

На правах рукописи



Строков Виталий Игоревич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ
В СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ**

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Калининград – 2016

Работа выполнена в Физико – техническом институте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский федеральный университет имени И. Канта» (г. Калининград)

Научный руководитель: **Пахотин** Валерий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Карлов** Анатолий Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники, Калининградского пограничного института ФСБ России.
Егоров Владимир Викторович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела систем связи и передачи данных ОАО «Российский институт мощного радиостроения».


Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится «30» сентября 2016 г., в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 002. 231.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН) по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН и на сайте: <http://cplire.ru/rus/dissertations.html>.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Потапов
Александр Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Уровень современной микроэлектроники и вычислительной техники позволяет реализовывать алгоритмы обработки практически любой сложности. Однако методы обработки сигналов, основанные на спектральном или корреляционном анализе, уже не соответствуют этому уровню. В связи с этим, исследования, нацеленные на разработку новых алгоритмов обработки информации, являются актуальными и перспективными. Они решают одну из основных задач настоящего времени – создание и развитие новых технологий, обеспечивающих прием, передачу и обработку информации на современном уровне.

Наиболее последовательно и полно вопросы обработки узкополосных одиночных сигналов излагаются в теории оптимального приема. Она базируется на работах В. А. Котельникова, Н. Винера, А. Н. Колмогорова, Р. Л. Стратоновича, А. Вальда [1, 4, 10]. Ее основы хорошо изложены в работах В. И. Тихонова, А. П. Трифонова, А. И. Перова и др. [6, 11, 12, 13]. В теории оптимального приема решаются задачи обнаружения, различения, оценки параметров, разрешения, фильтрации сигналов. Однако существуют недостатки в решении указанных задач. Так задача обнаружения сигнала решается, в основном, при полностью известных (или случайных) параметрах сигнала и заданной дисперсии шума, неизвестным остается лишь факт наличия сигнала в принятом сообщении. В связи с этим, решение является теоретическим, и его сложно использовать в комплексах аппаратуры. Задача оценки параметров двух и более сигналов решается (в современных комплексах аппаратуры) лишь в области их ортогональности, когда корреляционные или спектральные максимумы удовлетворяют критерию Релея. Задача разрешения подобных сигналов решается, в основном, на основании функции неопределённости. Задача фильтрации сигналов также решается лишь в области ортогональности сигнала и помехи.

Разрешающая способность, согласно подавляющему количеству источников /А. И. Перов, Я. Д. Ширман и др./ [6, 14], в системах локации, пеленгации, навигации, спектроскопии определяется размером функции неопределенности. В результате, в существующих комплексах аппаратуры она имеет ограничение типа ограничения Релея. По существу, это ограничение разделяет сигналы на

ортогональные, когда сечения функций неопределенности двух сигналов не перекрываются и неортогональные в противоположном случае /А. И. Перов/ [6].

К настоящему времени накоплено много информации о возможности получения решения статистических задач радиотехники в области неортогональности сигналов. В книге С. Л. Марпла «Цифровой спектральный анализ и его применения» представлены методы сверхразрешения: «Прони», «Music», «авторегрессионный» и т.п. Они основаны на разностном уравнении, и решение статистических задач связано с плохо обусловленной матрицей данных. Однако они обеспечивают лучшее разрешение, чем спектральный анализ. Областью их работы является высокое отношение сигнал/шум.

В работе К. Хелстрема «Статистическая теория обнаружения сигналов» впервые рассматривается возможность получения решения статистических задач радиотехники в области неортогональности двух сигналов. В работах С. А. Климова [3] представлено экспериментальное доказательство сверхразрешения в области локации. В работах В. И. Слюсара [8, 9] показана возможность создания систем связи на неортогональных сигналах.

В работах БФУ им. И. Канта исследованы возможности обработки неортогональных сигналов в области спектроскопии, в области локации, в области пеленгации, в оптических системах [2, 7, 5].

Все эти работы дают существенную теоретическую основу для разработок аппаратуры, эффективность обработки сигналов в которой более высокая.

В настоящее время можно отметить переход от простых сигналов к сигналам с внутриимпульсной модуляцией, основным преимуществом которых является возможность получения высокого разрешения. Основной обработкой сложных сигналов остается корреляционная, однако вопросы анализа таких сигналов на основе положений теории оптимального приема разработаны недостаточно, особенно в области неортогональности, что является проблемой в решении задачи дальнейшего совершенствования радиотехнических комплексов аппаратуры.

Использование поляризационных антенных систем для приема сложных сигналов открывает дополнительные возможности обработки. Вопросы разрешения сложных сигналов могут быть решены на основе их различий по поляризации. В

настоящее время известны методы поляризационного разрешения при приеме сигналов с линейными, круговыми ортогональными поляризациями волн [16], однако вопросы разрешения сигналов с эллиптическими ортогональными поляризациями требуют своего решения.

Цель работы – развитие положений теории и методов обработки сложных сигналов применительно к системам радиолокации.

Задачи исследования:

1. Решение задачи обнаружения сложных сигналов с предварительной корреляционной обработкой и с оценкой дисперсии шума в принятом сообщении.

2. Решение задачи разрешения и задачи оценки параметров сложных сигналов на основе преобразованного функционала правдоподобия в области их неортогональности.

3. Разработка методов адаптивной фильтрации сложных сигналов на фоне неортогональных по отношению к сигналу помех.

4. Разработка метода поляризационного разрешения сложных сигналов с эллиптическими ортогональными поляризациями.

5. Разработка методов оптимизации по времени алгоритмов поиска глобального минимума функционала правдоподобия при обработке сложных сигналов.

Методы исследования и фактические данные. Использованы методы теоретического анализа на основе положений теории оптимального приема, выполнены модельные исследования потенциальных возможностей разработанных методов, экспериментальные исследования вопросов обработки сложных сигналов с помощью реализованных алгоритмов. Фактическим материалом для тестирования разработанных алгоритмов являлись данные станции вертикального зондирования МРЛК «Вектор» производства ОАО НПК НИИДАР, а также модельные данные.

Достоверность результатов диссертации определяется корректным применением математических методов, сходимостью основных выражений, полученных для области неортогональности сложных сигналов, к частному случаю обработки ортогональных сигналов, подтверждением основных положений теории результатами модельных расчетов и экспериментальных исследований.

Научная новизна. В диссертационной работе автором получены следующие новые научные результаты:

1. Метод решения задачи обнаружения сложного сигнала с предварительной корреляционной обработкой и оценкой дисперсии шума в принятой реализации.

2. Технология преобразования функционала правдоподобия для решения статистических задач радиотехники в области неортогональности сложных сигналов.

3. Метод решения задачи оценки параметров и задачи разрешения сложных сигналов на основе преобразованного функционала правдоподобия.

4. Получена оценка рабочей области решения задачи разрешения сложных сигналов. Для двух сигналов она определяется диапазоном изменений модуля коэффициента корреляции от 0 до 0.9.

5. Технология адаптивной фильтрации сложного сигнала на фоне неортогональных помех.

6. Метод поляризационного разрешения сложных сигналов с эллиптическими ортогональными поляризациями.

7. Методы быстрой минимизации функционалов правдоподобия, существенно увеличивающие быстродействие предложенных алгоритмов.

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие в проработке теоретических положений, разработке алгоритмов цифровой обработки сложных сигналов, проведении их натурных и модельных испытаний.

Защищаемые научные результаты:

1. Технология решения задачи оценки параметров и задачи разрешения двух или более сложных сигналов в области их неортогональности.

2. Технология решения задачи фильтрации сложного сигнала на фоне неортогональной по отношению к сигналу помехи.

3. Метод решения задачи обнаружения сложного сигнала с предварительной корреляционной обработкой и оценкой дисперсии шума в принятой реализации.

4. Метод поляризационного разрешения сложных сигналов с эллиптическими ортогональными поляризациями.

5. Методы оптимизации алгоритмов поиска экстремума поверхности преобразованного функционала правдоподобия по времени работы.

6. Результаты модельных исследований потенциальных возможностей разработанных методов обработки сложных сигналов.

7. Результаты экспериментальных исследований достижимых возможностей разработанных методов обработки сложных сигналов.

Реализация и внедрение результатов работы. При непосредственном участии автора разработан программный продукт, осуществляющий обработку сложных сигналов применительно к вопросам вертикального зондирования ионосферы для НПК «НИИДАР» в рамках договора №095/9–68/416 от 24.03.2014 г. «Аппаратно–программный модуль вторичной обработки сигналов и автоматической обводки высотно-частотной характеристики».

Результаты исследования использованы в БФУ им. И. Канта при выполнении НИР в рамках гранта УМНИК по договору №2924ГУ2.1014 «Разработка адаптивного фильтра для фильтрации неортогональных сигналов».

Результаты исследования использованы в БФУ им. И. Канта при выполнении НИОКР в рамках гранта УМНИК на СТАРТ № 12516р/23919 «Разработка нового подхода в обработке радиочастотных откликов в рамках теории оптимального приема для структурного анализа новых перспективных материалов».

Практическая значимость результатов. Практическую ценность работы представляют разработанные методы, алгоритмы и технологии решения задач статистической радиотехники. Основными являются следующие.

- Технология преобразования функционала правдоподобия для решения задач разрешения и оценки параметров сложных сигналов в области их неортогональности.

- Метод адаптивной фильтрации сложных сигналов на фоне импульсных и сосредоточенных помех.

- Метод поляризационного разделения сложных сигналов с эллиптическими ортогональными поляризациями;

- Быстрые алгоритмы поиска минимума поверхности преобразованных функционалов правдоподобия при обработке сложных сигналов.

- Метод оценки дисперсии шума в принятом сообщении.
- Метод оценки рабочей области при решении задачи разрешения сложных сигналов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XII, XIII, XIV и XV научно-практических конференциях «Межвузовская научно-техническая конференция аспирантов, докторантов, соискателей и магистров» (Калининград, БГАРФ, 2012 – 2015); XV, XVI, XVII, XVIII международных конференциях «Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA)» (Москва, 2013 – 2016); XIX, XX, XXI научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь», (Воронеж, 2013 – 2015).

Полученные научные результаты изложены в 26 публикациях, включая пять публикаций в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных перечнем ВАК, 4 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ, 13 работ в трудах международных конференций и 4 работы на конференциях местного уровня.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемой литературы и одного приложения. Работа изложена на 160 страницах и включает 6 таблиц и 125 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрывается актуальность выбранной темы, определяются цели, задачи, поясняется научная новизна, теоретическая и практическая значимость, формулируются основные защищаемые положения диссертационной работы.

В **первой главе** изложены вопросы, касающиеся развития теории и методов обработки сложных сигналов, которые можно представить в виде

$$\hat{S}(\bar{\lambda}, t) = \hat{U}_0 e^{i\omega_0(t-t_0)} \mu(t-t_0), \quad (1)$$

где \hat{U}_0 – комплексная амплитуда, ω_0 – круговая частота, t_0 – время прихода, $\mu(t-t_0)$ – модулирующая функция, $\bar{\lambda}$ – вектор параметров сложного сигнала.

Особенностью настоящей работы является широкое использование представлений линейного пространства сигналов (§1.1), при переходе к которому

сигнал преобразуется в вектор. Длина вектора определяется энергетическими параметрами (амплитуда, длительность) сигнала, так что

$$\|\bar{S}(\bar{\lambda})\| = \sqrt{E(\bar{\lambda})} = \sqrt{\int_0^T |S(\bar{\lambda}, t)|^2 dt}. \quad (2)$$

Положение вектора в линейном пространстве определяется неэнергетическими параметрами (частота, начальная фаза, время прихода). Угловое различие $\Delta\alpha$ двух векторов $\bar{S}_1(\bar{\lambda})$ и $\bar{S}_2(\bar{\lambda})$ определяется с помощью скалярного произведения

$$\hat{R}(\Delta\bar{\lambda}) = e^{i\Delta\alpha(\Delta\bar{\lambda})} = \frac{(\bar{S}_1(\bar{\lambda}_1), \bar{S}_2^*(\bar{\lambda}_2))}{\sqrt{\|\bar{S}_1(\bar{\lambda}_1)\| \|\bar{S}_2^*(\bar{\lambda}_2)\|}}. \quad (3)$$

При переходе к линейному пространству сигналов реализуется сильная формализация. Каким бы сложным сигнал не был, он преобразуется в вектор, дальнейшие преобразования которого однотипны.

Процедуру обработки сигналов в линейном пространстве можно представить на основании трех векторов: вектора принятого сообщения \bar{y} , вектора копии сигнала $\bar{S}(\bar{\lambda}')$, характеризующегося вектором оцениваемых параметров $\bar{\lambda}'$, вектора разности $\bar{d} = \bar{y} - \bar{S}(\bar{\lambda}')$ (рисунок 1).

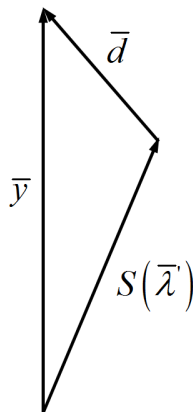


Рисунок 1 – Взаимное расположение векторов: \bar{y} , $\bar{S}(\bar{\lambda}')$, $\bar{d} = \bar{y} - \bar{S}(\bar{\lambda}')$ в линейном векторном пространстве сигналов

Изменение оцениваемых неэнергетических параметров $\bar{\lambda}'$ в копии сигнала приводит к вращению вектора $\bar{S}(\bar{\lambda}')$ относительно вектора \bar{y} . Скалярное

произведение векторов \bar{y} и $\bar{S}(\bar{\lambda}')$ при каждом фиксированном положении формирует многомерную функцию корреляции, максимум которой достигается при совпадении векторов \bar{y} и $\bar{S}(\bar{\lambda}')$. В максимуме корреляционной функции вектор $\bar{d} = \bar{y} - \bar{S}(\bar{\lambda}')$ оценивает дисперсию шума в принятом сообщении.

Основой решения большинства рассматриваемых в работе задач является теория оптимального приема (§1.2), связанная с анализом функции правдоподобия, которая для случая наличия в принятой реализации сигнала $\hat{S}(\bar{\lambda}, t)$, заданного формулой (1), с вектором параметров $\bar{\lambda}$ и аддитивного нормального шума со средним значением равным нулю, дисперсией σ^2 и интервалом корреляции τ_k имеет вид (в предположении, что отсчеты сигнала снимаются с дискретностью τ_k и $T\Delta \gg 1$, где Δ – ширина энергетического спектра шума, который считается равномерным в полосе частот, а T – длительность сигнала)

$$L(\bar{\lambda}') \cong \text{const} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2\tau_k} \int_0^T |\hat{y}(t) - \hat{U}'_0 e^{i\omega_0(t-t'_0)} \mu(t-t'_0)|^2 dt\right). \quad (4)$$

В настоящей работе для краткости записи наряду с (4) вводится функционал правдоподобия (5)

$$\Delta(\bar{\lambda}') = \int_0^T |\hat{y}(t) - \hat{U}'_0 e^{i\omega_0(t-t'_0)} \mu(t-t'_0)|^2 dt. \quad (5)$$

Дифференцируя (5) по \hat{U}'_0 и приравнявая дифференциал к нулю получим корреляционную функцию от t'_0 (* означает комплексное сопряжение)

$$\hat{U}'_0(t'_0) = \int_0^T \hat{y}(t) e^{-i\omega_0(t-t'_0)} \mu^*(t-t'_0) dt. \quad (6)$$

Выражение (6) является основой решения задачи обнаружения сигнала с неизвестными параметрами и неизвестной дисперсией шума в принятом сообщении (§1.3). При этом амплитуда сигнала, определяющая его энергию, а, следовательно, и вероятность обнаружения, оцениваются в точке максимума модуля корреляционной функции (6). Модуль корреляционной функции при наличии в принятом сообщении лишь шума имеет распределение Рэлея, в то время как при наличии в принятом

сообщении сигнала и шума имеет распределение Райса. Анализируя эти распределения при фиксированном пороге обнаружения можно получить вероятности правильного обнаружения, ложной тревоги, пропуска цели. Пороговый уровень устанавливается по критерию Неймана-Пирсона. Фиксируя вероятность ложной тревоги $P_{л.тр.}$, можно получить пороговый уровень $h = 2\sigma\sqrt{-\ln P_{л.тр.} / N}$, где N – количество некоррелированных отсчетов шума на интервале длительности сигнала. Пороговый уровень зависит лишь от статистики шума и не связан с энергией сигнала. Дисперсия шума в принятом сообщении σ^2 находится по минимуму преобразованного функционала правдоподобия (7) (получен из (5) подстановкой правдоподобного значения (6)) в точке $t'_0 = t_0$

$$\Delta(t'_0) = \int_0^T |\hat{y}(t)|^2 dt - \hat{U}'_0 \int_0^T \hat{y}^*(t) e^{i\omega_0(t-t'_0)} \mu(t-t'_0) dt. \quad (7)$$

Преобразованный функционал правдоподобия $\Delta(t'_0)$ оказывается равным квадрату модуля вектора разности $|\vec{d}|^2$, и математическое ожидание от него в точке $t'_0 = t_0$ равно $M(\Delta(t_0)) = \sigma^2 T$. Вероятность обнаружения сложного сигнала определяется в точке максимума модуля корреляционной функции по выражению

$$P_{обн} = \int_h^\infty P(\hat{U}'_0(t'_0 = t_0)) dU'_0, \quad (8)$$

где $P(x)$ – плотность распределения Райса.

Представленное решение задачи обнаружения сигнала с неизвестными параметрами может быть использовано в комплексах аппаратуры непосредственно после проведения корреляционной обработки принятого сообщения.

В §1.4 представлены выражения дисперсий Рао-Крамера для сложных сигналов, которые можно использовать для оценки точности решения с учетом найденной дисперсии шума по минимуму преобразованного функционала правдоподобия.

В §1.5 решается задача разрешения совокупности сложных сигналов, отличающихся комплексными амплитудами и временами приходов. Особенность решения – переход к преобразованному функционалу правдоподобия (фактически к

вектору разности \bar{d}), что позволяет получить отдельные оценки параметров сложных сигналов в области их ортогональности и неортогональности.

Представим основные выражения, определяющие решение задачи разрешения двух сложных сигналов. Пусть принятое сообщение записано в виде

$$\hat{y}(t) = \hat{U}_1 e^{i\omega_0(t-t_1)} \mu(t-t_1) + \hat{U}_2 e^{i\omega_0(t-t_2)} \mu(t-t_2) + \hat{U}_{III}(t), \quad (9)$$

где \hat{U}_1, \hat{U}_2 – комплексные амплитуды, t_1, t_2 – времена прихода, $\mu(t-t_1), \mu(t-t_2)$ – модулирующие функции первого и второго сигналов соответственно, ω_0 – несущая круговая частота, $\hat{U}_{III}(t)$ – аддитивный нормальный шум со средним значением равным нулю, дисперсией σ^2 и интервалом корреляции τ_k .

Функционал правдоподобия в данном случае (согласно (9) и (5)) имеет вид

$$\Delta(\bar{\lambda}') = \int_t \left| \hat{y}(t) - \hat{U}_1' e^{i\omega_0(t-t_1')} \mu(t-t_1') - \hat{U}_2' e^{i\omega_0(t-t_2')} \mu(t-t_2') \right|^2 dt, \quad (10)$$

где $\bar{\lambda}'$ – вектор оцениваемых параметров сигнала, интегрирование производится по времени в принятой реализации.

Дифференцируя (10) по \hat{U}_1' и \hat{U}_2' и приравнявая дифференциалы к нулю, получим

$$\hat{U}_1'(t_1', t_2') = \frac{1}{T} \frac{\int_{t_1'}^{t_1'+T} \hat{y}(t) e^{-i\omega_0(t-t_1')} \mu^*(t-t_1') dt - \hat{R}^* \int_{t_2'}^{t_2'+T} \hat{y}(t) e^{-i\omega_0(t-t_2')} \mu^*(t-t_2') dt}{1 - |\hat{R}|^2}, \quad (11)$$

$$\hat{U}_2'(t_1', t_2') = \frac{1}{T} \frac{\int_{t_2'}^{t_2'+T} \hat{y}(t) e^{-i\omega_0(t-t_2')} \mu^*(t-t_2') dt - \hat{R} \int_{t_1'}^{t_1'+T} \hat{y}(t) e^{-i\omega_0(t-t_1')} \mu^*(t-t_1') dt}{1 - |\hat{R}|^2},$$

где $\hat{R} = \frac{1}{T} \int_{t_2'}^{t_1'+T} e^{-i\omega_0(t_1'-t_2')} \mu(t-t_1') \mu^*(t-t_2') dt$ – коэффициент корреляции сигналов.

Выражения (11) определяют решение задачи разрешения сложных сигналов как в случае ортогональности сигналов, когда $|\hat{R}| = 0$, так и случае неортогональности, когда $|\hat{R}| \neq 0$. Однако в последнем случае должны быть известны времена прихода сложных сигналов, тогда уравнения (11) определяют их комплексные амплитуды. В

общем случае выражения (11) не могут решить задачу разрешения двух сигналов. В точках $t'_1 = t_1$ и $t'_2 = t_2$ они определяют истинные значения \hat{U}_1 и \hat{U}_2 , однако нет критерия отбора этих точек (максимумы выражений (11) достигаются при других значениях t'_1 и t'_2). Для решения задачи разрешения двух сигналов необходимо использовать дополнительную информацию, которую дает вектор разности \bar{d} .

В связи с этим подставим (11) в выражение для функционала правдоподобия (10), получим

$$\begin{aligned} \Delta(t'_1, t'_2) = & \int_t |\hat{y}(t)|^2 dt - \hat{U}'_1(t'_1, t'_2) \int_{t'_1}^{t'_1+T} \hat{y}^*(t) e^{i\omega_0(t-t'_1)} \mu(t-t'_1) dt - \\ & - \hat{U}'_2(t'_1, t'_2) \int_{t'_2}^{t'_2+T} \hat{y}^*(t) e^{i\omega_0(t-t'_2)} \mu(t-t'_2) dt. \end{aligned} \quad (12)$$

Данное выражение представляет собой поверхность в пространстве параметров t'_1 и t'_2 . В точке $t'_1 = t_1$ и $t'_2 = t_2$ эта поверхность имеет глобальный минимум, который является критерием отбора решений. В этой точке $t'_1 = t_1$, $t'_2 = t_2$, $\hat{U}'_1 = \hat{U}_1$, $\hat{U}'_2 = \hat{U}_2$. Меняя t'_1 и t'_2 можно построить поверхность функционала правдоподобия (12) и использовать минимум поверхности функционала, как критерий отбора решений. Дополнительно значение минимума преобразованного функционала правдоподобия определяет дисперсию шума в принятой реализации. Действительно, математическое ожидание от (12) в точке $t'_1 = t_1$ и $t'_2 = t_2$ будет равно

$$M(\Delta(t'_1 = t_1, t'_2 = t_2)) = \sigma^2 T. \quad (13)$$

Таким образом, задача разрешения двух сложных сигналов оказывается решенной, как в области их ортогональности, так и в области их неортогональности. Следует отметить, что фактически решена задача оценки параметров двух сложных сигналов. Решение определяется в минимуме поверхности преобразованного функционала правдоподобия. Ввиду единственности глобального минимума не требуется введение термина «разрешение», который вводится, когда решение определяется по двум максимумам функции неопределенности.

Возможность оценки параметров сложных сигналов согласно изложенной технологии решения определяется допустимой дисперсией амплитуд и времен прихода двух сложных сигналов, которая зависит от отношения сигнал/шум.

В §1.6 рассмотрен вопрос о рабочей области решения задачи оценки параметров сложных сигналов, определяемой из дисперсии оценок амплитуд сигналов.

Если в принятом сообщении содержится M подобных сигналов, тогда дисперсии амплитуд отдельных сигналов имеют вид

$$D_{ii} = \frac{\sigma^2 A_{ii}}{N \Delta_0}, \quad (14)$$

где A_{ii} – алгебраическое дополнение i – диагонального элемента матрицы Фишера, Δ_0 – определитель матрицы Фишера, N – количество некоррелированных отсчетов шума на интервале обработки. Отсюда, возможность решения задачи разрешения M сигналов определяется близостью определителя информационной матрицы Фишера к нулю.

Для двух сигналов рабочей областью разрешения сложных сигналов методом максимального правдоподобия можно считать диапазон $|\hat{R}| = 0 \div 0.9$.

Фильтрация сложных сигналов, характеризующихся значительной шириной спектра, на фоне помех является чрезвычайно актуальной задачей. В § 1.7, § 1.8 представлен новый подход к решению данной задачи, основанный на анализе коэффициента корреляции между сигналом и помехой. Если коэффициент корреляции сигнал-помеха равен нулю, тогда известные частотные или корреляционные фильтры решают задачу фильтрации, в противном случае данные фильтры отфильтровывают лишь ортогональную составляющую помехи, неортогональная составляющая помехи проходит через фильтры вместе с сигналом.

При решении задачи фильтрации следует учитывать, что интервал обработки мал (десятки – сотни микросекунд). На таких интервалах помеха проявляет себя как детерминированный сигнал с неизвестными параметрами. Наиболее часто встречающиеся виды помех: непрерывная по времени и импульсная помеха.

При решении задачи фильтрации сложного сигнала на фоне сосредоточенной по частоте помехи принятое сообщение имеет вид

$$\hat{y}(t) = \hat{U}_c e^{i\omega_c(t-t_0)} \mu(t-t_0) + \hat{U}_\Pi e^{i\omega_\Pi t} + \hat{U}_\Pi(t), \quad (15)$$

где \hat{U}_c – комплексная амплитуда, $\mu(t-t_0)$ – модулирующая функция, t_0 – время прихода, ω_0 – рабочая круговая частота сложного сигнала, \hat{U}_Π , ω_Π – комплексная амплитуда и частота помехи.

При решении задачи фильтрации сложного сигнала на фоне импульсной помехи принятое сообщение имеет вид

$$\hat{y}(t) = \hat{U}_c e^{i\omega_c(t-t_0)} \mu(t-t_0) + \hat{U}_\Pi e^{i\omega_\Pi(t-t_\Pi)} \mu(t-t_\Pi) + \hat{U}_\Pi(t), \quad (16)$$

где t_Π – время прихода, $\mu(t-t_\Pi)$ – огибающая функция помехи.

При переходе к линейному пространству сигналов как сигнал, так и помеха преобразуются в вектора с взаимным угловым расположением, определяемым коэффициентом корреляции. Следовательно, задача фильтрации сложного сигнала на фоне помехи может быть решена по технологии §1.5. Более того, рабочей областью решения этой задачи в соответствии с §1.6 является область изменения модуля коэффициента корреляции между сигналом и помехой $|\hat{R}| = 0 \div 0.9$. Отметим, что фильтрация реализуется при создании скользящего (оконого) режима обработки принятого сообщения на интервале длительности сигнала.

Представленная в §1.5 технология решения задачи разрешения M подобных сигналов имеет две особенности. Первая связана со значительным увеличением машинного времени с увеличением M , вторая связана с тем, что для получения решения с большим значением M требуется высокое отношение сигнал/шум.

Для ускорения нахождения минимума поверхностей преобразованных функционалов правдоподобия в работе предлагается два подхода – первый связан с применением методов глобальной оптимизации, а второй с применением неграфических вычислений на графических процессорах (§1.9). Особенностью поверхности преобразованного функционала правдоподобия является значительное количество локальных экстремумов и узость глобального минимума, поэтому для оптимизации такого функционала автором предлагается улучшенный вариант алгоритма CRS [15]. Улучшения заключаются во введении локальных и глобальных мутаций в основной ход алгоритма, что позволяет эффективно выбираться из

локальных минимумов и быстрее сходиться к решению. Второй подход к решению основан на применении технологии параллельных вычислений CUDA.

В §1.10 описан алгоритм поляризационного разделения двух эллиптически поляризованных ортогональных сложных сигналов. Учет информации о поляризации значительно увеличивает возможности обработки. Основой обработки являются линейные операции: поворот системы координат и преобразование эллиптической поляризации в линейную, за счет добавки фазы $\pi/2$ к одной из составляющих.

Во **второй главе** представлены основные результаты модельных исследований возможностей разработанных алгоритмов обработки сложных сигналов, приведенных в первой главе.

При рассмотрении задачи обнаружения сложного сигнала с неизвестными параметрами (§2.1) одним из основных вопросов является вопрос о возможности оценки дисперсии шума в принятом сообщении по значению минимума преобразованного функционала правдоподобия. На рисунке 2 показана зависимость дисперсии шума, оцененной по минимуму функционала правдоподобия от дисперсии шума в модели сигнала, подтверждающая возможность оценки дисперсии шума в принятом сообщении.

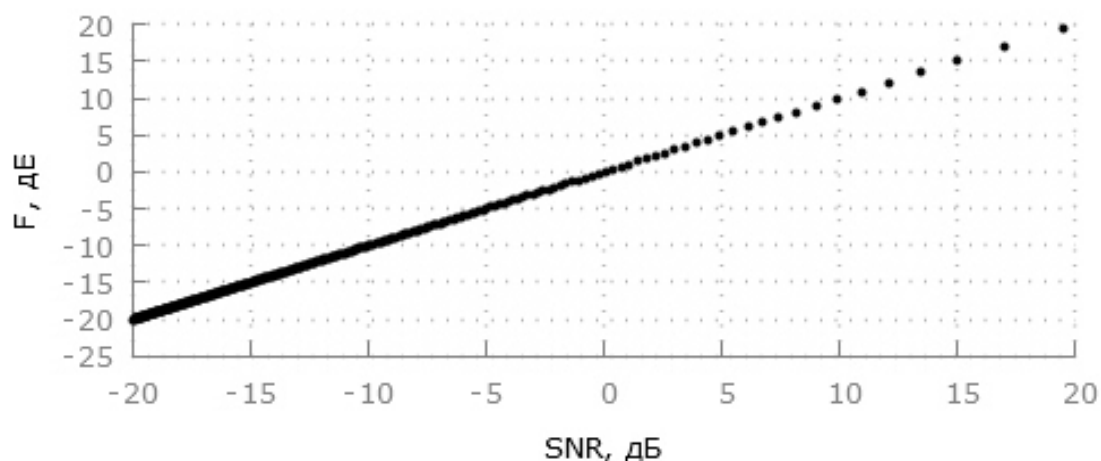


Рисунок 2 – Зависимость дисперсии шума, оцененной по минимуму функционала правдоподобия (F) от заданной в модели дисперсии шума

В §2.2 и §2.3 представлены статистики оценок параметров сложных сигналов, анализируются достижимые точности оценок.

В §2.4 и §2.5 представлены результаты модельных расчетов, иллюстрирующие возможности разрешения двух сложных сигналов.

На рисунке 3 показаны возможности решения задачи разрешения двух сложных сигналов. Время прихода первого сигнала постоянно и равно 0.6 мс. Время прихода второго сигнала линейно меняется. При отношении сигнал/шум 5 дБ разрешение сигналов возможно, даже если разность времен достигает $\Delta t = 3$ мкс. По сравнению с корреляционной обработкой двух сложных сигналов разработанная технология решения задачи обеспечивает увеличение разрешения в 10 раз.

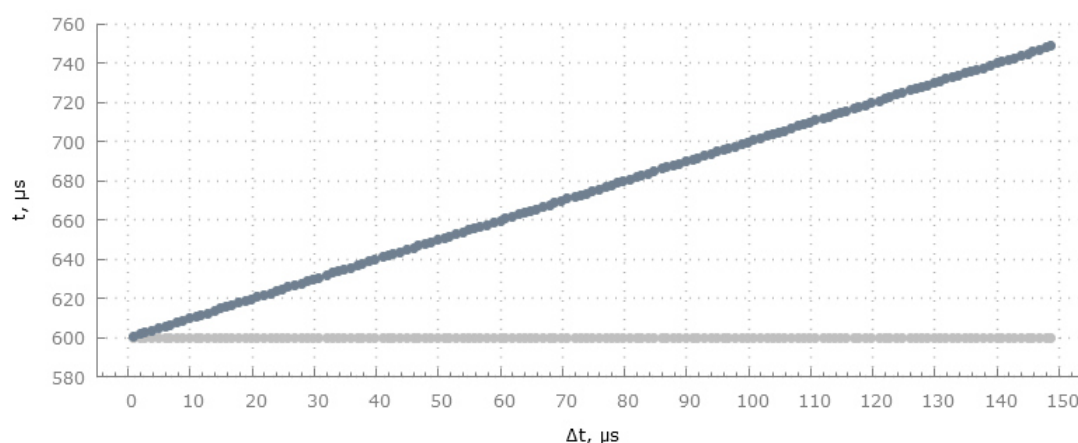


Рисунок 3 – Зависимость оценок времен прихода двух сложных сигналов от разности времен прихода

Разрешение и динамический диапазон (соотношение амплитуд сложных сигналов) при решении задачи разрешения сложных сигналов по разработанной технологии ограничены лишь уровнем шума.

В §2.6 представлены модельные исследования возможности фильтрации сложных сигнала на фоне неортогональных помех.

На рисунке 4 показано принятое сообщение, содержащее два сложных сигнала на основе M-последовательности, аддитивный шум и импульсную помеху с прямоугольной огибающей, неортогональную по времени приема первому сигналу (помеха также неортогональна сигналам по частоте). Светлым цветом представлено принятое сообщение после корреляционной обработки (корреляционный фильтр). Интервал обработки равен длительности сложного сигнала. На рисунке 5 показан совместный спектр сигналов и помехи – сигналы и помеха неортогональны по

частоте. Если подавить помеху режекторным фильтром, то часть информации о сигнале будет потеряна. На рисунке 6 представлен результат фильтрации принятого сообщения в соответствии с разработанной технологией (§1.7, §1.8) (фильтром максимального правдоподобия).

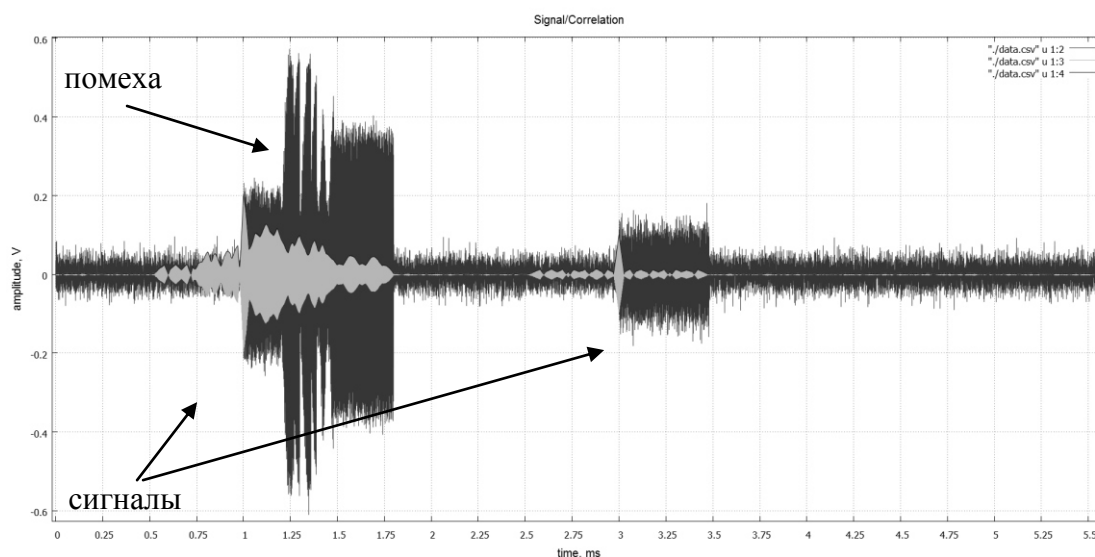


Рисунок 4 – Совокупность двух сигналов дополненная импульсной помехой (темный цвет) и результат ее обработки корреляционным фильтром (светлый цвет)

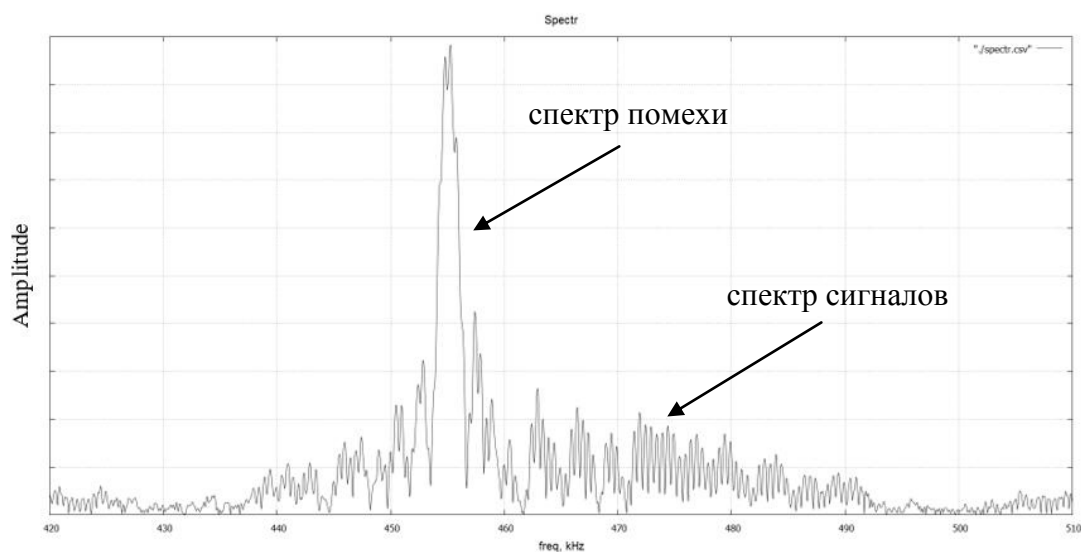


Рисунок 5 – Совокупный спектр двух сигналов и помехи

Фильтр максимального правдоподобия решает задачу оценки параметров как сигнала, так и помехи, что позволяет из исходной реализации вычесть восстановленную помеху. Как видно из рисунка 6, помеха может быть полностью исключена из принятого сообщения. Темным цветом показан результат фильтрации исходного сообщение, светлым цветом – его корреляционная обработка.

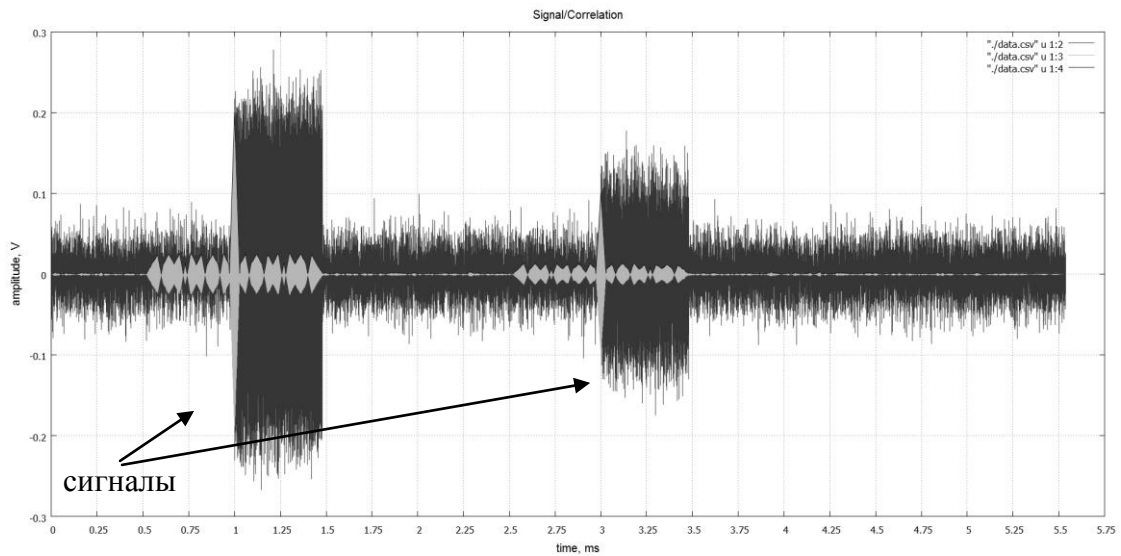


Рисунок 6 – Результат фильтрации совокупности двух сигналов и помехи (темный цвет) и его обработка корреляционным фильтром (светлый цвет)

§2.7 посвящен методам быстрой оптимизации функционалов правдоподобия.

В §2.8 представлены модельные исследования возможности поляризационного разделения двух ортогональных эллиптически поляризованных сложных сигналов.

В **третьей** главе представлены результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов обработки сложных сигналов применительно к вопросам вертикального зондирования ионосферы. Для получения эхо-сигналов вертикального зондирования использовался МРЛК «Вектор» производства НИИДАР (излучаемый сигнал – М-последовательность). Отраженные от ионосферы сигналы представляют собой совокупность двух магнитоионных компонент с различными временами прихода. На ряде частот принятые реализации оказываются пораженными помехами.

Наиболее важными результатами являются: экспериментальное подтверждение возможностей фильтрации сигналов на фоне помех, экспериментальное подтверждение поляризационного разделения магнитоионных компонент, экспериментальное подтверждение возможности высокого разрешения двух сложных сигналов (магнитоионных компонент) в условиях их неортогональности. Эти результаты подробно представлены в диссертационной работе. Они полностью подтверждают результаты теории и результаты модельных исследований.

В **приложении** описывается разработанное автором устройство разделения сложных сигналов в области неортогональности на основе ПЛИС, функционирующее согласно алгоритму сверхразрешения, представленного в диссертации (§1.5). Устройство позволяет в режиме реального времени осуществлять построение ВЧХ ионосферы по данным, принимаемым МРЛК «Вектор».

Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

1. При решении задачи обнаружения сложных сигналов получено следующее:

– установлено, что значение минимума функционала правдоподобия определяет дисперсию шума в принятом сообщении;

– предложено для решения задачи использовать статистику шума и статистику корреляционной функции в точке максимума, используя оценку дисперсии в принятом сообщении;

– предложено в комплексах аппаратуры пороговый уровень устанавливать в соответствии с критерием Неймана-Пирсона с учетом оценки дисперсии шума, определенной по минимуму функционала правдоподобия.

2. Разработаны вопросы теории и проведено исследование потенциально достижимых оценок параметров сложных сигналов на основе преобразованного функционала правдоподобия. Получено следующее:

– выведены выражения, определяющие оптимальный алгоритм обработки при оценке амплитуды, фазы, частоты, времени прихода сложного сигнала;

– выведены выражения, определяющие дисперсии Рао-Крамера для амплитуды, начальной фазы, частоты, времени прихода сложного сигнала;

– установлено, что потенциально достижимая точность оценок амплитуды и фазы сложного сигнала соответствует дисперсии Рао-Крамера. Точность оценок времени прихода при малых отношениях сигнал/шум не соответствует ни дисперсии Рао-Крамера, ни дисперсии Вудворда.

3. Разработаны положения теории и проведено исследование вопросов разрешения сложных сигналов в области их неортогональности на основе преобразованного функционала правдоподобия. При этом получено следующее:

- определен алгоритм обработки сложных сигналов при решении задачи их разрешения в области неортогональности;

- получены выражения, определяющие дисперсии Рао-Крамера для совокупности сложных сигналов.

- установлено, что возможность разрешения двух сложных сигналов в области их неортогональности определяется модулем коэффициента взаимной корреляции и отношением сигнал/шум.

- установлено, что рабочая область при решении задачи разрешения двух сложных сигналов определяется значением модуля коэффициента корреляции, изменяющегося в пределах от 0 до 0.9.

4. Разработаны основы теории и проведены исследования возможностей адаптивной фильтрации сложных сигналов на фоне помех. При этом получено следующее:

- разработана технология цифровой адаптивной фильтрации сложных сигналов в области неортогональности сигнала и помехи, основанная на методе максимального правдоподобия;

- показано, что наиболее сложными являются помехи неортогональные сигналу. Существующие фильтры могут подавить лишь ортогональную по отношению к сигналу помеху.

- установлено, что возможность подавления как сосредоточенных по частоте, так и импульсных помех определяется модулем коэффициента корреляции между сигналом и помехой, изменяющимся в пределах от 0 до 0.9.

5. Разработаны вопросы поляризационного разрешения сложных сигналов с эллиптическими ортогональными поляризациями. При этом получено следующее:

- разработан алгоритм поляризационного разрешения двух сложных сигналов с ортогональными эллиптическими поляризациями;

– на данных вертикального зондирования ионосферы показана возможность полного разрешения двух магнитоионных компонент даже при совпадении их времен прихода.

6. Разработаны методы быстрой минимизации функционалов правдоподобия, существенно ускоряющие алгоритм поиска минимума. При этом получено следующее:

– разработан алгоритм быстрой минимизации функционалов правдоподобия на основе технологии параллельных вычислений CUDA;

– разработан алгоритм быстрой минимизации функционалов правдоподобия на основе алгоритма глобальной оптимизации CRS_LGM.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

1. Строков, В. И. Применение теории оптимального приема для решения вопросов пространственного разрешения сигналов / В. И. Строков, В. А. Пахотин, В. М. Анискевич // Вестник БФУ, 2014. – №4. – С. 69–73.

2. Строков, В. И. Применение графических процессоров для минимизации функционалов, возникающих в процессе решения задач определения параметров информационных сигналов, с помощью теории максимального правдоподобия / В. И. Строков // Журнал радиоэлектроники, 2015. – №1. – С. 22.

3. Строков, В. И. Применение глобальной оптимизации к решению задачи локации, основанной на применении теории оптимального приема / Современные проблемы науки и образования, 2015. – № 1-1. – С. 1751.

4. Коротей, Е. В. Алгоритм оценки параметров составного сигнала ЯМР методом максимального правдоподобия / Е. В. Коротей, Е. В. Волхонская, В. А. Пахотин., К В. Власова, В. И. Строков // Цифровая обработка сигналов, 2015. – № 2. – С. 14–17.

5. Пахотин, В. А. Метод максимального правдоподобия в приложении к ЛЧМ–сигналам В. А. Пахотин, А. И. Бабинович, В. И. Строков // Вестник БФУ, 2015. – №4. – С. 67–74.

6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014614173. Оптимальный фильтр для разделения M–последовательностей / Строков В. И., Пахотин В. А., Молостова С. В. – Заявка № 2014610261; Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 17.04.2014.

7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014614174. Оптимальный фильтр для разделения двух радиоимпульсов / Строков В. И., Власова К. В., Бессонов В.А. – Заявка № 2014610260; Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 17.04.2014.

8. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014614896. Оптимальный адаптивный корреляционный фильтр для выделения М-последовательностей из ионосферного сигнала / Строков В. И. – Заявка № 2014610318; Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 12.05.2014.
9. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014614930. Оптимальный фильтр для разделения автокорреляционных функций М-последовательностей / Строков В. И. – Заявка № 2014610264; Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 14.05.2014.
10. Строков, В. И. Разделение обыкновенной и необыкновенной волн при решении задачи построения высотно-частотных характеристик ионосферы / В. И. Строков /. Сборник научных трудов по материалам Международной научно–практической конференции «НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ В XXI ВЕКЕ», 2014. – С.139–143.
11. Строков, В. И. Практическая реализация фильтров максимального правдоподобия / В. И. Строков, С. В. Молостова, И. В. Либерман // Сборник докладов XIX международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», 2013. – Т. 1. – С. 88–100.
12. Власова, К. В. Неортогональные сигналы в системах связи с частотным разделением каналов / К. В. Власова, В. А. Пахотин, В. И. Строков, А. Н. Алещенков // Сборник докладов XX международной научно–технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», 2014. – Т. 1. – С. 111–116.
13. Строков, В. И. Метод максимального правдоподобия в приложении к вертикальному зондированию ионосферы / В. И. Строков, В. А. Пахотин., В. В. Мялковский // Сборник докладов XX международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», 2014. – Т. 1. С. 99 – 111.
14. Строков, В. И. Особенности получения сверхразрешения сложных сигналов с помощью теории максимального правдоподобия / В. И. Строков, В. А. Пахотин, В. А. Бессонов // Сборник докладов XXI международной научно–технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», 2015. – Т. 1. – С. 230–241.
15. Коротей, Е. В. Разрешение сигналов ЯМР методом максимального правдоподобия / Е. В. Коротей, Е. В. Волхонская, В. А. Пахотин, К. В. Власова, В. И. Строков // Сборник докладов XXI международной научно–технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», 2015. – Т. 1, С. 205–217.
16. Строков, В. И. Разработка фильтров для разделения радиоимпульсов с частичным совпадением спектров на базе микроконтроллера / В. И. Строков, В. А. Пахотин, В. М. Анискевич // Сборник докладов 15–й международной конференции «DSPА–2013», 2013. – Т. 2, С. 226–229.
17. Строков, В. И. Адаптивная фильтрация сложных сигналов методом максимального правдоподобия / В. И. Строков, В. А. Пахотин, И. В. Либерман // Сборник докладов 16–й международной конференции «DSPА–2014», 2014. – Т. 1 – С. 376–379.

18. Строков, В. И. Решение задачи разделения сложных сигналов на примере вертикального зондирования ионосферы / В. И. Строков, В. А. Пахотин, И. В. Либерман // Сборник докладов 17-й международной конференции «DSPA–2015», 2015. – Т 1. С. 368–371.

19. Власова, К. В. Алгоритм оценки параметров составного сигнала ЯМР методом максимального правдоподобия / К. В. Власова, Е. В. Волхонская, Е. В. Коротей, В. А. Пахотин, В. И. Строков // Сборник докладов 17-й международной конференции «DSPA–2015», 2015. – Т 1. С. 372–376.

20. Пахотин, В. А. Технология цифровой обработки простых и широкополосных сигналов на основе функционала правдоподобия / В. А. Пахотин, К. В. Власова, В. А. Бессонов, В. И. Строков, А. И. Бабинович, Э. И. Шустов // Сборник докладов 18-й международной конференции «DSPA–2016», 2016. – Т 1. – С. 13–25.

21. Чернова, И. Б. Адаптивная фильтрация сложных сигналов на фоне помех / И. Б. Чернова, В. А. Пахотин, С. В. Молостова, В. И. Строков // Сборник докладов 18-й международной конференции «DSPA–2016», 2016. – Т 2. – С. 556–561.

22. Строков, В. И. Использование ПЛИС как сопроцессора при решении вычислительно сложных задач на примере сверхразрешения сигналов / В. И. Строков, В. А. Пахотин, К. В. Власова // Сборник докладов 18-й международной конференции «DSPA–2016», 2016. – Т 2. – С. 765–769.

23. Строков, В. И. Применение теории оптимального приема для улучшения азимутального разрешения звуковых сигналов / В. И. Строков, В. А. Пахотин // Материалы тринадцатой межвузовской научно–технической конференции аспирантов, докторантов, соискателей и магистров, с. 135–138, 2013.

24. Строков, В. И. Построение адаптивного цифрового корреляционного фильтра на основании положений теории оптимального приема / В. И. Строков, В. А. Пахотин // Материалы четырнадцатой межвузовской научно–технической конференции аспирантов, докторантов, соискателей и магистров, 2014.

25. Строков, В. И. Поляризационное разделение магнитоионных компонент при вертикальном зондировании ионосферы / В. И. Строков, В. А. Пахотин // Материалы пятнадцатой межвузовской научно–технической конференции аспирантов, докторантов, соискателей и магистров, 2015.

26. Чернова, И. Б. Исследование возможностей адаптивной фильтрации сложных сигналов / И. Б. Чернова, В. И. Строков. // Материалы шестнадцатой межвузовской научно–технической конференции аспирантов, докторантов, соискателей и магистров, 2015. – С. 66–72.

Ссылки на литературные источники

1. Вальд А. Последовательный анализ. М. Физматлит, 1960.

2. Власова К. В. Развитие методов обработки информации в системах импульсной локации. Диссертация на соискание степени кандидата физико–математических наук, 2008.
3. Климов С. А. Метод повышения разрешающей способности радиолокационных систем при цифровой обработке сигналов. ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ” N 1, 2013
4. Котельников В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М.–Л.: ГЭИ, 1956.
5. Либерман И. В. Частотное разделение сигналов в области высокой корреляции базисных функций. Диссертация на соискание степени кандидата физико–математических наук, 2008.
6. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.
7. Ржанов А. А. Развитие цифровых методов обработки ионосферных сигналов. Диссертация на соискание степени кандидата физико–математических наук, 2010.
8. Слюсар В. И., Смоляр В. Г. Метод неортогональной дискретной частотной модуляции сигналов для узкополосных каналов. Радиоэлектроника. Изв. высш. учеб. заведений. 2004, №4, с. 53 – 59.
9. Слюсар В. И., Смоляр В. Г. Частотное уплотнение каналов связи на основе сверхрелеквского разрешения сигналов. Радиоэлектроника. Изв. высш. учеб. заведений. 2003, №7, с. 30 – 39.
10. Стратонович Р. Л., Сосулин Ю. Г. Оптимальный прием сигналов на фоне негауссовых помех. «Радиотехника и электроника», 1966.
11. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983.
12. Трифонов А. П. Приём сигнала с неизвестной длительностью на фоне белого шума. Радиотехника и электроника. 1977. Т.22. №1. С.435–438
13. Трифонов А. П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986.
14. Ширман Я. Д. Разрешение и сжатие сигналов. М.: Сов. радио, 1974. –360 с.
15. Price W. L. A controlled random search procedure for global optimization. Towards Global Optimization 2, p. 71–84, North–Holland Press, Amsterdam, 1978.
16. Wang Shun, Chen Ziwei, Gong Zhaoqian, Li Jutao «A method for separating O – wave and X – wave and its application in digital ionosonde», ANNALS OF GEOPHYSICS, №5, 2013.