

На правах рукописи



Харин Александр Владимирович

Оценка числа сигналов с неизвестными параметрами

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор,
Трифонов Андрей Павлович

Официальные оппоненты: **Манелис Владимир Борисович**,
доктор технических наук,
АО «ИРКОС»,
ведущий научный сотрудник

Титов Роман Васильевич,
кандидат
физико-математических наук,
ООО «КОДОФОН-Т»,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Открытое акционерное общество
**«Радиотехнический институт
имени академика А. Л. Минца»**
г. Москва

Защита состоится 22 сентября 2016 года в 17⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д.212.038.10 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», по адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, физический факультет, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного университета и на сайте <http://www.science.vsu.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета



МАРШАКОВ
Владимир Кириллович

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Решение задачи оценки числа сигналов с неизвестными параметрами является необходимым для многих областей науки и техники. В качестве примеров можно привести статистическую радиофизику и теорию статистической обработки сигналов, спектральный анализ, радио-, гидро-, акустолокацию и навигацию, а также анализ различных геофизических, медицинских и экономических данных.

В общем случае задача оценки числа сигналов с неизвестными параметрами, наблюдаемых на фоне аддитивного гауссовского шума, формулируется следующим образом. Пусть имеется реализация наблюдаемых данных, которая содержит сумму полезного сигнала и гауссовского белого шума. Далее, предположим, что полезный сигнал представляет собой сумму из нескольких сигналов, каждый из которых может зависеть от некоторых неизвестных параметров. Задача заключается в оценке числа сигналов, из которых формируется суммарный полезный сигнал.

Причин возникновения потребности в оценке числа сигналов на практике достаточно много. Так, в качестве примера, в статистической радиофизике, теории статистической обработки сигналов и локации можно выделить три часто встречающиеся задачи, связанные с оценкой числа сигналов:

- ✓ задача многолучевого приёма, которая заключается в статистическом анализе суммы нескольких сигналов, порождённых распространением одного исходного сигнала, пришедшего к приёмнику по разным каналам (или по разным лучам). Эту задачу необходимо решать во многих современных системах связи (в качестве примеров можно привести системы мобильной связи, а также системы связи в КВ диапазоне).
- ✓ задача сверхразрешения, которая заключается в статистическом анализе суммы нескольких различных сигналов с неизвестными параметрами, которые приняла одна антенная решётка.
- ✓ задача оценки числа источников сигналов или шумов, которая является наиболее общей и состоит в статистическом анализе суммы нескольких сигналов, пришедших из различных источников с неизвестными параметрами.

Решения приведённых выше проблем оценки числа сигналов лежат в области оценки параметров сигналов на фоне помех, поэтому искать эти решения целесообразно методами статистической радиофизики.

Основной целью работы является исследование алгоритмов оценки числа сигналов с неизвестными параметрами, выбор наиболее удобной характеристики качества функционирования этих алгоритмов, разработка методов анализа исследуемых алгоритмов и сравнение качества их функционирования на основе предложенной характеристики. Рассмотрим основную цель работы более подробно.

- ✓ Введение новой характеристики качества функционирования алгоритмов оценки числа сигналов.
- ✓ Синтез и анализ алгоритма максимального правдоподобия оценки числа детерминированных сигналов.
- ✓ Нахождение структуры и характеристик максимально правдоподобных алгоритмов оценки числа сигналов с неизвестными неэнергетическими параметрами.
- ✓ Анализ общих проблем, препятствующих непосредственному применению алгоритма максимального правдоподобия к оценке числа сигналов с неизвестными энергетическими параметрами.
- ✓ Исследование структуры и характеристик алгоритмов оценки числа сигналов с неизвестными амплитудами и неэнергетическими параметрами.
- ✓ Исследование квазиправдоподобных оценок числа сигналов с частично неизвестными параметрами.

Методы проведения исследования. В ходе решения поставленных в диссертационной работе задач применялись современные методы линейной алгебры, теории вероятностей, математической статистики теории случайных процессов, математического анализа, теории статистической обработки сигналов и статистической радиофизики, а также использовались методы статистического моделирования на ЭВМ.

Научная новизна.

- ✓ Предложена новая характеристика качества функционирования алгоритмов оценки числа сигналов – укороченная вероятность ошибки.
- ✓ Синтезированы два новых алгоритма оценки числа сигналов: алгоритм максимального правдоподобия оценки числа детерминированных сигналов и алгоритм максимального правдоподобия оценки числа сигналов с неизвестными фазами. Впервые исследованы свойства и характеристики этих алгоритмов с использованием понятия укороченной вероятности ошибки.

- ✓ Предложены два новых алгоритма оценки числа сигналов с неизвестными параметрами: алгоритм с инвариантной случайной штрафной функцией и алгоритм с обратной штрафной функцией. Оба алгоритма синтезированы на основе предложенных впервые модификаций метода максимального правдоподобия. Далее любые алгоритмы оценки числа сигналов с неизвестными параметрами на основе модификаций метода максимального правдоподобия будем называть *модифицированными алгоритмами*.
- ✓ Разработана новая методика для нахождения характеристик модифицированных алгоритмов оценки числа сигналов. На основе новой методики впервые проведён анализ четырёх модифицированных алгоритмов оценки числа сигналов и впервые проведена оптимизация параметров этих алгоритмов для минимизации вероятности ошибки.
- ✓ Предложена новая методика анализа алгоритмов оценки числа сигналов с неизвестными неэнергетическими параметрами. На основе новой методики впервые найдены характеристики оценки максимального правдоподобия числа сигналов с неизвестными неэнергетическими параметрами, а также впервые получены характеристики четырёх модифицированных алгоритмов в случае решения задачи оценки числа сигналов с неизвестными амплитудами и неэнергетическим параметрами.
- ✓ Впервые проведён синтез и анализ новых квазиправдоподобных алгоритмов оценки числа радиосигналов, а именно: квазиправдоподобного алгоритма оценки числа радиосигналов с неизвестными частотами, квазиправдоподобного алгоритма оценки числа радиосигналов с неизвестными амплитудами и фазами, а также квазиправдоподобного алгоритма оценки числа радиосигналов с неизвестными амплитудами, фазами и частотами.

Перечисленные выше новые результаты получены для моделей сигналов с непрерывным временем.

Теоретическая и практическая ценность. Исследованные в диссертации алгоритмы оценки числа сигналов могут быть использованы для повышения точности радиофизических, спектральных и иных измерений, а так же для повышения помехоустойчивости различных систем связи. В качестве конкретных примеров можно привести задачи многолучевого приёма в статистической теории связи, задачи оценки числа источников сигналов и сверхразрешения в активной и пассивной радио-

гидро-, акустолокации. Предложенные алгоритмы оценки числа сигналов позволяют существенно улучшить качество функционирования систем, реализующих решение этих задач. В качестве общей характеристики всех рассмотренных в диссертации алгоритмов оценки числа сигналов использовалась укороченная вероятность ошибки, поэтому, полученные в диссертации результаты, позволяют сделать обоснованный выбор между различными алгоритмами в зависимости от условий, в которых решаются задачи.

Внедрение научных результатов. Полученные результаты были использованы при выполнении следующих грантов:

✓ грант №13-01-97504 на тему «Комплексная обработка изображений и сигналов с неизвестными параметрами в новых информационных технологиях», Российский Фонд Фундаментальных Исследований;

✓ грант №2012-1.4-12-000-2026-1444 на тему «Разработка радиолокационных методов дистанционного зондирования и мониторинга морской поверхности и ледовой обстановки для обеспечения безопасности разработки новых энергоэффективных северных морских месторождений углеводородов и их добычи» в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы;

✓ грант №2012-1.4-12-000-1018-6220 на тему: «Разработка методов статистического анализа нестационарных случайных процессов в условиях параметрической априорной неопределенности при скачкообразно-плавном изменении их статистических характеристик» в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы;

✓ грант №2012-1.4-12-000-1025-6950 на тему «Разработка статистических методов обработки и анализа сверхширокополосных сигналов и полей при наличии случайных искажений в условиях комплексной априорной неопределенности» в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы;

✓ грант №15-11-10022 на тему «Статистические методы локализации местоположения и протяженности области определения сигналов и изображений в пространстве их существования», Российский научный фонд.

Также работа над диссертацией была поддержана стипендией Правительства Российской Федерации, приказ №1132 от 13 октября 2015 года. Полученные результаты внедрены в научно-исследовательской и учебной работе на кафедре радиофизики Воронежского Государственного Университета и в научно-исследовательской работе в АО «Концерн «Созвездие» НИЧ №11062, №11073, №13073, №13079.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту.

- ✓ Новая характеристика качества функционирования алгоритмов оценки числа сигналов – укороченная вероятность ошибки. Обоснование данной характеристики в различных задачах с помощью аналитических расчётов и статистического моделирования.
- ✓ Структура и характеристики новых алгоритмов максимального правдоподобия: алгоритма оценки числа детерминированных сигналов, алгоритма оценки числа сигналов с неизвестными фазами и алгоритма оценки числа сигналов с неизвестными неэнергетическими параметрами.
- ✓ Обоснование необходимых условий возможности применения алгоритмов максимального правдоподобия к задаче оценки числа сигналов с неизвестными параметрами.
- ✓ Новые модифицированные алгоритмы для оценки числа сигналов с неизвестными энергетическими параметрами: алгоритм с инвариантной случайной штрафной функцией и алгоритм с обратной штрафной функцией.
- ✓ Структура и характеристики алгоритмов с линейной, случайной, инвариантной случайной и обратной штрафными функциями для решения задач оценки числа сигналов с неизвестными амплитудами, с неизвестными амплитудами и фазами, а также с неизвестными амплитудами и неэнергетическими параметрами.
- ✓ Оптимизация параметров всех синтезированных модифицированных алгоритмов оценки числа сигналов, выполненная с целью минимизации вероятности ошибки оценки числа сигналов.
- ✓ Методика получения характеристик модифицированного алгоритма оценки числа произвольно коррелированных сигналов из характеристик этого же модифицированного алгоритма, но синтезированного для оценки числа ортогональных сигналов. Методика получения асимптотических характеристик максимально правдоподобных и модифицированных алгоритмов оценки числа сигналов с неизвестными неэнергетическими параметрами.
- ✓ Структура и характеристики квазиправдоподобных алгоритмов оценки числа сигналов с частично неизвестными параметрами.

- ✓ Работоспособность синтезированных алгоритмов и границы применимости найденных асимптотических формул для их характеристик проверены с помощью статистического моделирования на ЭВМ.

Достоверность результатов. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата статистической радиофизики и теории статистической обработки сигналов (в том числе, теории вероятностей, математической статистики, линейной алгебры и математического анализа), а также удовлетворительным согласованием полученных аналитических результатов с результатами статистического моделирования на ЭВМ.

Апробация работы. Основные положения диссертации были представлены в виде докладов и обсуждались на XVIII, XIX, XX, XXI и XXII Международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 год. Доклад на XX МНТК «Радиолокация, навигация, связь» был признан лучшим в своей секции.

Публикации. По теме диссертации опубликованы работы [1–9]. Из них работы [3], [5], [7], [8] опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертаций, а остальные – в сборниках трудов конференций. В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателю принадлежат решения задач, поставленных научным руководителем, в том числе: конкретизация условий задач, разработка общей структуры решения поставленных задач, формулировка и доказательство утверждений, необходимых для получения аналитических результатов, подготовка и реализация статистического моделирования, анализ и интерпретация результатов исследований.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы из 138 названий и 51 рисунка.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, приведён краткий обзор известных результатов по вопросам оценки числа сигналов, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе исследованы вопросы оценки числа сигналов с помощью метода максимального правдоподобия, а также общие вопросы анализа алгоритмов оценки числа сигналов.

Вводится общая характеристика алгоритмов оценки числа сигналов, используемая далее в диссертации для анализа всех предложенных алгоритмов. Эта характеристика получила название укороченной вероятности ошибки. Эффективность любого алгоритма оценки $\hat{\nu}$ числа сигналов $\nu = \overline{1, \nu_{\max}}$ можно характеризовать величиной полной вероятности ошибки $p_e = p(\hat{\nu} \neq \nu_0)$, где ν_0 – истинное число сигналов. С целью получения приближённой формулы для полной вероятности ошибки, заметим, что любой алгоритм \mathfrak{R} оценки числа сигналов можно представить в виде $\hat{\nu} = \arg \sup_{\nu} R(\nu; x(t))$, где $R(\nu; x(t))$ – функционал, определяемый структурой алгоритма \mathfrak{R} и зависящий от числа сигналов и реализации наблюдаемых данных. С помощью данного представления определим укороченную вероятность ошибки для алгоритма \mathfrak{R} как

$$p_a = 1 - p [R(\nu_0; x(t)) > R(\nu_0 + 1; x(t)), R(\nu_0; x(t)) > R(\nu_0 - 1; x(t))]. \quad (1)$$

Из определения (1) следует, что укороченная вероятность ошибки является нижней границей для полной вероятности ошибки, когда $1 < \nu_0 < \nu_{\max}$. Необходимо также отметить, что укороченная вероятность ошибки совпадает с полной вероятностью ошибки в случае, когда $\nu_{\max} = 3$ и $\nu_0 = 2$.

В общем случае задача оценки числа сигналов с неизвестными неэнергетическими параметрами может быть сформулирована следующим образом.

Предположим, что наблюдается сумма из ν сигналов $s_i(t, \mathbf{l}_i)$, каждый из которых зависит от вектора неизвестных параметров \mathbf{l}_i

$$s(t, \nu, \mathbf{L}) = \sum_{i=1}^{\nu} s_i(t, \mathbf{l}_i), \quad (2)$$

где для любых значений i и \mathbf{l}_i выполняется: $s_i(t, \mathbf{l}_i) \in \mathbb{L}_2(0, T)$; $\mathbf{L} = (\mathbf{l}_1, \dots, \mathbf{l}_{\nu_{\max}})$ – блочный вектор, объединяющий все неизвестные параметры, $\mathbf{l}_i = (l_{i1}, \dots, l_{i\mu_i})$; $\mathbf{l}_i \in \Lambda_i$, где Λ_i – априорная область возможных значений вектора неизвестных параметров i -го сигнала, μ_i – число неизвестных параметров i -го сигнала. Будем полагать, что неизвестные параметры $\mathbf{L} = (\mathbf{l}_1, \dots, \mathbf{l}_{\nu_{\max}})$ являются неэнергетическими, т.е. для любого i выполняется: $\int_0^T s_i^2(t, \mathbf{l}_i) dt = E_i = \text{const}(\mathbf{l}_i)$

Пусть совокупность сигналов (2), наблюдается в течение интервала времени $[0, T]$, на фоне аддитивного гауссовского белого шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 . Следовательно, обработке

доступна реализация

$$x(t) = n(t) + \sum_{i=1}^{\nu_0} s_i(t, \mathbf{l}_{0i}), \quad (3)$$

где ν_0 и $\mathbf{L}_0 = (\mathbf{l}_{01}, \dots, \mathbf{l}_{0\nu_0})$ истинные значения соответствующих параметров.

Рассмотрена задача оценки числа детерминированных сигналов. В ходе исследования этой задачи синтезирован максимально правдоподобный алгоритм оценки числа детерминированных сигналов и найдена формула для вычисления укороченной вероятности ошибки (1) этого алгоритма.

$$p_{a0} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_{\nu_0+1}/2} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) \Phi\left(\frac{z_{\nu_0}/2 + \rho_{\nu_0, \nu_0+1}y}{\sqrt{1 - \rho_{\nu_0, \nu_0+1}^2}}\right) dy, \quad (4)$$

здесь $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt$ — интеграл вероятности;

$K_{ij} = \int_0^T s_i(t)s_j(t)dt$ — скалярное произведение функций $s_i(t)$ и $s_j(t)$ в пространстве $\mathbb{L}_2(0, T)$, через $s_i(t)$ обозначены сигналы $s_i(t, \mathbf{l}_i)$ для случая, когда все их параметры полностью известны, $\rho_{ij} = K_{ij}/\sqrt{K_{ii}K_{jj}}$ — коэффициент корреляции между сигналами $s_i(t)$ и $s_j(t)$ (нормированное скалярное произведение сигналов $s_i(t)$ и $s_j(t)$), $z_i = \sqrt{2K_{ii}/N_0}$ — отношение сигнал-шум (ОСШ) для i -го сигнала.

Для подтверждения и исследования формулы (4) и других результатов диссертации проводилось статистическое моделирование на ЭВМ. Так, в ходе статистического моделирования было установлено, что асимптотическая формула (4) может быть использована для любых $\nu_{max} \leq 101$ при значениях ОСШ больших $3 \div 4$.

Также проведён синтез максимально правдоподобного алгоритма оценки числа ортогональных радиосигналов с неизвестными фазами. Введём общее определение для понятия ортогональности сигналов с неизвестными параметрами

$$\int_0^T s_i(t, \mathbf{l}_i)s_j(t, \mathbf{l}_j)dt = \begin{cases} E_i, & i = j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \quad (5)$$

Равенство (5) должно выполняться при любых значениях неизвестных параметров $\mathbf{l}_i \in \Lambda_i$.

С учётом (5), было получено выражение для укороченной вероятности ошибки максимально правдоподобного алгоритма оценки числа сигналов с неизвестными фазами, а также проведено сравнение полученных характеристик с характеристиками максимально правдоподобного алгоритма оценки числа детерминированных сигналов.

Далее рассмотрена общая задача оценки числа сигналов в случае наличия у них нескольких неизвестных неэнергетических параметров. При этом, на функции из множества $\{s_i(t, \mathbf{l}_i)\}_{i=1}^{\nu_{\max}}$ накладывается условие ортогональности (5). В такой постановке задачи найдено приближенное выражение для укороченной вероятности ошибки алгоритма оценки числа ортогональных сигналов с неизвестными неэнергетическими параметрами. С помощью полученных характеристик исследовано качество функционирования алгоритмов оценки числа сигналов с неизвестными неэнергетическими параметрами, в зависимости от существенных свойств этих параметров, таких, например, как приведённый объём априорной области определения неизвестных параметров.

Во второй главе исследованы проблемы, возникающие при оценке числа сигналов с неизвестными энергетическими параметрами.

В первом параграфе второй главы найдены необходимые условия работоспособности максимально правдоподобного алгоритма оценки числа сигналов с неизвестными параметрами. Было показано, что если неизвестный параметр сигнала в некоторой точке области определения может обратиться в тождественный ноль, то оценка числа сигналов с таким неизвестным параметром методом максимального правдоподобия невозможна.

Предположим, что наблюдается сумма из ν сигналов $a_i s_i(t, \mathbf{l}_i)$, каждый из которых зависит от вектора неизвестных неэнергетических параметров \mathbf{l}_i и от энергетического параметра, амплитуды a_i

$$s(t, \nu, \mathbf{a}_\nu, \mathbf{L}) = \sum_{i=1}^{\nu} a_i s_i(t, \mathbf{l}_i), \quad (6)$$

где $a_i \in \mathbb{R}$, остальные обозначения см. (2).

Пусть совокупность сигналов (6), как и прежде, наблюдается в течение интервала времени $[0, T]$, на фоне аддитивного гауссовского белого шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 . Следовательно, обработке доступна реализация

$$x(t) = n(t) + \sum_{i=1}^{\nu_0} a_{0i} s_i(t, \mathbf{l}_{0i}), \quad (7)$$

где ν_0 , a_{0i} и $\mathbf{L}_0 = (\mathbf{l}_{01}, \dots, \mathbf{l}_{0\nu_0})$ истинные значения соответствующих параметров.

Были рассмотрены четыре алгоритма оценки числа сигналов с неизвестными параметрами на основе различных модификаций метода максимального правдоподобия. В ходе синтеза модифицированного алгоритма вначале определяется структура логарифма функционала отношения правдоподобия (ФОП) для поставленной задачи, затем проводится максимизация этого функционала по неизвестным параметрам при фиксированном числе сигналов и, наконец, с помощью полученного выражения для максимизированного логарифма ФОП и штрафной функции определяется структура модифицированного максимизированного логарифма ФОП. Далее оценка, вырабатываемая модифицированным алгоритмом определяется как значение числа сигналов, при котором модифицированный максимизированный логарифм ФОП достигает своего абсолютного максимума. Были рассмотрены следующие модифицированные алгоритмы.

1. Алгоритм с линейной штрафной функцией.

$$L_D(\nu; \kappa) = L_m(\nu) - \kappa\nu, \quad \kappa > 0.$$

2. Алгоритм со случайной штрафной функцией.

$$L_{D1}(\nu; \kappa_1) = L_m(\nu) - \kappa_1\nu \max_{i \in \overline{1, \nu_{\max}}} (L_m^{ort}(i) - L_m^{ort}(i-1)), \quad \kappa_1 > 0.$$

3. Алгоритм с инвариантной случайной штрафной функцией.

$$L_{D2}(\nu; \kappa_2) = L_m(\nu) - \kappa_2\nu \max_{i \in \overline{1, \nu_{\max}}} (L_m(i) - L_m(i-1)), \quad \kappa_2 > 0.$$

4. Алгоритм с обратной штрафной функцией.

$$L_B(\nu; n) = \frac{L_m^n(\nu)}{\nu}, \quad n > 1.$$

Здесь $L_m(\nu)$ – максимизированный по неизвестным параметрам логарифм ФОП; $\kappa, \kappa_1, \kappa_2, n$ – параметры соответствующих алгоритмов; $L_m^{ort}(i)$ – вспомогательный функционал, для расчёта этого функционала необходимо вычислить логарифм ФОП, так, как если бы сигналы, рассматриваемые в решаемой задаче были ортогональны, а затем максимизировать полученный таким образом логарифм ФОП по неизвестным параметрам.

Алгоритмы 1 и 2 заимствованы из литературы, а алгоритмы 3 и 4 разработаны в диссертации. В известной литературе отсутствуют результаты анализа алгоритма 1 для случая непрерывных сигналов, кроме того в литературе отсутствуют какие-либо результаты теоретического анализа алгоритма 2.

С помощью каждого из этих алгоритмов во второй главе решены: задача оценки числа сигналов с неизвестными амплитудами; задача оценки числа сигналов с неизвестными амплитудами и фазами; задача оценки числа ортогональных (см. условие (5)) сигналов с неизвестными амплитудами и неэнергетическими параметрами.

Решение каждой из указанных задач содержит следующие этапы.

1. На первом этапе проводится синтез каждого из четырёх рассматриваемых в диссертации алгоритмов.

2. На втором этапе проводится вычисление укороченной вероятности ошибки для каждого из рассматриваемых алгоритмов.

3. На третьем этапе проводилась оптимизация параметров рассматриваемых алгоритмов на основе полученных аналитических выражений для укороченных вероятностей ошибки, с целью улучшения качества функционирования рассматриваемых алгоритмов.

Для получения укороченных вероятностей ошибок модифицированных алгоритмов была разработана специальная методика, основанная на представлении максимизированного по неизвестным параметрам логарифма ФОП в виде суммы квадратов некоррелированных случайных величин. Эта методика сводит задачу анализа модифицированных алгоритмов оценки числа произвольно коррелированных сигналов к задаче анализа модифицированных алгоритмов оценки числа ортогональных сигналов. Кроме того, для вычисления укороченных вероятностей ошибки при решении задачи оценки числа ортогональных сигналов с неизвестными амплитудами и неэнергетическими параметрами была разработана специальная методика, основанная на известных результатах из теории обнаружения сигналов. В итоге, для алгоритмов с линейной, инвариантной случайной и обратной штрафными функциями, при решении каждой задачи второй главы, получены аналитические выражения для укороченных вероятностей ошибки этих алгоритмов. Зависимости укороченной вероятности ошибки от ОСШ для алгоритма со случайной штрафной функцией найдены с помощью статистического моделирования на ЭВМ.

В третьей главе исследуются задачи оценки числа сигналов с *частично* неизвестными параметрами. В общем виде рассмотренную задачу можно сформулировать следующим образом.

Пусть на интервале времени $[0, T]$ наблюдается сумма из ν узкополосных радиосигналов $s_i(t, a_i, \varphi_i, \omega_i) = a_i f_i(t) \cos(\omega_i t + \Psi_i(t) - \varphi_i)$, так что принимается совокупность сигналов

$$s(t, \nu, \mathbf{a}_\nu, \boldsymbol{\varphi}_\nu, \boldsymbol{\omega}_\nu) = \sum_{i=1}^{\nu} s_i(t, a_i, \varphi_i, \omega_i) = \sum_{i=1}^{\nu} a_i f_i(t) \cos(\omega_i t + \Psi_i(t) - \varphi_i), \quad (8)$$

где $\nu = \overline{1, \nu_{\max}}$, $a_i, \omega_i \in R^1$ – амплитуда и частота сигнала, $\varphi_i \in [0, 2\pi]$ – фаза сигнала, $\Psi_i(t) \in L_1(0, T)$ – закон фазовой модуляции сигнала, $f_i(t) \in L_2(0, T)$ – огибающая сигнала и $\mathbf{a}_\nu = (a_i)_{i=1}^\nu$, $\boldsymbol{\varphi}_\nu = (\varphi_i)_{i=1}^\nu$ и $\boldsymbol{\omega}_\nu = (\omega_i)_{i=1}^\nu$.

Далее предположим, что сигнал (8) принимается на фоне аддитивного гауссовского белого шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 . Следовательно, обработке доступна реализация

$$x(t) = n(t) + \sum_{i=1}^{\nu_0} a_{0i} f_i(t) \cos(\omega_{0i} t + \Psi_i(t) - \varphi_{0i}), \quad (9)$$

где ν_0 – истинное число сигналов в (8), а множества $\{a_{0i}\}_{i=1}^{\nu_{\max}}$, $\{\varphi_{0i}\}_{i=1}^{\nu_{\max}}$ и $\{\omega_{0i}\}_{i=1}^{\nu_{\max}}$ содержат истинные значения амплитуд, фаз и частот принимаемых радиосигналов.

В рассматриваемых задачах принимаемые радиосигналы (8) содержат параметры, которые известны лишь частично, т.е. известны конечные априорные интервалы, которым принадлежат возможные неизвестные значения этих параметров. Были исследованы: задача оценки числа радиосигналов с частично неизвестными частотами, задача оценки числа радиосигналов с частично неизвестными амплитудами и фазами, задача оценки числа радиосигналов с частично неизвестными амплитудами, фазами и частотами.

Решение указанных задач проводилось с помощью квазиправдоподобных алгоритмов. Опишем методику синтеза таких алгоритмов. Во второй главе диссертационной работы приведено выражение для логарифма ФОП в случае, когда принимаемый сигнал имеет вид (8). Для синтеза квазиправдоподобного алгоритма оценки числа сигналов необходимо заменить в этом функционале частично неизвестные значения амплитуд $\{a_i\}_{i=1}^{\nu_{\max}}$, фаз $\{\varphi_i\}_{i=1}^{\nu_{\max}}$ и частот $\{\omega_i\}_{i=1}^{\nu_{\max}}$ некоторыми предполагаемыми значениями $\{a_i^*\}_{i=1}^{\nu_{\max}}$, $\{\varphi_i^*\}_{i=1}^{\nu_{\max}}$ и $\{\omega_i^*\}_{i=1}^{\nu_{\max}}$ этих параметров из их заданных априорных интервалов. Таким образом, получаем решающую статистику для квазиправдоподобного алгоритма оценки числа сигналов, и далее оценка, вырабатываемая квазиправдоподобным алгоритмом, определяется как значение числа сигналов, при котором решающая статистика достигает своего абсолютного максимума.

Описанным способом определена структура квазиправдоподобных алгоритмов для решения рассматриваемых задач. Затем для полученных алгоритмов были найдены аналитические формулы их укороченных вероятностей ошибки. На основе найденных формул проведено сравнение квазиправдоподобных алгоритмов с максимально правдоподобными алгоритмами и модифицированными алгоритмами. Результаты сравнения укороченных вероятностей ошибки для квазиправдоподобных, мак-

симально правдоподобных и модифицированных алгоритмов были положены в основу сформулированных рекомендаций о возможности применения данных алгоритмов для решения различных практических задач.

В Заключении подводятся основные итоги диссертационной работы, приведены общие выводы и сформулированы основные результаты.

По итогам проведённых в диссертационной работе исследований можно сделать следующие выводы.

1. Укороченная вероятность ошибки позволяет относительно просто количественно охарактеризовать эффективность различных алгоритмов оценки числа сигналов и является хорошим приближением к *полной* вероятности ошибки при не слишком малых значениях ОСШ.
2. Предложенные модифицированные алгоритмы оценки числа сигналов могут быть использованы в ситуациях, когда с помощью максимально правдоподобных алгоритмов найти оценки числа сигналов невозможно.
3. Разработанные методики вычисления укороченных вероятностей ошибки позволяют находить характеристики широкого класса алгоритмов оценки числа сигналов.
4. Проведённая процедура оптимизации параметров модифицированных алгоритмов оценки числа сигналов приводит к существенному повышению качества функционирования этих алгоритмов.
5. Полученные укороченные вероятности ошибки алгоритмов оценки числа сигналов дают возможность сделать вывод о качестве функционирования широкого круга максимально правдоподобных, модифицированных и квазиправдоподобных алгоритмов оценки числа сигналов с неизвестными параметрами и выработать рекомендации о возможности применения этих алгоритмов на практике.
6. Исследованные в диссертации алгоритмы оценки числа сигналов могут быть использованы для улучшения качества функционирования различных систем обработки информации.
7. Аналитические результаты, полученные в диссертационной работе, удовлетворительно согласуются с результатами статистического моделирования.

Основные публикации по теме диссертации

1. Трифонов, А. П. Алгоритмы оценки числа ортогональных сигналов с неизвестными амплитудами / А. П. Трифонов, **А. В. Харин** // Сборник докладов XVIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». — Т. 1. — Воронеж, 2012. — С. 319 – 330.
2. Трифонов, А. П. Алгоритмы оценки числа сигналов с неизвестными амплитудами / А. П. Трифонов, **А. В. Харин** // Сборник докладов XIX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». — Т. 1. — Воронеж, 2013. — С. 35 – 46.
3. Трифонов, А. П. Оценка числа сигналов с неизвестными амплитудами / А. П. Трифонов, **А. В. Харин** // Нелинейный мир. — 2013. — Т. 11, № 12. — С. 853 – 866.
4. Трифонов, А. П. Характеристики оценок числа радиосигналов с неизвестными амплитудами и фазами / А. П. Трифонов, **А. В. Харин** // Сборник докладов XX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». — Т. 1. — Воронеж, 2014. — С. 39 – 50.
5. Трифонов, А. П. Оценка числа радиосигналов с неизвестными амплитудами и фазами / А. П. Трифонов, **А. В. Харин** // Известия ВУЗов. Радиофизика. — 2015. — Т. 58, № 1. — С. 62–76.
6. Трифонов, А. П. Характеристики квазиправдоподобных оценок числа сигналов / А. П. Трифонов, **А. В. Харин** // Сборник докладов XXI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». — Т. 1. — Воронеж, 2015. — С. 1 – 11.
7. Трифонов, А. П. Оценка числа ортогональных сигналов с неизвестными неэнергетическими параметрами / А. П. Трифонов, **А. В. Харин** // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. — 2015. — Т. 58, № 8. — С. 33–41.
8. Determining the number of radio signals with unknown phases / A. P. Trifonov, **A. V. Kharin**, O. V. Chernoyarov, K. S. Kalashnikov // International Journal on Communications Antenna and Propagation. — 2015. — Vol. 5, no. 6. — P. 367–374.
9. Трифонов, А. П. Характеристики квазиправдоподобных оценок числа сигналов / А. П. Трифонов, **А. В. Харин** // Сборник докладов XXII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». — Т. 1. — Воронеж, 2016. — С. 90 – 99.