

На правах рукописи

Михеев Павел Викторович

**СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ И КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ МЕТОДОВ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
В ИМПУЛЬСНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2007

Работа выполнена в Нижегородском государственном
университете им. Н.И. Лобачевского.

Научный руководитель

доктор физико-математических наук, профессор Флакман А.Г.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор И.Я. Орлов,
кандидат физико-математических наук В.И. Турчин.

Ведущая организация – научно-технический центр при ОАО НПО
«Лианозовский электромеханический завод».

Защита состоится «10» октября 2007 г. в 16.30 час. на заседании
диссертационного совета Д 212.166.07 в Нижегородском государственном
университете им. Н.И. Лобачевского (603950, г. Нижний Новгород, пр.
Гагарина, 23, корп. 1, радиофизический факультет, ауд. 420).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим
отправлять по указанному адресу ученому секретарю совета

Автореферат разослан «___» _____ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, кандидат физико-математических
наук, доцент

В.В. Черепенников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Синтез эффективных алгоритмов обработки полезных сигналов на фоне помех является одной из основных проблем при проектировании любой информационной системы. От того, насколько успешно решается эта задача, в значительной мере зависят как эксплуатационные характеристики системы, так и объём извлекаемой с её помощью информации.

Для многих приложений, таких, например, как радио- и гидролокация, навигация и связь, несмотря на различный характер решаемых задач, существует общий подход к синтезу алгоритмов обработки наблюдаемых зашумлённых данных. Такой подход, как известно, был предложен в середине прошлого столетия А. Вальдом и назван теорией статистических решений. Его истоки лежат в работе Т. Байеса, опубликованной в 1763 году, где приводится известная теорема Байеса, играющая основополагающую роль в теории вероятностей и, как следствие, в теории статистических решений. В связи с этим указанный подход называется также байесовским. Байесовский подход позволил с единых позиций рассматривать самый обширный круг статистических задач, в том числе и задачи обнаружения сигналов и оценивания их параметров. С помощью введенных в рамках данной теории общих критериев оптимальности возможен как синтез, так и сравнительный анализ различных способов обработки информации.

Существенным достоинством байесовского подхода является его методологическая завершенность. Однако применение этого подхода предполагает полное статистическое описание ситуации, в которой приходится принимать то или иное решение, что на практике встречается относительно редко. Обычно задачи обработки информации и принятия решения сопровождаются большей или меньшей степенью априорной неопределённости. Чаще всего это относится к априорному закону распределения параметров (информативных и неинформативных), от которых зависят сигналы и помехи. В радиолокации такими параметрами являются амплитуда и частота Доплера полезного сигнала, пространственные координаты обнаруживаемых объектов, спектрально-корреляционные характеристики помех и т.д.

Указанные обстоятельства ограничивают на практике применение байесовского подхода в «чистом» виде, поскольку априорные распределения сигналов и помех бывают, как правило, неизвестны. Тем не менее, теория статистических решений является методологической основой для поиска новых эффективных процедур обработки информации. Это обусловлено тем, что при

весьма слабых допущениях, которые выполняются в подавляющем большинстве практических случаев, байесовские правила решения образуют полный класс.

Другими словами, для всякого правила решения (алгоритма обработки информации), не относящегося к байесовскому классу, в нём может быть найдено альтернативное правило решения, обеспечивающее меньшее значение условного риска при любом фиксированном значении параметров сигналов и помех. Поэтому «хорошие» процедуры обработки статистических данных следует искать именно внутри полного класса. Здесь, прежде всего, имеется в виду структура байесовских правил решения, которая сводится к сравнению между собой различных линейных комбинаций функций правдоподобия наблюдаемой выборки случайного процесса.

Поэтому стремление сохранить оптимальную структуру решающей статистики в условиях, когда строго байесовское правило принятия решения по тем или иным причинам неосуществимо, выглядит вполне закономерным и обоснованным.

Так, например, если строго оптимальное правило сравнения с порогом отношения правдоподобия не может быть реализовано из-за незнания априорного распределения параметров, то оно может быть заменено аналогичной процедурой с использованием обобщённого отношения правдоподобия, в котором вместо неизвестных значений параметров фигурируют их максимально правдоподобные оценки (адаптивный байесовский подход).

Другим примером использования байесовского формализма в условиях априорной неопределённости является принцип минимакса, при котором выбирается байесово правило решения, соответствующее наименее благоприятному априорному распределению параметров. Это позволяет гарантировать, что при любом априорном распределении параметров значение среднего риска не превысит некоторой заданной величины.

В связи с вышеизложенным в диссертационной работе синтез новых квазиоптимальных, а для некоторых ситуаций и строго оптимальных, способов обработки информации базируется на байесовском подходе.

Необходимость развития новых методов обработки информации обусловлена разными причинами. Одна из них заключается в возникновении на практике нестандартных сигнально-помеховых ситуаций. В качестве примера можно привести нарастающую в последнее время тенденцию к снижению уровня собственного шума приёмных устройств информационных систем. В радиолокации это приводит, например, к тому, что при обработке сигналов на фоне собственного шума и сильных пространственно когерентных внешних помех ковариационная матрица мешающих сигналов оказывается плохо

обусловленной, то есть отношение её максимального и минимального собственных чисел значительно превышает единицу. При этом «стандартная» байесовская процедура синтеза оптимального весового вектора обработки, связанная с обращением ковариационной матрицы помех, становится существенно неустойчивой к погрешностям производимых вычислений и другим возмущениям точной матрицы. Это обстоятельство вынуждает искать альтернативные способы синтеза, не требующие обращения плохо обусловленных матриц. В частности, в приведённом примере можно пренебречь собственным шумом и перейти, тем самым, к задаче синтеза обработки полезных сигналов только на фоне внешних помех, ковариационная матрица которых является вырожденной.

Поиск новых алгоритмов обработки обусловлен и недостатком априорных сведений о статистических характеристиках сигналов и помех. Такая ситуация имеет место, например, при временной обработке радиолокационного сигнала на фоне собственного шума и пассивных внешних помех, порождаемых отражениями от местных предметов и различных метеообразований. Спектрально-корреляционные свойства этих помех известны, как правило, лишь приблизительно, в результате чего приходится прибегать к их более или менее реалистической аппроксимации и затем на её основе проводить синтез обработки. Эффективность получаемой таким способом фильтрации входного процесса зависит от степени близости её структуры к байесовскому алгоритму при наличии полной статистической информации о сигнально-помеховой обстановке.

Другим весьма важным случаем, когда в условиях априорной неопределённости приходится искать новые алгоритмы обработки информации, является выбор уровня порога обнаружения полезных сигналов на выходе системы пространственно-временной обработки. Порог обнаружения при этом приходится выбирать адаптивно на основе имеющейся реализации процесса, содержащей кроме стационарного во времени собственного шума различные нестационарные воздействия, к которым, в частности, относятся и полезные сигналы. Главное требование, предъявляемое к величине порога, – это поддержание заданного уровня ложных тревог в разнообразных помеховых ситуациях при сравнительно небольших потерях, вносимых при этом в обнаружение полезных сигналов. По сути, адаптивный порог должен осуществлять различение полезных и мешающих сигналов на выходе системы обработки, обеспечивая при этом максимальную вероятность их правильной идентификации. Отсюда ясно, что степень адекватности порога имеющейся сигнально-помеховой обстановке существенно влияет на конечный результат обработки полезных сигналов на фоне помех. При этом неудачно выбранный способ определения уровня порога может привести к значительному снижению

эффективности пространственно-временной фильтрации сигналов, даже если она по своей структуре является весьма близкой к байесовской.

И, наконец, традиционной причиной, вынуждающей искать новые способы обработки статистических данных, является неприемлемо большой объём аппаратных и вычислительных затрат, требующийся для реализации строго оптимального (или весьма близкого к нему) алгоритма обработки. При этом, как правило, осуществляется поиск квазиоптимальной процедуры обработки, несколько уступающей по эффективности оптимальному алгоритму, но позволяющей при этом существенно уменьшить объём выполняемых операций. Данная проблема имеет место, например, при временной фильтрации радиолокационных сигналов на фоне шума. Действительно, в современных радарх исходное аналоговое сообщение обычно подвергается дискретизации по времени с тем, чтобы дальнейшую обработку, связанную с реализацией сложных алгоритмов, проводить с помощью цифровых процессоров. При этом форма сигнала после дискретизации зависит от его временного положения относительно моментов извлечения выборки, и, следовательно, в соответствии с методом обобщённого отношения правдоподобия дискретная (цифровая) фильтрация должна иметь многоканальную структуру, где каждый из каналов соответствует определённой форме полезного сигнала. Поэтому в данном случае обычно приходится искать некоторый компромисс между объёмом производимых вычислений и качеством получаемого при этом алгоритма обработки.

Указанные обстоятельства делают актуальной проблему поиска новых методов обработки радиолокационных сигналов на фоне помех.

Цели работы.

Целями диссертационной работы являются: 1. Синтез новых эффективных методов пространственно-временной обработки радиолокационной информации, базирующихся на байесовском подходе. 2. Анализ статистических характеристик получаемых алгоритмов. 3. Сравнительный анализ эффективности новых и известных алгоритмов обработки радиолокационных сигналов.

Методы исследования.

При решении поставленных задач использовались общие методы статистической радиофизики и теории вероятностей, а также – теория статистических решений и теория матриц.

Научная новизна работы.

1. Предложен новый подход к синтезу оптимальных алгоритмов пространственной обработки радиолокационных сигналов на фоне гауссовской помехи с вырожденной ковариационной матрицей, который основан на обобщённом обращении этой матрицы. С помощью данного подхода получены

оригинальные оптимальные процедуры обнаружения сигналов и подавления активных внешних помех.

2. Предложен и запатентован метод аналого-дискретной временной обработки импульсных сигналов на фоне стационарного шума. Аналого-дискретный фильтр, реализующий данный метод, максимизирует среднее по времени прихода сигнала отношение сигнал/шум, а полученное аналитическое выражение для его передаточной характеристики является обобщением соответствующего выражения для оптимального аналогового фильтра.

3. Введена и обоснована новая эффективная мера когерентности радиолокационных сигналов, инвариантная по отношению к их форме. Мера основана на величине энтропии распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы. Показано, что известные показатели степени когерентности радиолокационных сигналов являются частными случаями предложенной меры.

4. Предложен новый проекционный способ синтеза квазиоптимальной межпериодной временной обработки когерентной пачки импульсов, принимаемой на фоне пассивных внешних помех и собственного шума радиолокационной системы. При этом в отличие от широко распространённого режекторного фильтра пассивных помех, основанного на векторе линейного предсказания, для подавления помех используется проекционный матричный фильтр, обеспечивающий максимальную близость структуры получаемого квазиоптимального алгоритма к байесовской процедуре обработки. Показано, что при заданном уровне подавления пассивных помех предложенный способ обеспечивает существенный выигрыш в отношении сигнал/шум по сравнению с другими известными способами квазиоптимальной межпериодной фильтрации сигналов.

5. Предложен и запатентован эффективный метод адаптивного выбора порога обнаружения, основанный на оценке квантилей статистического распределения процесса на выходе пространственно-временной обработки сигналов.

Теоретическая и практическая значимость результатов.

Полученные в диссертации результаты представляют интерес с точки зрения методологии синтеза информационных систем, проводящих обработку данных в условиях воздействия помех.

Кроме того, синтезированные в диссертации новые алгоритмы оптимальной и квазиоптимальной обработки радиолокационной информации на фоне помех позволяют существенно повысить помехозащищённость импульсных радиолокаторов, а также увеличить дальность их действия. Разработанные алгоритмы могут быть эффективно реализованы на базе ПЛИС и сигнальных

процессоров и использованы при пространственно-временном обнаружении полезных сигналов в сложной помеховой обстановке.

Положения, выносимые на защиту.

1. Основанный на понятии обобщённой обратной матрицы способ синтеза оптимальных алгоритмов пространственной обработки радиолокационных сигналов на фоне гауссовской помехи с вырожденной ковариационной матрицей, а также – синтезированные предложенным способом оптимальные алгоритмы пространственной обработки сигналов.

2. Аналитическое выражение для передаточной характеристики аналого-дискретного временного фильтра, максимизирующего среднее по времени прихода полезного сигнала отношение сигнал/шум и являющегося обобщением оптимального аналогового фильтра.

3. Инвариантная по отношению к форме радиолокационного сигнала количественная мера когерентности, основанная на величине энтропии распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы.

4. Проекционный способ синтеза квазиоптимальной межпериодной временной обработки когерентной пачки импульсов, принимаемой на фоне пассивных внешних помех и собственного шума радиолокационной системы.

5. Способ адаптивного выбора порога обнаружения, основанный на оценке квантилей статистического распределения процесса на выходе пространственно-временной обработки сигналов.

Публикации и апробация результатов работы.

По теме диссертации опубликовано 14 работ. Среди них 4 статьи в рецензируемых изданиях («Известия вузов. Радиофизика» [1, 2], «Вестник ННГУ. Серия Радиофизика» [3], «Вопросы радиоэлектроники, сер. РЛТ» [4]), 8 работ, представляющих собой опубликованные материалы докладов на конференциях [7 – 14], и 2 зарегистрированных патента РФ на изобретения [5, 6].

Результаты диссертационной работы докладывались на 9-ой международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2007 г.), на 11-ой и 12-ой международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2005 и 2006 гг.), на международной выставке-конференции «Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления» (Нижний Новгород, 2002 г.) и на региональном молодёжном научно-техническом форуме (Нижний Новгород, 2002 г.).

Результаты работы докладывались на семинаре кафедры бионики и статистической радиофизики ННГУ и на технических совещаниях

Нижегородского научно-исследовательского института радиотехники (Нижний Новгород).

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка использованных сокращений. Общий объём составляет 109 страниц, из них основной текст – 97 страниц, библиографический список – 8 страниц (76 наименований). Работа содержит 14 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении освещено современное состояние исследований по теме диссертации и обоснована ее актуальность, сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна полученных результатов, кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе диссертации решается задача синтеза оптимальных методов пространственной обработки радиолокационных сигналов на фоне гауссовской помехи с вырожденной ковариационной матрицей. Близкая к этому случаю ситуация возникает, например, при обработке сигналов на фоне собственного шума и существенно превышающих его по мощности пространственно когерентных активных внешних помех.

В разделе 1.1 с использованием свойств векторных подпространств и понятия обобщённой обратной матрицы, выводится явное выражение для плотности вероятности гауссовского вектора с вырожденной ковариационной матрицей. Показано, что при произвольном статистическом распределении центрированного случайного вектора любая его реализация с вероятностью 1 принадлежит подпространству значений (образу) ковариационной матрицы этого вектора. Следовательно, для статистически полного описания произвольного вектора достаточно найти его распределение в указанном подпространстве. Для центрированного гауссовского вектора \mathbf{Y} оно характеризуется плотностью вероятности вида

$$p(\mathbf{Y}) = C \exp(-\mathbf{a} \mathbf{Y}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Y} / 2), \quad (1)$$

где параметр \mathbf{a} равен 1 или 2 для вещественных или комплексных \mathbf{Y} , соответственно; $(*)^H$ – знак эрмитова сопряжения; C – константа, удовлетворяющая условию нормировки; \mathbf{R}^{-1} – обобщённая обратная матрица ковариационной матрицы \mathbf{R} вектора \mathbf{Y} , определяемая уравнением $\mathbf{R} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{R} = \mathbf{R}$.

При вырожденной матрице \mathbf{R} данному определению удовлетворяет бесконечное множество матриц, а при невырожденной – указанное уравнение имеет единственное решение, равное обратной матрице \mathbf{R}^{-1} . В связи с этим

полученную плотность вероятности (1) гауссовского вектора с вырожденной ковариационной матрицей можно рассматривать как обобщение известного выражения для многомерного гауссовского распределения в невырожденном случае.

В разделе 1.2 на основе полученной плотности вероятности синтезируется оптимальная процедура обнаружения сигнала, принимаемого антенной решёткой на фоне пространственно когерентных активных внешних помех. Показано, что при полностью известных параметрах полезного сигнала оптимальный алгоритм обнаружения сводится к сравнению с порогом величины

$$\gamma = \text{Re}(\mathbf{Y}^H \mathbf{R}^+ \mathbf{S}(e_0)), \quad (2)$$

где \mathbf{Y} – вектор наблюдаемой реализации процесса, \mathbf{R}^+ – псевдообратная по Муру и Пенроузу матрица помех, $\mathbf{S}(e_0)$ – вектор полезного сигнала, e_0 – направление прихода полезного сигнала.

Полученный алгоритм является обобщением процедуры обнаружения полезного сигнала на фоне гауссовской помехи с невырожденной ковариационной матрицей.

В разделе 1.3 рассматривается проблема компенсации (подавления) внешних помех в основных пространственных приемных каналах путём использования информации о помехах, содержащейся во вспомогательных (компенсационных) каналах. Процедура компенсации заключается в получении оценки вектора помех и последующем её вычитании из наблюдаемых в основных каналах процессов. Минимум мощности помех после подавления обеспечивается байесовской оценкой, равной апостериорному математическому ожиданию вектора помех.

С помощью полученной в разделе 1.1 плотности вероятности (1) показано, что оптимальная оценка вектора помех в основных каналах имеет вид

$$\hat{\lambda} = \mathbf{R}_{\lambda\mathbf{X}} \mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}}^{-1} \mathbf{X}, \quad (3)$$

где λ и \mathbf{X} – векторы помех в основных и компенсационных каналах соответственно; $\mathbf{R}_{\lambda\mathbf{X}} = \langle \lambda \mathbf{X}^H \rangle$ – матрица взаимной корреляции векторов λ и \mathbf{X} ; $\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = \langle \mathbf{X} \mathbf{X}^H \rangle$ – корреляционная матрица помех в компенсационных каналах; $\langle \Lambda \rangle$ – означает статистическое среднее.

Полученный алгоритм подавления активной внешней помехи является обобщением соответствующей процедуры обработки при невырожденной корреляционной матрице вектора помех во вспомогательных пространственных каналах.

В разделе 1.4 приводятся основные результаты, полученные в первой главе.

Во второй главе рассматривается специфическая проблема, возникающая при временной обработке аналогового импульсного сигнала на фоне шума с помощью системы смешанного типа, предполагающей как аналоговую, так и дискретную фильтрацию процесса.

В начале главы кратко характеризуются особенности рассматриваемой проблемы с указанием на то, что в современных радарх временная обработка сигналов содержит обычно как аналоговую, так и дискретную (цифровую) части, разделённые между собой «небайесовской» процедурой временной дискретизации процесса. В связи с этим возникает качественно новая структура обработки, не сводящаяся ни к чисто аналоговому, ни к чисто дискретному случаям.

В разделе 2.1 рассматривается основная проблема, возникающая при аналого-дискретной фильтрации радиолокационного процесса: учёт зависимости формы дискретизированного полезного сигнала от его временного положения относительно моментов извлечения выборки. При этом подход, основанный на обобщённом отношении правдоподобия, предполагает многоканальную реализацию дискретной части обработки, где каждый из каналов соответствует определённой форме сигнала. Однако такое построение временной обработки требует значительных аппаратных затрат.

В связи с этим заслуживает внимания одноканальная реализация аналого-дискретной обработки, состоящая из последовательно соединённых аналогового фильтра, аналого-цифрового преобразователя и дискретного фильтра. При этом неизбежно возникают потери в эквивалентном отношении сигнал/шум по сравнению с многоканальной схемой, которые, однако, могут быть сведены к минимуму путём оптимального выбора аналогового и дискретного фильтров.

В данном разделе осуществлён синтез такого аналого-дискретного фильтра (АДФ). В качестве критерия оптимальности использовался максимум среднего по времени прихода сигнала отношения сигнал/шум на выходе АДФ. Показано, что при заданном шаге Δt временной дискретизации процесса передаточная характеристика оптимального АДФ имеет вид

$$H(w)F(w) = \frac{S^*(w) \sin(\omega \Delta t/2)}{N(w) (\omega \Delta t/2)}, \quad (4)$$

где $H(w)$ и $F(w)$ – передаточные характеристики аналогового и дискретного фильтров соответственно; $S(w)$ – спектр полезного сигнала; $N(w)$ – спектральная плотность мощности шума; $(...)^*$ – означает комплексное сопряжение. Эта формула обобщает известное выражение для передаточной характеристики оптимального аналогового фильтра, так как последняя может быть получена из (4) как частный случай при $\Delta t = 0$.

В разделе 2.2 приведён пример синтеза оптимального АДФ для временной обработки аналогового фазоманипулированного сигнала на фоне белого шума. Показано, что оптимальный аналого-дискретный фильтр даёт заметный выигрыш в среднем отношении сигнал/шум по сравнению с часто применяемым в этих условиях согласованным АДФ.

В разделе 2.3 приводятся основные результаты второй главы.

В третьей главе рассматривается проблема синтеза межпериодной временной обработки последовательности (пачки) радиолокационных импульсов в условиях априорной неопределённости относительно формы спектральной плотности пассивных помех. Данная проблема тесно связана с понятием когерентности сигналов, играющим важную роль в радиолокации. Поэтому первый раздел данной главы посвящён подробному анализу этого понятия.

В разделе 3.1 показано, что, несмотря на широкую распространённость термина «когерентность», он не имеет достаточно точного и универсального смысла, позволяющего применять его к радиолокационным сигналам произвольной формы. Обычно степень когерентности сигналов оценивается на качественном уровне и/или поясняется на конкретных примерах. При этом основная сложность заключается не в различении когерентных и некогерентных сигналов, которое можно провести исходя из некоторых очевидных соображений, а в различении некогерентных сигналов по степени их некогерентности.

В данном разделе вводится и обосновывается количественная мера когерентности радиолокационного сигнала, инвариантная по отношению к его форме. Мера основана на величине энтропии H распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы и определяется выражением

$$H = -\sum_{i=1}^N I_{0i} \log I_{0i}, \quad (5)$$

где N – размерность вектора сигнала, а I_{0i} – нормированные к средней энергии сигнала собственные значения его корреляционной матрицы. При этом, чем меньше энтропия H , тем сигнал когерентнее.

Приведены примеры, иллюстрирующие эффективность полученной меры при оценке степени когерентности различных радиолокационных сигналов, в том числе и стохастических.

В разделе 3.2 показано, что выбор того или иного способа межпериодной временной обработки сигналов на фоне собственного шума и пассивных внешних помех существенно зависит от степени когерентности принимаемой пачки радиолокационных импульсов. Отмечено, что байесовская процедура

фильтрации часто не может быть реализована из-за незнания истинной корреляционной матрицы пассивных помех.

Предложен новый квазиоптимальный метод синтеза межпериодной фильтрации, позволяющий получать близкие к байесовским алгоритмы обработки, но не требующий при этом точного знания корреляционных характеристик помех. Метод основан на аппроксимации неизвестной обратной корреляционной матрицы мешающих сигналов (включая и собственный шум) с помощью матрицы-проектора на ортогональное пассивным помехам подпространство.

Проведено сравнение алгоритма обработки, полученного предложенным методом, с известным алгоритмом полностью когерентной квазиоптимальной межпериодной фильтрации, основанным на подавлении пассивных помех с помощью фильтра их линейного предсказания. Показано, что при заданном уровне подавления пассивных помех предложенный алгоритм обеспечивает существенный выигрыш в отношении сигнал/шум в значительной части диапазона изменения частоты Доплера полезных сигналов.

В разделе 3.3 кратко перечислены полученные в третьей главе результаты.

Четвертая глава посвящена заключительной стадии первичной обработки радиолокационной информации: выбору уровня порога обнаружения, с которым сравнивается полученная в процессе пространственно-временной фильтрации входных данных решающая статистика. В зависимости от результата сравнения делается вывод о наличии или отсутствии полезного сигнала в данном элементе разрешения. При этом в условиях априорной неопределённости относительно статистических характеристик сигналов и помех порог должен выбираться адаптивно на основе имеющейся реализации процесса.

В разделе 4.1 показано, что выбор порога обнаружения является столь же важной составной частью первичной обработки радиолокационных сигналов, как подавление помех и накопление полезных сигналов. По существу, адаптивный порог осуществляет различение полезных и мешающих сигналов на выходе пространственно-временной обработки, обеспечивая при этом достаточно высокую вероятность их правильной идентификации.

Проведён сравнительный анализ двух наиболее распространённых на практике методов адаптивной оценки порога, один из которых основан на выборочном среднем, а другой – на выборочных квантилях или порядковых статистиках (метод ПС) $x^{(1)} \leq x^{(2)} \leq \dots \leq x^{(n)} \leq \dots \leq x^{(N)}$, образуемых ранжированием обучающей выборки x_1, \dots, x_N . Показано, что метод, основанный на порядковых статистиках, обеспечивает более широкие возможности при адаптации порога к сложным сигнально-помеховым ситуациям.

В разделе 4.2 предложен новый модифицированный метод порядковых статистик (МПС) для определения порога обнаружения применительно к импульсному радиолокатору, излучающему сложные зондирующие сигналы (то есть сигналы с базой, существенно превышающей единицу) и реализующего при этом пространственно-временную обработку принимаемых сигналов в большом динамическом диапазоне изменения их амплитуд. В этом случае кроме обычных для любого радара помех приходится учитывать ещё и сильные боковые лепестки полезных сигналов, превышение порога которыми должно, очевидно, рассматриваться как ложная тревога.

Предложенный метод предполагает использование кроме основной порядковой статистики $x^{(n)}$ (как в методе ПС) ещё и вспомогательной, в роли которой выступает максимальная порядковая статистика $x^{(N)}$. При этом используется то обстоятельство, что статистика $x^{(N)}$ равна значению главного пика полезного сигнала, и, следовательно, её добавление (с подходящим весом) к основной составляющей порога позволяет осуществлять его коррекцию в области боковых лепестков сигнала. Показано (см. рис. 1), что метод МПС позволяет найти приемлемый компромисс между надёжным обнаружением главных пиков полезных сигналов и существенным снижением (по сравнению с методом ПС) вероятности ложных тревог по их боковым лепесткам.

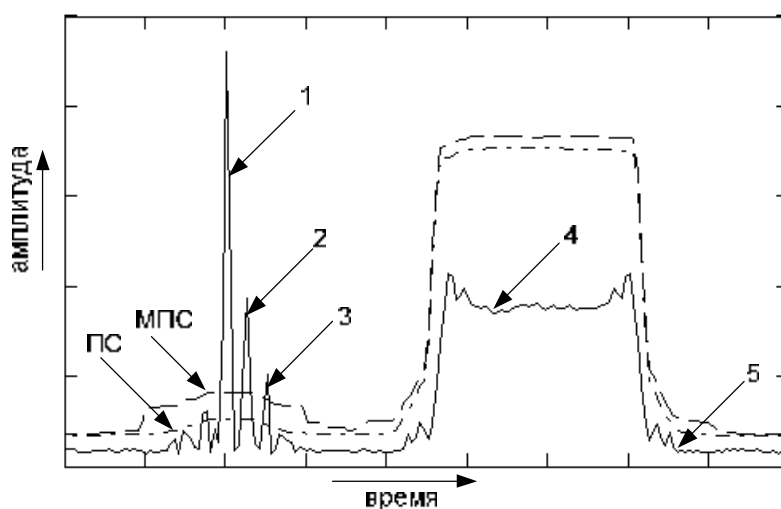


Рис. 1. Вид тестовой сигнально-помеховой ситуации (сплошная линия) и пороги, соответствующие методам ПС (штрихпунктирная линия) и МПС (штриховая линия). 1,2,3 - главные пики трех полезных сигналов, 4 - нестационарная помеха, 5 - собственный шум.

Раздел 4.3 содержит краткие выводы по материалу четвертой главы.

В заключении приводятся основные результаты, полученные в диссертационной работе, и следующие из них теоретические и практические выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предложен новый метод синтеза оптимальных в байесовском смысле алгоритмов пространственной обработки радиолокационных сигналов на фоне гауссовской помехи с ковариационной матрицей неполного ранга. Метод основан на обобщённом обращении ковариационной матрицы. С помощью данного метода синтезированы оптимальные процедуры обнаружения сигналов и компенсации активных внешних помех.

2. Синтезирован одноканальный аналого-дискретный фильтр импульсных сигналов на фоне шума, имеющий минимальные средние потери в отношении сигнал/шум по сравнению с многоканальной схемой аналого-дискретной фильтрации. Применение такого фильтра позволяет существенно уменьшить аппаратные и вычислительные затраты при незначительном снижении эффективности обработки. Для одноканальных схем обработки он обеспечивает максимум среднего (по времени прихода сигнала) отношения сигнал/шум при произвольном шаге временной дискретизации. Передаточная характеристика полученного аналого-дискретного фильтра является обобщением известного выражения для коэффициента передачи оптимального аналогового фильтра.

3. Введена и обоснована эффективная и инвариантная к форме радиолокационного сигнала количественная мера его когерентности. При этом показатель степени когерентности сводится к величине энтропии распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы: чем меньше энтропия, тем сигнал когерентнее. Как показывают приведённые примеры, полученная мера позволяет адекватно оценивать степень когерентности произвольного радиолокационного сигнала и придаёт точный смысл таким понятиям как «частично когерентный», «полностью некогерентный» и т.п.

4. Предложен метод синтеза системы квазиоптимальной межпериодной временной обработки сигналов на фоне собственного шума и пассивных внешних помех, основанный на аппроксимации неизвестной обратной корреляционной матрицы мешающих сигналов матрицей-проектором на ортогональное пассивным помехам подпространство. Предложенный способ позволяет осуществлять синтез эффективной межпериодной обработки сигналов в условиях априорной неопределённости относительно формы спектра пассивных помех.

5. Предложен эффективный алгоритм адаптивного выбора уровня порога обнаружения, основанный на комбинированном использовании выборочных квантилей (порядковых статистик) процесса на выходе пространственно-временной обработки сигналов. Данный алгоритм позволяет учитывать априорные сведения о форме полезного сигнала и обеспечивать, тем самым, контроль над величиной порога в области сильных боковых лепестков

обнаруживаемых целей. При этом сохраняются такие достоинства метода порядковых статистик, как практически полная безынерционность порога в условиях скачкообразного изменения мощности помех, а также отсутствие эффекта маскировки слабых целей сильными.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Михеев, П.В. Многомерная гауссовская плотность вероятности в вырожденном случае и её применения / П.В. Михеев // Известия вузов. Радиофизика. – 2006. – Т. XLIX, №7. – С. 626-634.

2. Михеев, П.В. Метод оценки когерентных свойств радиолокационных сигналов / П.В. Михеев // Известия вузов. Радиофизика. – 2006. – Т. XLIX, № 1. – С. 82-87.

3. Михеев, П.В. Близкий к оптимальному способ доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов / П.В. Михеев, Е.С. Фитасов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия Радиофизика. – 2005. – Вып.1(3). – С. 67-72.

4. Михеев, П.В. Оптимальный дискретно-аналоговый фильтр для обнаружения сигнала на фоне белого гауссовского шума / П.В. Михеев // Вопросы радиоэлектроники. Серия РЛТ. – 1991. – Вып.1. – С. 69-81.

5. Михеев П.В. Способ различения полезных и мешающих радиолокационных сигналов на выходе первичной обработки. Патент РФ №2237262, зарегистрировано 27.09.2004.

6. Михеев П.В. Способ аналого-дискретной обработки радиолокационных импульсных сигналов. Патент РФ № 2291463, зарегистрировано 10.01.2007.

7. Михеев, П.В. Оптимальный по критерию отношения сигнал/шум аналого-дискретный фильтр / П.В. Михеев // Труды 11 международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2005. – Т. 1. – С. 20-28.

8. Михеев, П.В. Способ оценки степени когерентности сигналов / П.В. Михеев // Труды 11 международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2005. – Т. 1. – С. 29-35.

9. Михеев, П.В. Метод синтеза эффективной доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов / П.В. Михеев, Е.С. Фитасов // Труды 12 международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2006. – Т. 3. – С. 1675 – 1679.

10. Михеев, П.В. Метод формирования адаптивного порога обнаружения / П.В. Михеев, Е.С. Фитасов // Тезисы докладов международной выставки-конференции «Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления». – Нижний Новгород, 2002. – С.125.

11. Михеев, П.В. Метод формирования адаптивного порога обнаружения / П.В. Михеев, Е.С. Фитасов // Труды международной выставки-конференции «Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления». – Нижний Новгород, 2002. – С. 122-125.

12. Михеев, П.В. Метод формирования адаптивного порога обнаружения / В.В. Дмитриев, П.В. Михеев, А.Ю. Тутарев, Е.С. Фитасов // Тезисы докладов регионального молодёжного научно-технического форума. – Нижний Новгород, 2002. – С. 15.

13. Михеев, П.В. Метод межпериодной обработки радиолокационных сигналов / И.В. Душко., П.В. Михеев, Е.С. Фитасов, Д.Л. Захаров // Труды 10-ой научной конференции по радиофизике. – Нижний Новгород, 2005.

14. Михеев, П.В. К вопросу о цифровой обработке аналоговых сигналов / В.В. Дмитриев, П.В. Михеев, А.Г. Флакман // Труды 9-ой Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – Москва, 2007. – С. 111-114.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

Глава 1. Синтез оптимальных алгоритмов пространственной обработки сигналов на фоне гауссовской помехи с вырожденной ковариационной матрицей

1.1. Плотность вероятности гауссовского случайного вектора

1.2. Синтез оптимальной процедуры обнаружения сигнала, принимаемого антенной решёткой на фоне активных внешних помех

1.3. Синтез оптимального автокомпенсатора активных внешних помех

1.4. Заключение по первой главе

Глава 2. Синтез алгоритмов квазиоптимальной аналого-дискретной временной обработки одиночных импульсных сигналов на фоне шума

2.1. Передаточная характеристика аналого-дискретного фильтра, максимизирующего среднее по времени прихода сигнала выходное отношение сигнал-шум

2.2. Синтез аналого-дискретного фильтра для временной обработки фазоманипулированного сигнала на фоне шума

2.3. Заключение по второй главе

Глава 3. Проекционный метод синтеза системы квазиоптимальной межпериодной временной обработки когерентной пачки импульсов, принимаемой на фоне пассивных внешних помех и собственного шума

3.1. Количественная мера степени когерентности сигналов в виде энтропии распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы

3.2. Синтез весового вектора квазиоптимальной межпериодной фильтрации когерентной пачки импульсов

3.3. Заключение по третьей главе

Глава 4. Адаптивный выбор уровня порога обнаружения на основе оценки квантилей статистического распределения процесса на выходе системы пространственно-временной обработки сигналов

4.1. Порог обнаружения как один из основных элементов фильтрации полезных сигналов на фоне помех

4.2. Метод выбора порога обнаружения в виде функции от текущих значений основной и вспомогательной порядковых статистик, получаемых ранжированием элементов обучающей выборки

4.3. Заключение по четвертой главе

Заключение

Литература

Список использованных сокращений