигналов основывается на предположении об их относительной узкополосности. Это позволяет вместо быстро осциллирующего сигнала проводить обработку медленно меняющихся функций (огибающей и фазы), описывающих узкополосный сигнал. Тем не менее, эволюция информационных радиofизических систем имеет тенденцию использования широкополосных и сверхширокополосных (СШП) сигналов в задачах телекоммуникаций и дистанционного зондирования, что позволяет повысить эффективность использования радиочастотного спектра и увеличить скорость передачи информации.

Существующие технологии широкополосного беспроводного доступа Wi-Fi, Wi-MAX и др. частично решают задачу повышения скорости передачи информации, однако существуют довольно строгие ограничения на количество операторов, работающих в лицензированном диапазоне частот. Поэтому разработка технологий СШП беспроводного доступа, позволяющих повторно использовать задействованные полосы частот, и тем самым повысить эффективность использования радиочастотного спектра, является актуальной. При этом СШП сигналы обладают высокой скрытностью и помехозащищённостью.

Сверхширокополосные сигналы находят всё более широкое применение в системах связи и локации. Внедрение СШП сигналов в системы телекоммуникаций позволяет увеличить скорость передачи данных за счёт большой ширины спектра. Использование СШП сигналов в измерительных системах, медицине, радиолокации и устройствах позиционирования раскрывает возможности повышения точности измерений и увеличения разрешающей способности.

Однако, класс СШП сигналов весьма широк и включает в себя большое количество различных математических моделей. Получение конструктивных результатов исследования алгоритмов обработки СШП сигналов любого типа довольно затруднительно. Поэтому среди СШП сигналов в диссертации рассматривается один из наиболее перспективных подклассов таких сигналов, структура которых подобна узкополосным радиосигналам, однако условие узкополосности для них не выполняется. Такие сигналы в литературе названы СШП квазирадиосигналами (КРС). Подобное сужение класса исследуемых сигналов позволяет получить более глубокие и содержательные результаты. Вследствие специфики СШП сигналов фундаментальная задача статистического синтеза и анализа оптимальных алгоритмов их обработки остаётся к настоящему времени в значительной степени нерешённой. Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью построения новых и совершенствования имеющихся систем телекоммуникаций и локации, использующих СШП КРС.

Степень разработанности темы исследования. Разработка технологий СШП беспроводного доступа является предметом исследований отечественных и зарубежных ведущих коллективов учёных. Существующие в настоящее время системы связи и радиолокации, использующие СШП видеосигналы (ВС),

недостаточно эффективны по следующим причинам: невозможность эффективного излучения одним антенно-фидерным устройством сигнала с шириной полосы в несколько гигагерц при положении максимума спектра вблизи нулевой частоты; при больших значениях спектральной плотности сигнала в частотном диапазоне до сотен мегагерц передача сигнала компактными антеннами невозможна, а с ростом частоты, когда передача становится возможна, убывает спектральная плотность сигнала; наличие лицензируемого диапазона частот накладывает ограничения на спектральную плотность сигнала в диапазоне до 3,1 ГГц, где и сосредоточен её максимум.

Эти факторы обуславливают небольшие дистанции связи систем с СШП ВС, при их кажущемся потенциале. Использование СШП КРС при проектировании систем связи позволяет перенести спектр сигнала в область более высоких частот, тем самым исключить проблемы с эффективным излучением сигнала, при условии создания эффективных антенно-фидерных устройств. Исследование влияния формы и длительности излучаемых сверхкоротких импульсов позволит повысить эффективность передатчиков.

Оптимальные и квазиоптимальные (КО) алгоритмы обработки регулярных СШП КРС с неизвестными амплитудой и временем прихода исследованы в известной литературе. Однако в силу особенностей процесса распространения, а также из-за возможной неточности модели на приёмной стороне часто неизвестна длительность СШП сигнала. Большинство известных алгоритмов обработки СШП КРС не учитывают возможного нарушения условий регулярности. Поэтому необходимо исследовать алгоритмы обработки разрывных СШП КРС с неизвестной длительностью при наличии других неизвестных неинформативных параметров сигнала.

Цель работы. Целью научного исследования является разработка теоретических основ построения алгоритмов обработки сигналов в системах радиосвязи, локации и др., использующих СШП КРС, а также совершенствование методов анализа алгоритмов обработки с учётом особенностей сигналов такого класса. Для реализации этой цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи.

1. Синтез и анализ максимально правдоподобного (МП), квазиправдоподобных (КП) и КО алгоритмов обнаружения разрывных СШП КРС с неизвестными амплитудой, начальной фазой и длительностью.
2. Исследование эффективности функционирования синтезированных алгоритмов обнаружения СШП КРС. Сравнение синтезированных алгоритмов с ранее известными – оптимальными алгоритмами обнаружения СШП КРС с известной длительностью и алгоритмами обнаружения узкополосного радиосигнала.
3. Синтез и анализ МП и КП алгоритмов оценки амплитуды и длительности СШП КРС в условиях априорной параметрической неопределённости.
4. Исследование эффективности функционирования синтезированных алгоритмов оценки амплитуды и длительности СШП КРС.
5. Разработка рекомендаций по обоснованному выбору обнаружителей и устройств оценки неизвестных параметров при проектировании систем радиосвязи, радиолокации и др.

6. Статистическое моделирование на ЭВМ алгоритмов обработки СШП КРС с целью верификации синтезированных алгоритмов обработки и определения границ применимости получаемых асимптотических выражений для их характеристик.

Методы проведения исследований. При решении задач обнаружения СШП КРС использовались методы теории проверки статистических гипотез, которые позволяют вынести оптимальное решение о наличии или отсутствии сигнала в наблюдаемой реализации. Применение методов теории оценок параметров позволило вынести оптимальное решение о значениях неизвестных параметров СШП КРС при условии присутствия сигнала в принятой реализации. При решении задач анализа алгоритмов обработки СШП КРС применение того или иного метода зависело от свойств решающей статистики. Для разрывного сигнала решающая статистика недифференцируема ни в одном вероятностном смысле и применялся метод локально-марковской аппроксимации. Для проверки работоспособности синтезированных алгоритмов обработки СШП КРС, а также установления границ применимости асимптотических выражений для статистических характеристик алгоритмов использовались методы статистического моделирования на ЭВМ.

Научная новизна.

1. Синтезированы новые МП, КП и КО алгоритмы обнаружения разрывных СШП КРС с неизвестными амплитудой, начальной фазой и длительностью. Исследована их эффективность в сравнении с известными алгоритмами обнаружения. Впервые разработаны способы построения и структурные схемы новых оптимальных и КО алгоритмов обнаружения и оценки параметров СШП КРС с неизвестными амплитудой, начальной фазой и длительностью.
2. Впервые найдены точные и/или асимптотически точные выражения в замкнутой форме для характеристик обнаружения (вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода) синтезированных обнаружителей. Уточнена методика получения аналитических выражений для характеристик эффективности функционирования алгоритмов обнаружения СШП КРС с неизвестной длительностью.
3. Синтезированы новые МП и КП алгоритмы оценки амплитуды и длительности СШП КРС в условиях априорной параметрической неопределённости.
4. Исследована эффективность синтезированных алгоритмов оценки амплитуды и длительности СШП КРС при наличии различной априорной информации. Получены выражения в замкнутой форме для их статистических характеристик – смещения и рассеяния.
5. Исследовано влияние априорного незнания параметров сигнала на эффективность функционирования различных алгоритмов обработки СШП КРС.

Теоретическая и практическая значимости работы. Теоретическая значимость работы заключается в развитии методологии статистической радиофизики в части синтеза и анализа алгоритмов обработки радиосигналов. Если условие относительной узкополосности не выполняется, то изменением модулирующей функции можно описать как СШП КРС с большой относительной полосой частот, так и узкополосные радиосигналы, для которых выполняется условие относительной узкополосности, а наличие или отсутствие гармонической компоненты – сверхширокополосный квазиреалистичный сигнал или видеосигнал,

соответственно. Таким образом, исследование эффективности функционирования алгоритмов обработки СШП КРС с неизвестными параметрами, как наиболее широкого класса сигналов, позволяет получить аналитические выражения для статистических характеристик алгоритмов обнаружения и оценки для всех вышеперечисленных видов сигналов. Наличие таких выражений позволяет одновременно осуществлять сравнение алгоритмов обработки СШП КРС, видеосигналов и узкополосных радиосигналов, что даёт возможность обоснованного выбора структурных схем проектируемых систем связи. Практические результаты диссертационной работы могут найти при анализе алгоритмов функционирования, моделирования и проектирования перспективных образцов систем радиосвязи, передачи данных, радиолокации и др.

Внедрение научных результатов. Полученные в диссертационной работе результаты были использованы при выполнении грантов Российского научного фонда (проекты № 14-49-00079, № 15-11-10022 и № 17-71-10057).

Научная работа была поддержана стипендией Президента Российской Федерации для молодых учёных и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2018–2020 годы.

Ряд результатов внедрён в научно-исследовательский и учебный процесс АО «Концерн «Созвездие», Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) и Воронежского государственного университета.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Структуры синтезированных оптимальных алгоритмов обнаружения и оценки амплитуды и длительности СШП КРС в условиях априорной параметрической неопределённости, позволяют осуществить практическую реализацию новых и усовершенствовать имеющиеся системы радиосвязи и локации, в случае невыполнения условия относительной узкополосности.
2. Результаты анализа КО алгоритма обнаружения СШП КРС позволили определить эффективность обнаружителей узкополосного радиосигнала, широко применяющихся в современной аппаратуре радиосвязи и передачи данных, при поступлении на вход исследуемого перспективного СШП КРС.
3. Точные и асимптотически точные выражения для расчёта характеристик эффективности функционирования синтезированных алгоритмов обнаружения и оценки амплитуды и длительности СШП КРС в условиях априорной параметрической неопределённости.
4. Результаты сравнения эффективности функционирования алгоритмов обработки СШП КРС в условиях различной априорной неопределённости и сложности их аппаратной или программной реализации.

Достоверность результатов и обоснованность основных положений и выводов, содержащихся в диссертационной работе, базируется на корректном использовании современного математического аппарата статистической радиофизики, подтверждается совпадением выносимых на защиту результатов с ранее известными в частных или предельных случаях, а также удовлетворительным согласованием полученных аналитических результатов с результатами статистического моделирования на ЭВМ.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 12 международных и всероссийских конференциях, в том числе:

1. XII Международной IEEE Сибирской конференции по управлению и связи «SIBCON-2016» (г. Москва, 2016г.);
2. III Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации» (г. Красноярск, 2016 г.);
3. XI Международной IEEE научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (г. Омск, 2017 г.);
4. XXI–XXIII Международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2015–2017 гг.);
5. Международной IEEE конференции молодых исследователей в области электротехники и электроники «2018 ElConRus» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.).

По итогам XII Международной IEEE Сибирской конференции по управлению и связи SIBCON-2016 вручен диплом за 1 место в конкурсе статей и устных выступлений с докладом. По итогам Международной конференции-конкурса молодых физиков, проводимой в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН в 2018 году, вручен диплом I степени и премия за лучшую научную работу.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 16 научных работах [1–16], а также получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [17]. Из них, 6 работ [1–6] опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертационных работ, а 3 работы [7-9] – в изданиях, включённых в глобальные индексы цитирования Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора. В работах, выполненных совместно, научному руководителю принадлежит формулировка решаемой задачи и определение направлений, в которых нужно вести исследования. Подробное проведение рассуждений и доказательств, исследование актуальности и состояния решаемых задач, выполнение аналитических и численных расчётов, подготовка и реализация статистического моделирования на ЭВМ синтезированных алгоритмов, а также анализ и интерпретация результатов исследований выполнено лично автором.

Структура и объём работы. Диссертация изложена на 139 страницах и состоит из введения, 3 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 139 названий и 45 рисунков.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, изложены современные направления и перспективы исследований в данной области, поставлены цели и задачи работы. Дана характеристика работы, определены новые научные результаты и сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** определён подкласс исследуемых сигналов во множестве СШП сигналов, структура которых подобна узкополосным радиосигналам, однако условие относительной узкополосности для них не выполняется. Такие сигналы названы СШП КРС. В рамках этой терминологии узкополосные радиосигналы являются частным случаем СШП КРС.

Были синтезированы два КП, МП и два КО обнаружителя СШП КРС с неизвестными амплитудой, начальной фазой и длительностью на фоне белого гауссовского шума. СШП КРС произвольной формы имеет вид

$$s(t, a, \varphi, \tau) = \begin{cases} a f(t) \cos(\omega t - \varphi), & 0 \leq t \leq \tau, \\ 0, & t < 0, t > \tau, \end{cases} \quad (1)$$

где a , φ , ω , τ – амплитуда, начальная фаза, частота и длительность СШП КРС соответственно, а $f(t)$ – модулирующая функция, описывающая форму сигнала. Если полоса частот $\Delta\omega$ и частота ω сигнала (1) удовлетворяют условию

$$\Delta\omega \ll \omega, \quad (2)$$

то сигнал (1) является узкополосным радиосигналом, а $f(t)$ является его огибающей. Если условие (2) не выполняется, то формула (1) описывает СШП КРС.

Предполагалось, что полезный сигнал имеет неизвестную амплитуду a , начальную фазу φ и длительность τ , и наблюдается в течение интервала времени $t \in [0, T]$ на фоне аддитивного гауссовского белого шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 . Аддитивная смесь сигнала (1) и шума $n(t)$ имеет вид

$$\xi(t) = \gamma_0 s(t, a_0, \varphi_0, \tau_0) + n(t), \quad (3)$$

где a_0 , φ_0 , τ_0 – истинные значения амплитуды, начальной фазы и длительности, γ_0 – дискретный параметр, который принимает значение $\gamma_0 = 0$ при отсутствии сигнала и $\gamma_0 = 1$ – при наличии сигнала. Предполагалось, что длительность сигнала может принимать значения из заранее заданного априорного интервала $\tau \in [T_1, T_2]$. Располагая принятой реализацией (3) приёмное устройство должно выносить решение о наличии или отсутствии сигнала. В таком случае задача обнаружения сигнала сводится к оценке параметра состояния γ_0 .

Синтез алгоритмов обнаружения сигнала выполнялся методом МП, то есть путём поиска алгоритма формирования оценки параметра γ на основе наблюдаемой реализации (3). При наличии априорной неопределённости относительно амплитуды, начальной фазы и длительности решающая статистика (логарифм ФОП) зависит четырёх неизвестных параметров

$$L(\gamma, a, \varphi, \tau) = \frac{2\gamma}{N_0} \int_0^\tau \xi(t) s(t, a, \varphi) dt - \frac{\gamma}{N_0} \int_0^\tau s^2(t, a, \varphi) dt. \quad (4)$$

Преодоление априорного незнания неинформативных параметров сводится к тому, что в выражении для логарифма ФОП (4) нужно использовать их фиксированные, или определяемые на основе анализа поступающей на вход приёмника реализации наблюдаемых данных значения. От способа выбора этих значений зависит структура алгоритма формирования оценки, а также её точность.

Были синтезированы КП и МП алгоритмы обнаружения, отличающиеся способом преодоления априорной параметрической неопределённости. При синтезе КП алгоритма обнаружения с адаптацией по амплитуде и начальной фазе вместо неизвестной длительности в выражении (4) использовалось некоторое ожидаемое её значение τ^* из области возможных значений $[T_1, T_2]$, а вместо амплитуды и начальной фазы – их КП оценки, т.е.

$$L^* = L(\tau^*), \quad L(\tau) = L(\hat{a}, \hat{\varphi}, \tau), \quad (\hat{a}, \hat{\varphi}) = \arg \sup_{a, \varphi} L(a, \varphi, \tau), \quad L(a, \varphi, \tau) = L(\gamma = 1, a, \varphi, \tau).$$

После максимизации логарифма ФОП (4) по переменным a и φ , решающая статистика принимает вид

$$L(\tau) = \frac{X^2(\tau)[Q(\tau) - P_c(\tau)] + Y^2(\tau)[Q(\tau) + P_c(\tau)] - 2X(\tau)Y(\tau)P_s(\tau)}{2[Q^2(\tau) - P_c^2(\tau) - P_s^2(\tau)]}, \quad (5)$$

где $X(\tau) = \frac{2}{N_0} \int_0^\tau \xi(t)f(t)\cos \omega t \, dt$, $Y(\tau) = \frac{2}{N_0} \int_0^\tau \xi(t)f(t)\sin \omega t \, dt$,

$$Q(\tau) = \frac{1}{N_0} \int_0^\tau f^2(t)dt, \quad P_c(\tau) = \frac{1}{N_0} \int_0^\tau f^2(t)\cos 2\omega t \, dt, \quad P_s(\tau) = \frac{1}{N_0} \int_0^\tau f^2(t)\sin 2\omega t \, dt.$$

КП алгоритм обнаружения заключается в сравнении с порогом случайной величины $L^* \geq h$. Была найдена плотность вероятности случайной величины L^* и вероятности ошибок 1-го рода (ложной тревоги) и 2-го рода (пропуска сигнала).

При синтезе КП алгоритма обнаружения с адаптацией по длительности вместо неизвестных амплитуды и начальной фазы в логарифме ФОП (4) использовались их некоторые ожидаемые значения a^* и φ^* соответственно, а вместо неизвестной длительности – её КП оценка. Алгоритм обнаружения заключается в сравнении с порогом величины максимума $L = \sup L^*(\tau)$ решающей статистики $L^*(\tau) = L(a^*, \varphi^*, \tau)$,

$$L(\tau) = a^* \left(X(\tau) \cos \varphi^* + Y(\tau) \sin \varphi^* \right) - \frac{a^{*2}}{2} \left[Q(\tau) + P_c(\tau) \cos 2\varphi^* + P_s(\tau) \sin 2\varphi^* \right]. \quad (6)$$

Для примера, на рисунке 1 приведена блок-схема КП обнаружителя СШП КРС с адаптацией по длительности (6), где И – интеграторы, работающие на

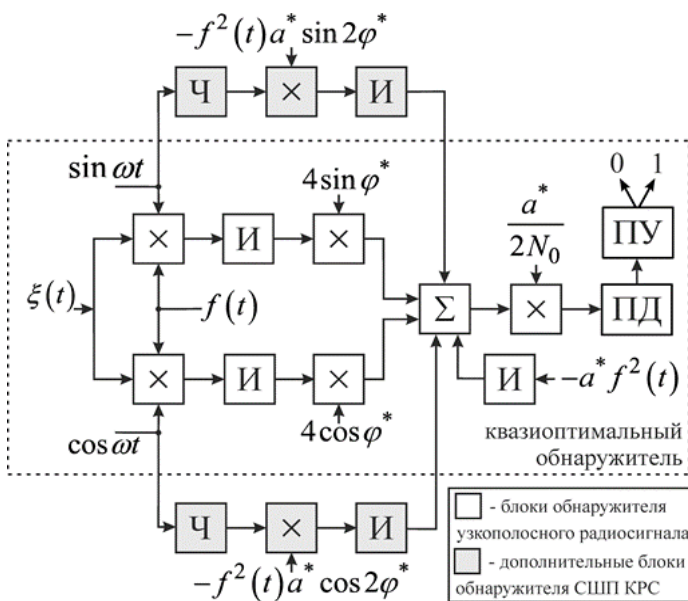


Рис. 1

интервале времени $[0, t]$, $t \in [0, T_2]$, Ч – удвоители частоты, ПД – пиковый детектор, ПУ – пороговое устройство, которое осуществляет сравнение величины максимума L с порогом h и выносит решение о наличии или отсутствии сигнала.

Были найдены статистические характеристики случайного процесса (6) при наличии и отсутствии полезного сигнала, и показано, что при больших отношениях сигнал/шум (ОСШ) решающая статистика может быть аппроксимирована гауссовским марковским процессом с кусочно-постоянными коэффициентами сноса

и диффузии. Используя марковские свойства случайного процесса (6), на основе решения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова, были найдены асимптотически точные выражения для вероятностей ошибок.

Максимально правдоподобный способ преодоления априорной параметрической неопределённости предполагает использование в выражении для логарифма ФОП вместо неизвестных параметров их оценок, что равносильно максимизации логарифма ФОП по a , φ и τ . Тогда МП обнаружитель должен формировать случайный процесс $L(\tau)$ как функцию τ , находить величину его максимума и сравнивать её с порогом $L = \sup L(\tau) \underset{>}{\underset{<}{\geq}} h$. Исследование решающей статистики (5) при отсутствии и наличии сигнала, позволяет найти вероятности ошибок МП обнаружителя. Так, при отсутствии сигнала решающая статистика является локально-стационарным и локально-марковским случайным процессом, что позволяет найти асимптотическое выражение для вероятности ложной тревоги. Асимптотическое выражение для вероятности пропуска сигнала было найдено методом локально-марковской аппроксимации.

Квазиоптимальными были названы алгоритмы обнаружения, синтезированные для узкополосных радиосигналов без учёта возможного невыполнения условия узкополосности (2). Решающая статистика КО алгоритмов обнаружения СШП КРС, для которых $P_c(\tau), P_s(\tau) \ll Q(\tau)$, имеет по сравнению с (5) более простой вид

$$L_{ко}(\tau) = (X^2(\tau) + Y^2(\tau)) / 2Q(\tau), \quad (7)$$

и совпадает с решающей статистикой хорошо исследованного квадратурного обнаружителя. Решающая статистика (7) зависит от τ или τ^* , в зависимости от того, какой КО алгоритм реализуется – с адаптацией по длительности или без неё. Были найдены статистические характеристики КО алгоритмов обнаружения – вероятности ложной тревоги и пропуска сигнала. На рисунках 2 и 3 представлены зависимости вероятности пропуска сигнала от ОСШ различными обнаружителями СШП КРС, где $z_0^2 = a_0^2 Q(\tau_0)$, $z^2 = 2a_0^2 T_2 / N_0$.

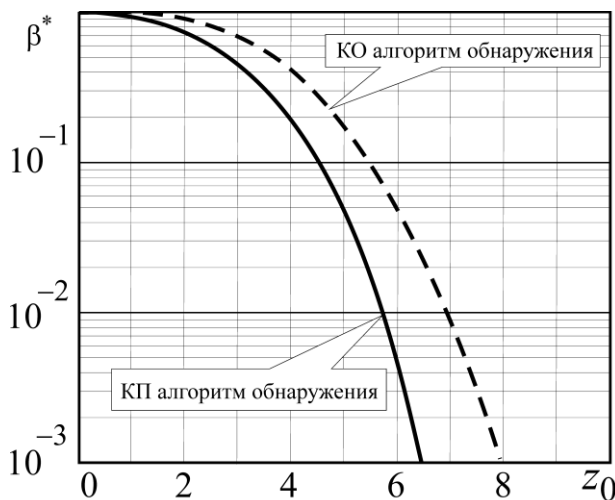


Рис. 2

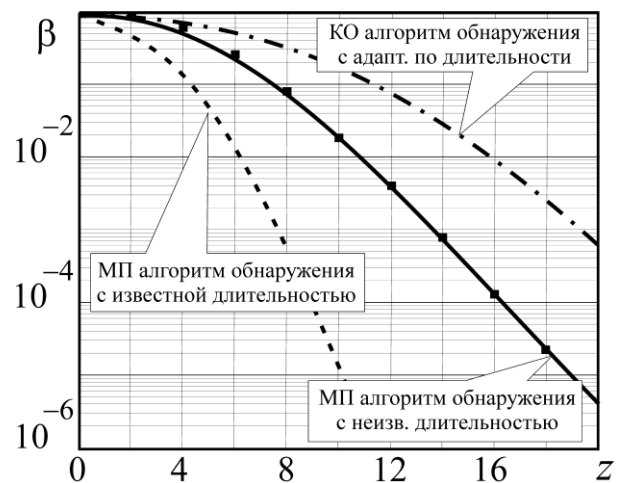


Рис. 3

Найденные точные и асимптотически точные выражения для характеристик обнаружения синтезированных детекторов позволяют провести сравнительный анализ синтезированных алгоритмов обнаружения СШП КРС с неизвестными амплитудой, начальной фазой и длительностью и сделать выводы об их эффективности.

Установлено, что в рассмотренном выше примере неоптимальность алгоритма в случае адаптации по амплитуде и фазе приводит к проигрышу в эффективности обнаружения в 10 раз (при $z_0=6$), в случае МП алгоритма обнаружения – в 13 раз (при $z=12$). Незнание длительности в МП алгоритме обнаружения снижает эффективность обнаружителя на 4 порядка (при $z=12$).

Во **второй** главе рассмотрена задача оценки амплитуды СШП КРС. Синтезированы КП и МП алгоритмы оценки амплитуды СШП КРС, найдены их характеристики (условные смещение, дисперсия и рассеяние).

При синтезе КП алгоритма оценки амплитуды вместо неизвестной длительности использовалось некоторое её ожидаемое значение, а по амплитуде и начальной фазе была выполнена максимизация решающей статистики (5) и найдено выражение для КП оценки

$$\hat{a} = \frac{\sqrt{X^2(\tau^*)A(\tau^*) + Y^2(\tau^*)B(\tau^*) - 4X(\tau^*)Y(\tau^*)Q(\tau^*)P_s(\tau^*)}}{Q^2(\tau^*) - P_c^2(\tau^*) - P_s^2(\tau^*)}, \quad (8)$$

где $A(\tau^*) = (Q(\tau^*) - P_c(\tau^*))^2 + P_s^2(\tau^*)$, $B(\tau^*) = (Q(\tau^*) + P_c(\tau^*))^2 + P_s^2(\tau^*)$.

При синтезе МП алгоритма оценки длительности вместо ожидаемого значения длительности использовалась её МП оценка $\tau_m = \arg \sup L(\tau)$. Структура приёмного устройства определяется выражениями (5) и (8). Приёмник МП формирует случайный процесс (5) для всех возможных значений длительности и находит МП оценку длительности как положение его максимума. Подставив найденную оценку длительности в выражение (8), получаем искомую МП оценку амплитуды.

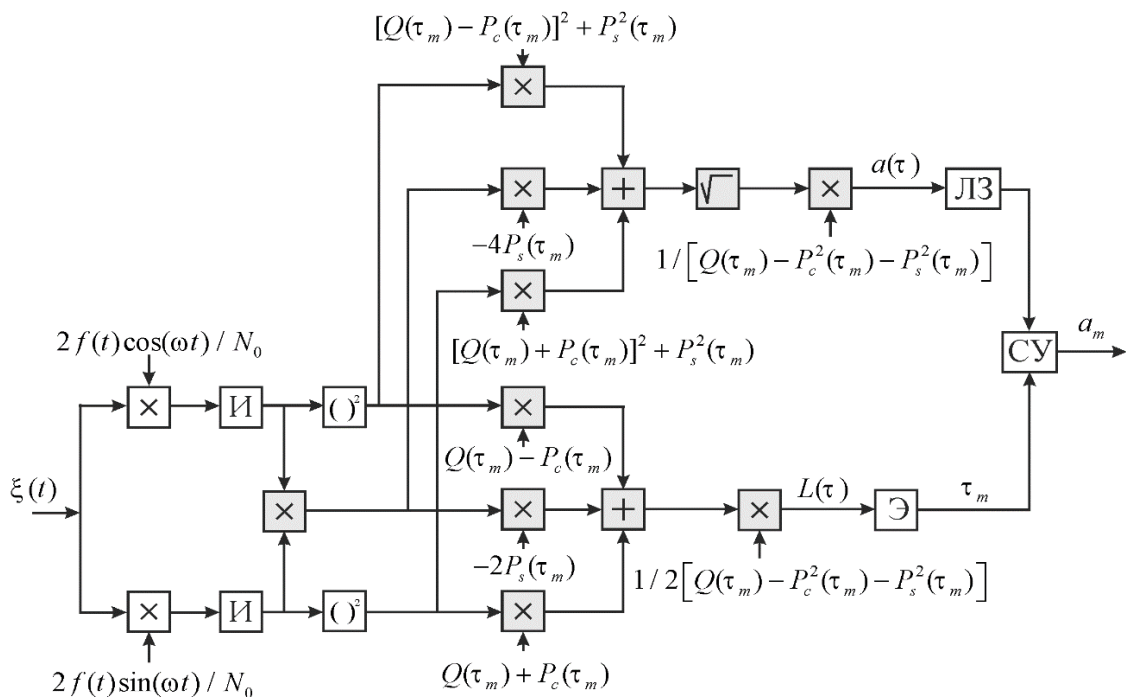


Рис. 4

В качестве примера на рис. 4 изображена блок-схема МП измерителя амплитуды, где обозначено: И – интеграторы на интервале времени $[0, t]$, $t \in [0, T_2]$, Э – экстрематор, осуществляющий поиск положения наибольшего максимума входного сигнала на интервале времени $[T_1, T_2]$, ЛЗ – линия задержки на время T_2 , СУ – стробирующее устройство, фиксирующее значение входного сигнала в момент времени $T_2 + \tau_m$.

Были получены точные и асимптотически точные выражения для характеристик синтезированных алгоритмов оценки амплитуды СШП КРС.

На рис. 5 изображены зависимости условного рассеяния, нормированного на a_0^2 , от ОСШ при различных расстройках длительности ожидаемого сигнала Δ_τ . Проигрыш в эффективности оценки, вследствие незнания длительности СШП КРС, можно охарактеризовать отношением рассеяний оценки амплитуды при наличии и при отсутствии расстройки длительности $\chi_V = V(z_0, \Delta_\tau) / V(z_0, \Delta_\tau = 1)$, а также величиной нормированного смещения $\chi_b = b(z_0, \Delta_\tau) / \sqrt{V(z_0, \Delta_\tau)}$. На рис. 6 и 7 приведены соответственно зависимости проигрыша в точности КП оценки амплитуды и нормированного смещения от величины расстройки длительности ожидаемого сигнала Δ_τ при различных ОСШ.

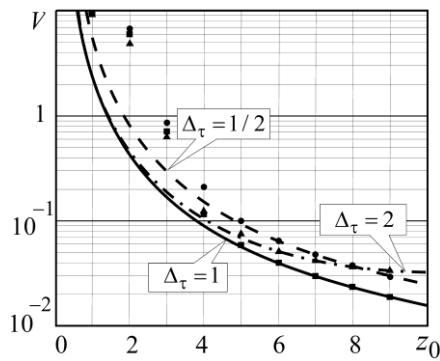


Рис. 5

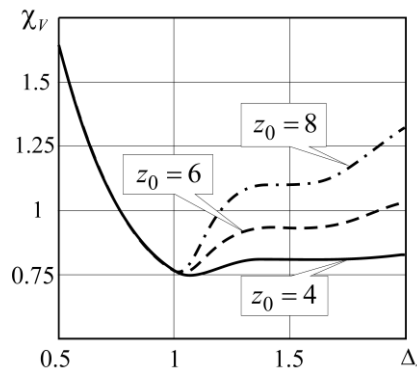


Рис. 6

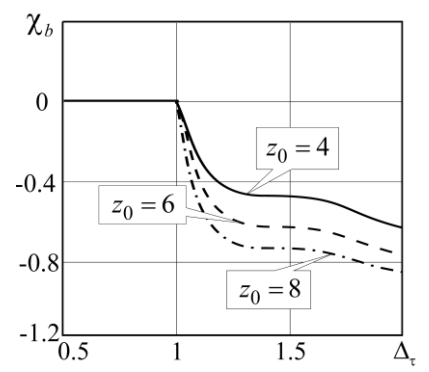


Рис. 7

Как видно из рисунков 5–7, априорное незнание длительности сигнала приводит к существенному снижению точности оценки амплитуды. При малых ОСШ и $\Delta_\tau > 1$ КП оценка обладает меньшим рассеянием, чем при отсутствии расстройки и при $\Delta_\tau < 1$. При $\Delta_\tau > 1$ КП оценка амплитуды является несостоятельной, её смещение не стремится к нулю с ростом ОСШ.

В **третьей главе** рассмотрена задача оценки длительности СШП КРС. Синтезированы КП и МП алгоритмы оценки длительности СШП КРС с неизвестными амплитудой и начальной фазой.

При синтезе КП алгоритма оценки длительности приёмник формирует логарифм ФАП (6) для ожидаемых значений амплитуды и начальной фазы и всех возможных значений длительности $\tau \in [T_1, T_2]$

$$\tau_q = \arg \sup L_q(\tau), \quad L_q(\tau) = L(\tau, a^*, \varphi^*), \quad (9)$$

и находит КП оценку длительности как положение абсолютного (наибольшего) максимума решающей статистики (9). Выражения (6) и (9) определяют структуру приёмного устройства. При синтезе МП алгоритма оценки длительности выполнялась максимизация логарифма ФОП (4) по амплитуде и начальной фазе, тогда решающая статистика принимает вид (5).

На рис. 8 изображена блок-схема МП измерителя длительности, где обозначено: И – интеграторы на интервале времени $[0, t]$, $t \in [T_1, T_2]$, Э – экстрематор, осуществляющий поиск положения наибольшего максимума входного сигнала на интервале времени $[T_1, T_2]$.

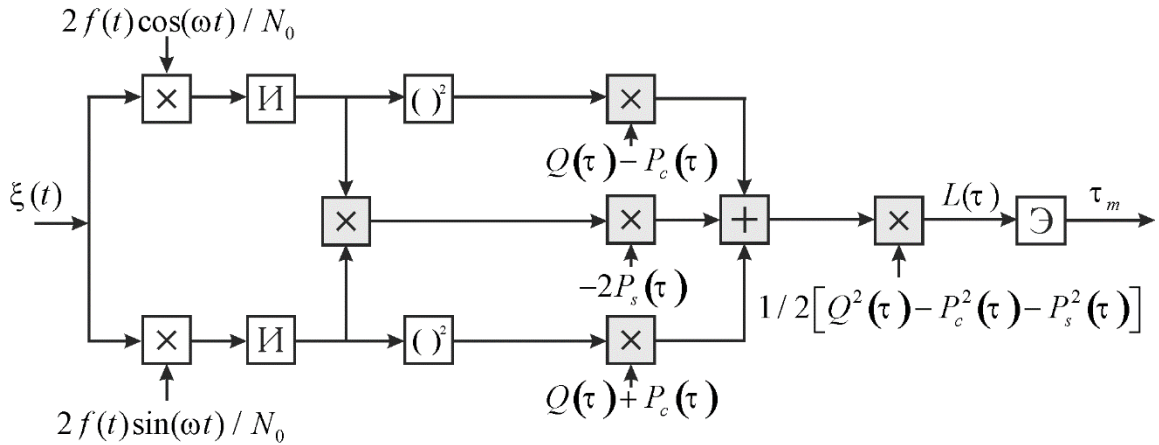


Рис. 8

Выполнив анализ синтезированных алгоритмов оценки длительности методом локально-марковской аппроксимации были найдены асимптотически точные выражения для характеристик синтезированных алгоритмов оценки длительности СШП КРС.

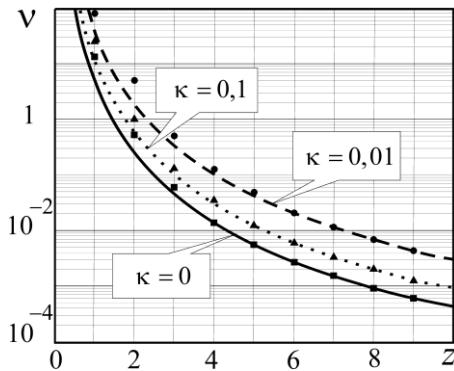


Рис. 9

В качестве примера на рис. 9 приведены зависимости нормированного условного рассеяния МП оценки длительности СШП КРС прямоугольной формы и узкополосного радиосигнала от ОСШ при различных значениях параметра узкополосности κ . Для сравнения точности КП оценки длительности с точностью МП оценки, была введена в рассмотрение величина проигрыша

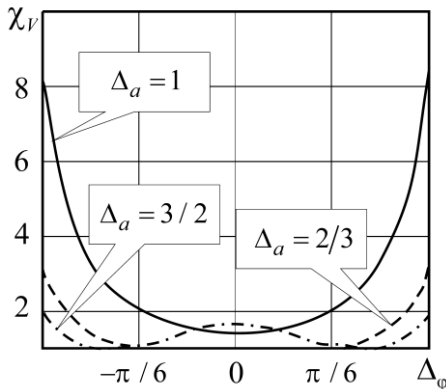


Рис. 10

характеризующая влияние априорного незнания амплитуды и начальной фазы на точность оценки длительности. На рис. 10 приведены зависимости проигрыша в точности КП оценки длительности СШП КРС с прямоугольной модулирующей функцией от расстройки начальной фазы Δ_φ при различных расстройках амплитуды. Как видно из рисунков, априорное незнание амплитуды или фазы

сигнала и наличие гармонической компоненты может привести к существенному снижению точности оценки длительности.

С целью проверки работоспособности синтезированных алгоритмов обнаружения и оценки амплитуды и длительности СШП КРС, а также установления границ применимости полученных аналитически асимптотических выражений для характеристик эффективности было выполнено статистическое моделирование решающей статистики на выходе приёмника СШП КРС. Результаты моделирования на представленных выше графиках отображены маркерами. Установлено, что асимптотические выражения для характеристик обнаружения и оценки параметров удовлетворительно описывают экспериментальные зависимости. Приемлемая сходимость экспериментальных и теоретических зависимостей наблюдается уже при ОСШ более 5.

В заключении сформулированы основные результаты и сделаны общие выводы по диссертационной работе:

1. Структура максимально правдоподобных алгоритмов обнаружения и оценки амплитуды и длительности СШП КРС в условиях априорной параметрической неопределённости оказывается существенно более сложной в случае невыполнения условия относительной узкополосности.
2. Эффективность обнаружения и оценки амплитуды и длительности существенно зависит от параметра узкополосности. Это связано с тем, что асимптотически при больших ОСШ вероятности ошибок и рассеяния оценок не зависят от формы сигнала, а определяются лишь величиной скачка его заднего фронта, который в свою очередь определяется величиной параметра узкополосности.
3. Полученные результаты позволяют количественно охарактеризовать влияние априорного незнания длительности и выбора структуры обнаружителя СШП КРС на эффективность обнаружения. Выбор оптимальной структуры обнаружителя определяется исходя из приемлемых вероятностей ошибок ложной тревоги и пропуска сигнала, а также сложности структуры устройства обработки.
4. Выбором модулирующей функции можно обеспечить полосу сигнала, близкую к несущей частоте. Таким образом, изменение модулирующей функции позволяет описать как СШП КРС с большой относительной полосой частот, так и узкополосные радиосигналы, для которых выполняется условие относительной узкополосности, а наличие или отсутствие гармонической компоненты – сверхширокополосный квазирадиосигнал или видеосигнал, соответственно.
5. Результаты статистического моделирования подтверждают работоспособность синтезированных алгоритмов обнаружения и оценки амплитуды и длительности СШП КРС. Сопоставление характеристик алгоритмов обнаружения и оценки амплитуды и длительности, полученных экспериментально и рассчитанных по асимптотически точным формулам показывает их удовлетворительное согласование.
6. Асимптотические значения рассеяния максимально правдоподобной оценки длительности СШП КРС больше рассеяний оценки длительности сигнала без гармонического заполнения и оценки длительности узкополосного радиосигнала при любых значениях отношения сигнал/шум. Наличие гармонического заполнения при одновременном невыполнении условий узкополосности сигнала может приводить лишь к уменьшению величины

скачка его заднего фронта, а, следовательно, к увеличению рассеяния оценки. Таким образом, в практических приложениях целесообразно использовать такие СШП КРС, истинная длительность которых обеспечивает наибольшую величину заднего фронта сигнала. Это позволит выполнить оценку длительности на приёмной стороне с наименьшей погрешностью.

- Полученные результаты позволяют определить влияние априорного незнания амплитуды и начальной фазы СШП КРС на точность оценки его длительности и сделать обоснованный выбор алгоритма оценки длительности в зависимости от имеющейся априорной информации, а также в зависимости от требований, предъявляемых к точности оценки и к степени простоты технической реализации алгоритма оценки.

Публикации по теме диссертации

- Trifonov, A.P. Estimation of ultrawideband quasi-radio signal duration / A.P. Trifonov, Yu.E. Korchagin, **K.D. Titov** // *Radioelectronics and Communications Systems*. – 2017. – Vol. 60, No. 8. – P. 358–367. DOI: 10.3103/S0735272717080040.
- Трифонов, А.П. Оценка амплитуды сверхширокополосного квазирадиосигнала с неизвестной длительностью и начальной фазой / А.П. Трифонов, Ю.Э. Корчагин, **К.Д. Титов** // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2015. – № 11. – С. 3–13.
- Трифонов, А.П. Оценка амплитуды сверхширокополосного квазирадиосигнала с неизвестной длительностью / А.П. Трифонов, Ю.Э. Корчагин, **К.Д. Титов** // *Радиотехника*. – 2016. – № 3. – С. 14–22.
- Трифонов, А.П. Квазиправдоподобное обнаружение сверхширокополосного квазирадиосигнала произвольной формы с неизвестной длительностью / А.П. Трифонов, Ю.Э. Корчагин, **К.Д. Титов** // *Радиотехника*. – 2016. – № 6. – С. 99–105.
- Корчагин, Ю.Э. Сравнение характеристик алгоритмов обнаружения сверхширокополосных сигналов / Ю.Э. Корчагин, **К.Д. Титов** // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2016. – № 11. – С. 193–199.
- Титов, К.Д.** Исследование алгоритмов обработки сверхширокополосных квазирадиосигналов с неизвестными параметрами на фоне шума / К.Д. Титов // *Физическое образование в вузах*. – Москва, 2018. – Т. 24, № 1С. – С. 207–208.
- Korchagin, Yu.E. Estimation duration of ultra-wideband quasi-radiosignal with known amplitude and initial phase / Yu.E. Korchagin, **K.D. Titov** // *IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2016)*. – Moscow, 2016. DOI:10.1109/SIBCON.2016.7491705.
- Korchagin, Yu.E. Quasi-likelihood detection of rectangle ultra-wideband quasi-radiosignal with adaptation in duration / Y.E. Korchagin, **K.D. Titov**, A.P. Trifonov // *IEEE International Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines»*. – Omsk, 2017. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239522.
- Korchagin, Yu.E. Maximum likelihood detection of rectangle ultra-wideband quasi-radiosignal with unknown duration / Y.E. Korchagin, K.S. Kalashnikov, **K.D. Titov** // *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2018 ElConRus)*. – St. Petersburg, 2018. – P. 1123–1128. DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317283.
- Трифонов, А.П. Характеристики квазиправдоподобного алгоритма обнаружения сверхширокополосного квазирадиосигнала с неизвестной

- длительностью / А.П. Трифонов, Ю.Э. Корчагин, **К.Д. Титов** // Сборник докладов XXI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Т. 1. – Воронеж, 2015. – С. 278–285.
11. Трифонов, А.П. Характеристики квазиравдоподобной оценки амплитуды сверхширокополосного квазирадиосигнала с неизвестной длительностью / А.П. Трифонов, Ю.Э. Корчагин, **К.Д. Титов** // Сборник докладов XXI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Т. 1. – Воронеж, 2015. – С. 286–292.
 12. **Титов, К.Д.** Алгоритмы обработки сверхширокополосных квазирадиосигналов с неизвестными параметрами на фоне шума / К.Д. Титов // Сборник трудов VI общероссийской научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем». – Омск, 2016. – С. 374–384.
 13. Трифонов, А.П. Эффективность оценки длительности сверхширокополосного квазирадиосигнала / А.П. Трифонов, Ю.Э. Корчагин, **К.Д. Титов** // Сборник докладов XXII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Т. 1. – Воронеж, 2016. – С. 82–89.
 14. Корчагин, Ю.Э. Сравнение характеристик алгоритмов обнаружения сверхширокополосных сигналов / Ю.Э. Корчагин, **К.Д. Титов** // Сборник тезисов III Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации». – Красноярск, 2016. – С. 347–350.
 15. Трифонов, А.П. Эффективность обнаружения сверхширокополосного квазирадиосигнала с прямоугольной модулирующей функцией / А.П. Трифонов, Ю.Э. Корчагин, **К.Д. Титов** // Сборник докладов XXIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Т. 2. – Воронеж, 2017. – С. 698–706.
 16. **Титов, К.Д.** Перспективы исследования алгоритмов обработки сверхширокополосных квазирадиосигналов с неизвестными параметрами на фоне шума / К.Д. Титов // Сборник докладов II Международной научно-практической конференции «Специальная подвижная радиосвязь». – Москва, 2017. – С. 38.
 17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016612951. Рос. Федерация. Программа расчёта характеристик обнаружения и оценки параметров сверхширокополосного квазирадиосигнала с неизвестными амплитудой, начальной фазой и длительностью, наблюдаемого на фоне гауссовского белого шума / **К.Д. Титов**; правообладатель Титов Константин Дмитриевич. – №2016610472; заявл. 25.01.16; опубл. 14.03.16, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.