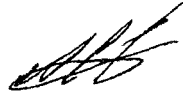


На правах рукописи



Светлов Алексей Юрьевич

**АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ
НА ФОНЕ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ
В КОГЕРЕНТНО-ИМПУЛЬСНЫХ РЛС**

Специальность 05.12.14 – «Радиолокация и радионавигация»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск

2008

СЛУЖБА ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА
Южно-Уральский государственный

Диссертация выполнена на кафедре «Естественные науки» филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Кыштыме.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Родионов Владимир Валентинович.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Карманов Юрий Трофимович,
- кандидат технических наук, доцент Нифонтов Юрий Александрович.

Ведущая организация (предприятие) – закрытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт по измерительной технике – радиотехнические комплексы» (ЗАО НИИИТ–РК), г. Челябинск.

Защита состоится в ауд. Р–217 «26» июля 2006 года, в 15-00, на заседании диссертационного совета КС 212.027.01 при ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет - УПИ».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, ученому секретарю диссертационного совета КС 212.027.01 Важнину В.Г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет - УПИ»

Автореферат разослан «17» апреля 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Важнин В.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Радиолокационные станции занимают особое положение в системах управления воздушным движением (УВД), поскольку являются основным источником информации для диспетчеров службы движения. За последнее десятилетие, в связи с увеличением числа авиарейсов, как гражданского, так и военного назначения, наметился рост числа авиакатастроф и внештатных ситуаций. Это объясняется тем, что большинство функционирующих систем УВД разработаны в 70–80-е гг. прошлого века и не отвечают повышенным требованиям по обеспечению безопасности полетов.

Таким образом, задача совершенствования систем УВД в целом и РЛС в частности является актуальной, что отмечается на конференциях, посвященных радиолокационной тематике. С необходимостью решения данной задачи столкнулись и специалисты ОАО Челябинский радиозавод «Полет» при модернизации РЛС «Экран-85».

Общим при работе РЛС систем УВД является воздействие пассивных помех, представляющих собой отражения от подстилающей поверхности, гидрометеоров и местных предметов. Пассивные помехи, поступая на вход приемника РЛС вместе с отражениями от полезных радиолокационных целей, затрудняют их обнаружение и сопровождение.

Обнаружение радиолокационных целей на фоне пассивных помех различной природы является одной из важнейших задач для широкого класса импульсных РЛС систем УВД.

Условно, алгоритмы обнаружения радиолокационных целей на фоне пассивных помех можно классифицировать по эффективности и вычислительным затратам, связанных с практической реализацией алгоритмов обнаружения.

Часто, приходится идти на компромисс, выбирая алгоритм обнаружения, работу которого можно обеспечить на имеющейся элементной базе в режиме реального времени. Так, в РЛС «Экран-85», серийно выпускаемой несколько лет, был реализован алгоритм обнаружения с череспериодной компенсацией (ЧПК), эффективность которого, как показано в [Л1], является невысокой по сравнению с другими алгоритмами обнаружения. Но, на элементной базе момента времени выпуска данной РЛС, из всех алгоритмов обнаружения, практическая реализация которых была возможна, алгоритм обнаружения с ЧПК обладал приемлимой эффективностью.

В многочисленных публикациях, посвященных проблеме обнаружения радиолокационных целей на фоне пассивных помех, отмечается необходимость применения в РЛС алгоритмов обнаружения, адаптивных к пассивным помехам.

В связи с прогрессом в области цифровой обработки сигналов представляется возможным реализация на современной элементной базе адаптивных алгоритмов обнаружения радиолокационных целей на фоне пассивных помех, эффективность которых будет сравнима с эффективностью теоретически оптимальных алгоритмов обнаружения, что позволит улучшить помехоустойчивость РЛС и повысить безопасность полетов.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является обнаружение радиолокационных целей на фоне пассивных помех, предметом исследования являются соответствующие адаптивные алгоритмы обнаружения.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка адаптивных алгоритмов обнаружения радиолокационных целей на фоне пассивных помех в когерентно-импульсных РЛС.

Направления исследования. В соответствии с поставленной целью выбраны следующие направления исследования.

1. Выбор и обоснование математических моделей сигнала и пассивной помехи.
2. Синтез алгоритма обнаружения в соответствии с выбранными моделями сигнала и помехи.
3. Анализ синтезированного алгоритма обнаружения с точки зрения уменьшения вычислительных затрат.
4. Сравнительный анализ помехоустойчивости синтезированного и существующих алгоритмов обнаружения.
5. Анализ методов адаптации к корреляционным свойствам помехи.
6. Анализ корреляционных свойств пассивных помех на основе реальных радиолокационных данных.
7. Разработка адаптивных алгоритмов обнаружения.
8. Экспериментальные исследования адаптивных алгоритмов обнаружения.

Методы исследований, достоверность и обоснованность результатов.

Для выполнения поставленных задач использовались методы статистической теории обнаружения и оценки параметров сигналов, теории матриц, теории вероятностей и математической статистики. Результаты, полученные теоретически, подтверждены в ходе экспериментальных исследований, которые проводились методом имитационного и натурного моделирования на ЭВМ.

Научная новизна исследования состоит в следующем.

1. Предложена модель радиолокационной обстановки для решения задачи обнаружения когерентного сигнала с неизвестной доплеровской частотой на фоне пассивной помехи.
2. Получены новые алгоритмы обнаружения радиолокационной цели на фоне пассивной помехи. Отличительной особенностью алгоритмов обнаружения является применение разложения корреляционной матрицы помехи по системе собственных векторов.
3. Предложены алгоритмы адаптации к помехе с учетом специфики когерентно-импульсных РЛС, для которых коэффициент межпериодной корреляции пассивных помех близок к единице.
4. Предложена методика анализа алгоритмов обнаружения на основе расчета их рабочих скоростных характеристик.

Практическую ценность представляют следующие результаты работы.

1. Разработаны адаптивные алгоритмы обнаружения, обладающие высокой эффективностью и, одновременно, преимуществом в отношении

вычислительных затрат по сравнению с известными адаптивными алгоритмами обнаружения.

2. Разработано программное обеспечение для расчета рабочих скоростных характеристик алгоритмов обнаружения, с помощью которого исследована помехоустойчивость алгоритмов обнаружения и выбраны параметры алгоритмов обнаружения.
3. Разработано программное обеспечение для экспериментального исследования адаптивных алгоритмов обнаружения на ЭВМ.

Реализация результатов работы.

1. Разработанный адаптивный алгоритм обнаружения с рекомендованными значениями параметров используется в составе РЛС АОРЛ-1АС, выпускаемой ОАО Челябинский радиозавод «Полет».
2. Методика расчета и программное обеспечение для расчета рабочих скоростных характеристик алгоритмов обнаружения используются в ОКБ ОАО Челябинский радиозавод «Полет» в целях анализа помехоустойчивости алгоритмов обнаружения и их модификаций.
3. Программное обеспечение для экспериментального исследования разработанных алгоритмов обнаружения используется в ОКБ ОАО Челябинский радиозавод «Полет» для обоснования выбора параметров алгоритмов обнаружения.

Реализация результатов работы подтверждается соответствующим актом внедрения.

Результаты и положения, выносимые на защиту.

Проведенные исследования позволили теоретически обосновать и практически реализовать основные положения и результаты, полученные автором и выносимые на защиту.

1. Алгоритмы обнаружения радиолокационной цели на фоне пассивной помехи.
2. Результаты сравнительного анализа помехоустойчивости разработанных и существующих алгоритмов обнаружения.
3. Результаты анализа помехоустойчивости рекомендуемого к практической реализации алгоритма обнаружения.
4. Адаптивные алгоритмы обнаружения радиолокационной цели на фоне пассивной помехи.
5. Результаты имитационного и натурного моделирования адаптивных алгоритмов обнаружения.

Апробация работы. Основные результаты и положения работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- международной конференции по системам локации и навигации, г. Харьков, Украина, сентябрь 2005 г.;
- 11-й международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, апрель 2005 г.;
- 13-й международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», г. Рязань, декабрь 2004 г.;

- международной научно-практической конференции «Связь-пром 2004», г. Екатеринбург, май 2004 г.;
- IEEE-Сибирской конференции по управлению и связи, г. Томск, октябрь 2003 г.;
- 9-й международной научной конференции «Теория и техника передачи, приема и обработки информации», г. Туапсе, октябрь 2003 г.;
- 9-й международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, апрель 2003 г.;
- межотраслевой научно-технической конференции, г. Озерск, май 2002 г.;
- ежегодных научно-технических конференциях ЮУрГУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 7 статей в сборниках научных трудов международных конференций, 2 статьи в сборниках докладов конференций ЮУрГУ, 1 статья в сборнике научных трудов межвузовской конференции и 1 тезисы доклада межотраслевой конференции.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения; содержит 173 страницы текста, включающего 115 рисунков, 4 таблицы и библиографический список использованной литературы из 72 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении описана актуальность представленной диссертации; рассмотрена проблема обнаружения радиолокационного сигнала с неизвестной доплеровской частотой на фоне пассивных помех в когерентных РЛС; приведен обзор существующих методов решения данной проблемы, указаны их достоинства и недостатки; сформулированы объект, предмет исследования и цель работы; поставлены задачи для достижения цели; кратко изложено содержание диссертации; отмечены научная новизна полученных результатов, их теоретическая значимость и практическая ценность; представлены данные по реализации результатов работы и апробации работы; сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе получены алгоритмы обнаружения радиолокационной цели на фоне пассивной помехи.

Обоснован выбор моделей полезного сигнала и пассивной помехи. Отмечается, что в когерентно-импульсных РЛС отраженный от цели сигнал во многих случаях может быть представлен когерентным сигналом (медленно флюктуирующим комплексным гауссовским процессом), а помеха – комплексным гауссовским процессом с нулевым средним. Если известна полная априорная информация о сигнале и помехе, то синтез оптимального алгоритма обнаружения когерентного сигнала на фоне пассивной гауссовской помехи не вызывает затруднений, и алгоритм обнаружения, в соответствии с [Л2], может иметь вид

$$\left| \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} k_{ij} x_i s_j^* \right|^2 \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} > C, \quad (1)$$

где N – число обрабатываемых импульсов, $x_i = \int_0^T x(t) s_0^*(t - t_i) dt$; $x(t)$ – сигнал на входе радиолокационного приемника; $s_0(t)$ – радиоимпульс, $s_j = \exp(j2\pi f t_j)$ – компоненты опорного сигнала; f – доплеровское смещение частоты отраженного сигнала, k_{ij} – элементы матрицы K_1 , обратной корреляционной матрице межпериодных флюктуаций помехи K , * – знак комплексного сопряжения, t_i – моменты появления импульсов.

На практике априори неизвестны доплеровская частота отраженного сигнала f и корреляционная матрица межпериодных флюктуаций помехи K , что делает невозможным синтез оптимального алгоритма обнаружения.

Показано, что в случае применения адаптивного байесовского подхода для синтеза алгоритма обнаружения в условиях указанной априорной неопределенности, учет в модели сигнала неизвестной доплеровской частоты отраженного сигнала f приводит к необходимости вычисления ее оценки при практической реализации синтезированного алгоритма обнаружения и, соответственно, общему усложнению адаптивного алгоритма обнаружения.

В целях уменьшения вычислительных затрат, связанных с реализацией алгоритма обнаружения на практике, предложено отказаться от учета в модели сигнала неизвестной доплеровской частоты отраженного сигнала f , выбрав модель некогерентного сигнала при синтезе алгоритма обнаружения.

Модель принимаемого некогерентного сигнала имеет вид

$$s(t) = \sqrt{E_s} \sum_{i=0}^{N-1} \xi_i a_i s_0(t - t_i), \quad t \in [0, T], \quad (2)$$

где ξ_i – независимые комплексные гауссовские случайные величины с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией; T – длительность сигнала; t_i – моменты появления импульсов; $E_s a_i^2$ – средняя энергия i -го импульса, N – число обрабатываемых импульсов, $s_0(t)$ – форма радиоимпульса с единичной энергией; a_i – коэффициенты, учитывающие различную энергию импульсов в пачке.

Модель помехи представляет собой аддитивную смесь пассивной помехи и белого гауссовского шума:

$$y(t) = \sqrt{E_c} \sum_{i=0}^{N-1} \eta_i a_i s_0(t - t_i) + n(t), \quad t \in [0, T], \quad (3)$$

где η_i – комплексные гауссовские случайные величины с нулевым математическим ожиданием и нормированной корреляционной матрицей межпериодных флюктуаций пассивной помехи \mathbf{R} ($\mathbf{R} = \|\eta_i \eta_j^*\|$, $r_{ij} = M\{\eta_i \eta_j^*\}$, $r_{ii} = 1$); $E_c a_i^2$ –

средняя энергия i -го импульса пассивной помехи; $n(t)$ – белый гауссовский шум со спектральной плотностью мощности $N_0/2$; * – знак комплексного сопряжения.

Последовательность импульсов считается неперекрывающимися, т.е. выполняется следующее условие: $s_0(t-t_i) \cdot s_0(t-t_j) = 0$ при $i \neq j$.

Особенностью выбранных моделей является то, что в отличие от моделей, предлагаемых ранее [2–4, 8–9, 11], в модели сигнала (1) и помехи (2) включены коэффициенты a_i , учитывающие различную энергию импульсов в пачке, которая обусловлена модуляцией сигнала диаграммой направленности антенны (ДНА).

В соответствии с теорией обнаружения сигналов, решена задача синтеза алгоритма обнаружения радиолокационного сигнала (2) на фоне пассивной помехи (3). Синтезированный алгоритм обнаружения имеет вид

$$\frac{H_1}{H_0} > C, \quad (4)$$

$$\sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{(E_s + \lambda_k) \lambda_k} \left| \sum_{j=0}^{N-1} \frac{x_j}{a_j} \psi_{kj}^* \right|^2$$

где $x_j = \int_0^T x(t) s_0^*(t-t_j) dt$, $x(t)$ – сигнал на входе радиолокационного приемника; λ_k и

$\vec{\psi}_k$ – собственные числа и собственные вектора матрицы B с элементами $b_{ij} = k_{ij}/(a_i a_j)$, k_{ij} – элементы корреляционной матрицы межпериодных флюктуаций помехи K : $k_{ij} = E_c a_i a_j r_{ij} + N_0 \delta_{ij}/2$, δ_{ij} – символ Кронекера.

Структурная схема алгоритма обнаружения (4) может иметь вид, изображенный на рис. 1.

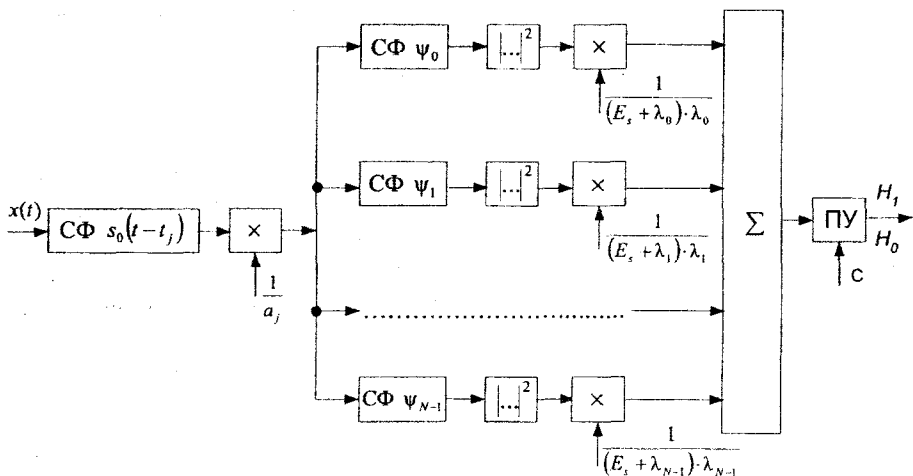


Рис. 1. Структурная схема алгоритма обнаружения (4): СФ – согласованный фильтр, ПУ – пороговое устройство

Отмечается, что отсчет x_j может быть получен на выходе фильтра, согласованного с сигналом $s_0(t)$, а операция под знаком модуля выполнена при помощи фильтра, согласованного с собственным вектором $\vec{\psi}_k$.

Синтезированный алгоритм обнаружения, в общем случае, многоканальный. Показано, что многоканальность алгоритма обнаружения обусловлена коррелированностью помехи, а число каналов межпериодной обработки радиолокационного сигнала и порядок фильтров каждого канала определяется числом обрабатываемых импульсов N .

В результате анализа синтезированного алгоритма обнаружения для различных отношений сигнал/помеха получены алгоритмы обнаружения с меньшими вычислительными затратами. Показано, что при сильном сигнале относительно помехи ($E_s/\lambda_k \gg 1$) алгоритм обнаружения (4) приводится к виду

$$\sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{\lambda_k} \left| \sum_{j=0}^{N-1} \frac{x_j}{a_j} \psi_{kj} \right|^2 \begin{matrix} H_1 \\ > C, \\ H_0 \end{matrix} \quad (5)$$

а при слабом сигнале относительно помехи ($E_s/\lambda_k \ll 1$) алгоритм обнаружения (4) можно привести к виду

$$\sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{\lambda_k^2} \left| \sum_{j=0}^{N-1} \frac{x_j}{a_j} \psi_{kj} \right|^2 \begin{matrix} H_1 \\ > C. \\ H_0 \end{matrix} \quad (6)$$

Отмечается, что если все импульсы в пачке имеют одинаковую энергию (т.е. $a_k = \text{const}, k = 0, N-1$), то алгоритмы обнаружения (5), (6) могут быть приведены к разработанным ранее алгоритмам для обнаружения когерентного сигнала с неизвестной доплеровской частотой на фоне пассивной помехи [9].

Во второй главе проведен сравнительный анализ помехоустойчивости алгоритмов обнаружения (4)–(6) и известных алгоритмов обнаружения, описанных в литературе [Л3, Л4], в том числе оптимального алгоритма обнаружения когерентного сигнала на фоне пассивной гауссовской помехи (1) и алгоритма обнаружения с ЧПК, представленного в [Л5]; выбран алгоритм обнаружения для дальнейшего детального исследования.

Сравнительный анализ помехоустойчивости алгоритмов обнаружения выполнен для модели помехи (3) и когерентного сигнала, отраженного от движущейся точечной цели (модель Сверлинга №1):

$$s(t, f) = \sqrt{E_s} \xi \sum_{i=0}^{N-1} b_i s_0(t - t_i) \exp(j2\pi f t_i), \quad t \in [0, T], \quad (7)$$

где T – длительность сигнала; t_i – моменты появления импульсов; ξ – комплексная гауссовская случайная величина с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией; $E_s b_i^2$ – средняя энергия i -го импульса; $s_0(t)$ – форма импульса с единичной энергией; N – число обрабатываемых

импульсов; f – доплеровское смещение частоты отраженного сигнала, b_i – коэффициенты, учитывающие различную энергию обрабатываемых импульсов.

Отмечается, что рабочие характеристики алгоритмов обнаружения зависят от доплеровского смещения частоты отраженного сигнала f , но не все алгоритмы обнаружения его учитывают. В связи с этим, помехоустойчивость алгоритма обнаружения рассматривается для различных доплеровских скоростей цели с помощью рабочей характеристики, представляющей собой зависимость вероятности правильного обнаружения (P_d) цели от скорости (V) цели при прочих фиксированных параметрах. Эта характеристика названа *рабочей скоростной характеристикой (РСХ)* алгоритма обнаружения.

Сравнительный анализ помехоустойчивости алгоритмов обнаружения выполнен в равных условиях с помощью расчета их РСХ при ограничениях на значения коэффициентов: $a_i = b_i = \text{const}$, $i = \overline{0, N-1}$.

РСХ алгоритмов обнаружения (4)–(6) рассчитаны с помощью метода характеристических функций с учетом того, что характеристическая функция суммы квадратов модулей комплексных гауссовских величин ($Y = \sum_{i=0}^{N-1} |v_i|^2$) с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей L имеет вид

$$\Theta_Y(j\omega) = \prod_{i=0}^{N-1} (1 - j2\omega\chi_i)^{-1},$$

где χ_i – собственные значения корреляционной матрицы L , а величина v_i для алгоритмов обнаружения (4), (5) и (6) соответственно равна:

$$v_i = \frac{1}{\sqrt{(E_s + \lambda_i)\lambda_i}} \sum_{j=0}^{N-1} \Psi_{ij}^* x_j, \quad v_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} \sum_{j=0}^{N-1} \Psi_{ij}^* x_j \quad \text{и} \quad v_i = \frac{1}{\lambda_i} \sum_{j=0}^{N-1} \Psi_{ij}^* x_j.$$

Получено, что для алгоритмов обнаружения (4), (5) и (6) элементы корреляционной матрицы L по гипотезе H_0 соответственно равны: $l_{ik} = \frac{1}{E_s + \lambda_i} \delta_{ik}$,

$l_{ik} = \delta_{ik}$ и $l_{ik} = \frac{1}{\lambda_i} \delta_{ik}$. По гипотезе H_1 элементы корреляционной матрицы L равны:

$$\text{для алгоритма (4)} - l_{ik} = \frac{1}{E_s + \lambda_i} \delta_{ik} + E_s s_i s_k^*, \quad \text{где} \quad s_i = \frac{1}{\sqrt{(E_s + \lambda_i)\lambda_i}} \sum_{k=0}^{N-1} \Psi_{ki} \exp(j2\pi f t_k);$$

$$\text{для алгоритма (5)} - l_{ik} = \delta_{ik} + E_s s_i s_k^*, \quad \text{где} \quad s_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} \sum_{k=0}^{N-1} \Psi_{ki} \exp(j2\pi f t_k);$$

$$\text{для алгоритма (6)} - l_{ik} = \frac{1}{\lambda_i} \delta_{ik} + E_s s_i s_k^*, \quad \text{где} \quad s_i = \frac{1}{\lambda_i} \sum_{k=0}^{N-1} \Psi_{ki} \exp(j2\pi f t_k).$$

РСХ остальных алгоритмов обнаружения, в соответствии с [Л1], были рассчитаны по формуле $P_D(f) = (P_F)^{1+d^2(f)}$, где $d^2(f)$ – отношение сигнал/помеха на выходе линейной части алгоритмов обнаружения, P_F – вероятность ложной тревоги.

Получено, что величина $d^2(f)$ для оптимального алгоритма обнаружения когерентного сигнала на фоне пассивной гауссовской помехи

$$d^2(f) = E_s \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} k_{ij} \exp(j2\pi f(t_i - t_j)), \text{ для алгоритмов обнаружения, приведенных в [Л3]}$$

и в [Л4], соответственно равна:

$$d^2(f) = \frac{E_s \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \psi_i \psi_j^* \exp(j2\pi f(t_i - t_j))}{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} k_{ij} \psi_i \psi_j^*} \quad \text{и} \quad d^2(f) = \frac{E_s \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} k_{i_0} k_{j_0}^* \exp(j2\pi f(t_i - t_j))}{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} k_{ij} k_{i_0} k_{j_0}^*}, \text{ а для}$$

$$\text{алгоритма обнаружения с ЧПК} - d^2(f) = \frac{E_s \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (-1)^{i+j} c_{N-1}^i c_{N-1}^{j*} \exp(j2\pi f(t_i - t_j))}{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (-1)^{i+j} c_{N-1}^i c_{N-1}^{j*} k_{ij}}.$$

Здесь приняты обозначения: k_{ij} – элементы матрицы, обратной корреляционной матрице межпериодных флюктуаций помехи \mathbf{K} ; ψ_i – элементы собственного вектора матрицы \mathbf{K} , который соответствует минимальному собственному числу; c_N^j – число сочетаний из N по j .

Расчет РСХ алгоритмов обнаружения, изображенных на рис. 2, выполнен для РЛС с вобуляцией периодов повторения зондирующих импульсов при постоянных и варьируемых параметрах.

Постоянными являются следующие параметры.

Длина волны зондирующего сигнала (λ), равная 0,24 м.

Периоды повторения зондирующих импульсов: 1,808, 2,196, 2,786 мс.

Вероятность ложной тревоги (P_F), равная 0,01.

Отношение сигнал/шум по одному импульсу (d_{in}^2), равное 10 дБ.

Число обрабатываемых импульсов (N), равное 10.

Для расчетов выбрана гауссовская корреляционная функция межпериодных флюктуаций помехи $R(t, u) = \exp\left(-\frac{(\pi \cdot \Delta f)^2}{\ln(2)}(t-u)^2\right) \cdot \exp(j2\pi f_c(t-u))$, где Δf – ширина спектра межпериодных флюктуаций помехи, f_c – доплеровское смещение частоты пассивной помехи. В соответствии с [Л6], $\Delta f = \frac{2\sigma_v}{\lambda}$, где σ_v – среднее квадратическое отклонение флюктуаций скорости помехи.

Ширина спектра (Δf) межпериодных флюктуаций помехи равна 11,66 Гц, что, согласно [Л6], соответствует отражениям от дождевых туч.

При расчете РСХ алгоритмов обнаружения варьировалось отношение помеха/сигнал (d_{in}^2).

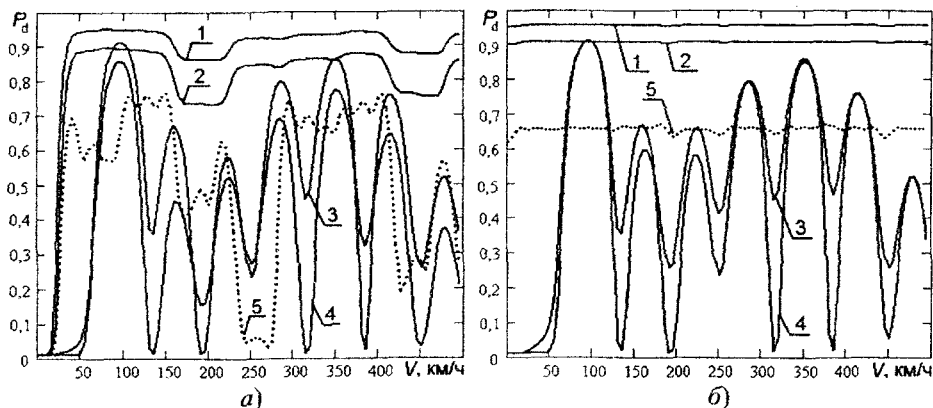


Рис. 2. Рабочие скоростные характеристики алгоритмов обнаружения:
 $a - d_s^2 = 30$ дБ; $b - d_s^2 = -30$ дБ

Кривая 1 рис. 2 соответствует РСХ оптимального алгоритма обнаружения когерентного сигнала (1), кривая 2 – алгоритму обнаружения (5), кривая 3 – алгоритму обнаружения, приведенному в [Л3], кривая 4 – алгоритму обнаружения с ЧПК, кривая 5 – алгоритму обнаружения, приведенному в [Л4].

Результаты расчетов РСХ показывают, что характер кривых РСХ алгоритмов обнаружения (1), (4)–(6) одинаковый, что позволяет определить величину проигрыша в энергии сигнала алгоритмов обнаружения друг другу путем подбора отношений сигнал/шум и помеха/сигнал до совпадения РСХ сравнимых алгоритмов обнаружения.

По результатам проведенных расчетов, потери в энергии сигнала алгоритма обнаружения (4), (6) и алгоритма обнаружения (5) по сравнению с оптимальным алгоритмом обнаружения когерентного сигнала (1) при числе обрабатываемых импульсов N , равном 10, составляют соответственно 2,5 дБ, 2,5 дБ и 3,2 дБ при слабом сигнале относительно помехи (рис. 2, а), и 3,2 дБ для алгоритмов обнаружения (4)–(6) при сильном сигнале относительно помехи (рис. 2, б).

Отмечено, что РСХ алгоритмов обнаружения, приведенных в [Л3, Л4], и типа ЧПК одинаково хуже, чем РСХ разработанных алгоритмов обнаружения (4)–(6).

Для детального исследования выбран алгоритм обнаружения (5), который является базовым по отношению к разработанным адаптивным алгоритмам.

Рассмотрено влияние на помехоустойчивость алгоритма обнаружения несоответствия реальной сигнально-помеховой обстановки и выбранной для синтеза модели этой обстановки. Анализ помехоустойчивости алгоритма обнаружения для указанной ситуации позволил сделать следующие выводы.

1. На практике можно отказаться от учета различной энергии обрабатываемых импульсов, что упрощает реализацию алгоритма обнаружения, выбрав при синтезе алгоритма обнаружения прямоугольную модель ДНА РЛС. Рассчитано, что при обработке полученным таким образом алгоритмом обнаружения, потери в

энергии сигнала для ширины ДНА, равной 2° , модели ДНА $\sin x/x$, и числа обрабатываемых импульсов N , равном 10, не превышают 0,9 дБ.

2. В силу существенных энергетических потерь необходима адаптация алгоритма обнаружения к доплеровскому смещению частоты пассивной помехи, что иллюстрирует рис. 3. Кривые 1–5 рис. 3 соответствуют реальной радиальной скорости помехи, равной 0–40 км/ч соответственно, тогда как алгоритм обнаружения синтезирован на помеху с нулевой радиальной скоростью (нулевым доплеровским смещением частоты). При расчете РСХ алгоритма обнаружения (5) выбраны значения: $N = 10$, $d_{\sigma}^2 = 30$ дБ; остальные данные соответствуют предыдущему расчету.

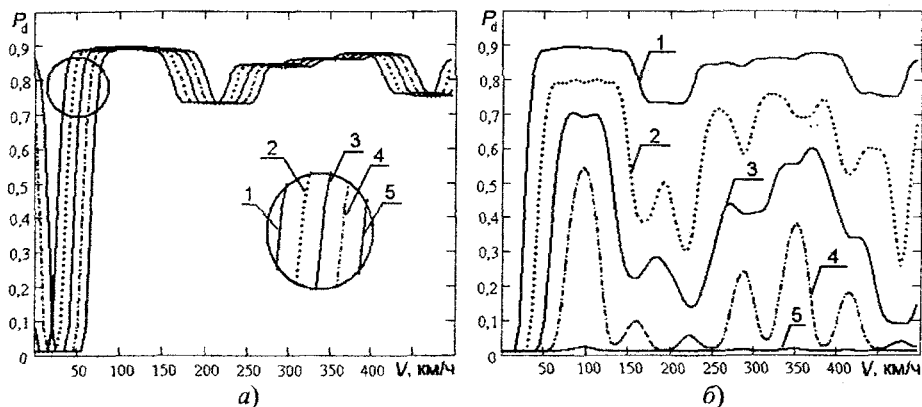


Рис. 3. Рабочие скоростные характеристики алгоритма обнаружения (5): а – с адаптацией к доплеровскому смещению частоты пассивной помехи; б – без адаптации к доплеровскому смещению частоты пассивной помехи

Проигрыш в энергии сигнала неадаптивного алгоритма обнаружения (5) адаптивному аналогу равен 17,5 дБ при отличии значения доплеровского смещения частоты помехи, поступающей на вход приемника, от значения, выбранного для синтеза алгоритма обнаружения, на 92,59 Гц, что соответствует радиальной скорости движения помехи 40 км/ч.

3. В силу незначительных потерь в энергии сигнала, не превышающих 0,1 дБ, при отклонении формы кривой корреляционной функции помехи от модели и условии высокой межпериодной корреляции, на практике можно не адаптироваться к форме кривой корреляционной функции, выбрав при синтезе алгоритма обнаружения любую, например, гауссовскую форму кривой.

4. В случае, если адаптация к ширине спектра межпериодных флюктуаций помехи Δf не производится, параметры алгоритма обнаружения – собственные вектора $\vec{\psi}_k$ можно выбрать заранее, рассчитав их на минимальное значение ширины спектра межпериодных флюктуаций помехи.

5. Собственные вектора $\vec{\psi}_k$ должны рассчитываться на действующие периоды повторения зондирующих импульсов, иначе наблюдаются значительные энергетические потери. Так, по результатам расчетов РСХ алгоритма обнаружения (5) для случая, когда собственные вектора $\vec{\psi}_k$ рассчитаны на периоды повторения: 1,808, 2,196, 2,786 мс, а используются периоды повторения: 2,196, 2,786, 1,808 мс, величина проигрыша в энергии сигнала при радиальной скорости цели, равной 100 км/ч, составляет 9,2 дБ.

Рассмотрено влияние числа каналов межпериодной обработки радиолокационного сигнала на помехоустойчивость алгоритма обнаружения. Показано, что уменьшить вычислительные затраты алгоритма обнаружения при сохранении его помехоустойчивости можно, варьируя число обрабатываемых импульсов и число каналов межпериодной обработки. Соответствующий алгоритм обнаружения имеет вид

$$\sum_{i=0}^{N-1} \frac{|x_i|^2}{|a_i|^2} - \sum_{k=0}^{M-1} \left(\frac{\lambda_k - \lambda_{\min}}{\lambda_k} \right) \left| \sum_{j=0}^{N-1} \psi_{kj} \cdot \frac{x_j}{a_j} \right|^2 \begin{matrix} > C, \\ < C, \end{matrix} \quad \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} \quad (8)$$

где M – число каналов межпериодной обработки.

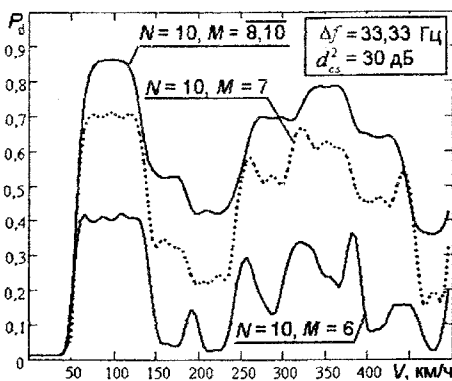


Рис. 4. РСХ алгоритма обнаружения (8)

По результатам расчетов, применение алгоритма обнаружения (8) позволяет экономить около 20 % вычислительных ресурсов по сравнению с алгоритмом обнаружения (5) при числе обрабатываемых импульсов N , равном 10 и числе каналов межпериодной обработки M , равном 8 (рис. 4).

На практике возможна ситуация, когда число импульсов N , обрабатываемых алгоритмом обнаружения, будет меньше числа импульсов в пакете H , определяемого шириной ДНА РЛС.

В этом случае, величины η_m , представляющие собой предпороговую статистику алгоритма обнаружения, можно некогерентно накапливать по длине пакки, а результат накопления подать на компаратор. При обработки пакки из 13 импульсов алгоритмом обнаружения с числом обрабатываемых импульсов N , равным 3 (рис. 5), алгоритм обнаружения с

$$\sum_{m=0}^9 \eta_m \begin{matrix} > C, \\ < C, \end{matrix} \quad \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix}$$

Поскольку величины η_m являются коррелированными, для некогерентного накопления можно брать не все отсчеты, а, например, только каждый F -й отсчет: $\eta_0, \eta_F, \eta_{2F}, \dots$. Данная операция известна под названием децимации сигнала, где F – коэффициент децимации.

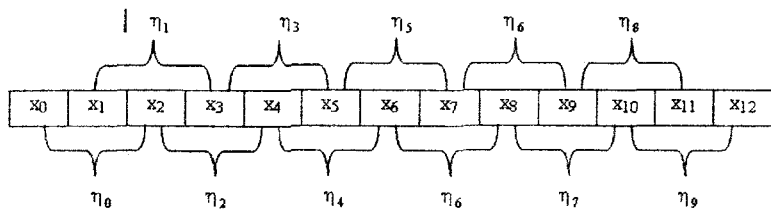


Рис. 5. Обработка радиолокационного сигнала с некогерентным накоплением

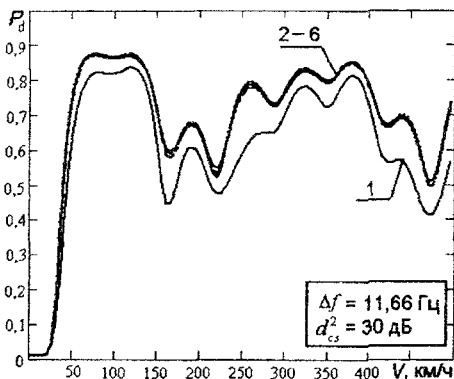


Рис. 6. РСХ алгоритма обнаружения (5) с некогерентным накоплением

В результате исследования помехоустойчивости алгоритма обнаружения (5) с некогерентным накоплением сделаны выводы.

1. Предлагаемое некогерентное накопление результатов межпериодной обработки радиолокационного сигнала улучшает помехоустойчивость алгоритма обнаружения (см. рис. 6). Кривая 1 рис. 6 представляет РСХ алгоритма обнаружения (5), число обрабатываемых импульсов N равно 5.

Кривые 2 – 6 рис. 6 представляют РСХ алгоритма обнаружения (5) при обработке пачки из двадцати

импульсов, числе обрабатываемых импульсов N , равном 5, и варьировании коэффициента децимации F от 1 до 5. Выигрыш в энергии сигнала при некогерентном накоплении результатов межпериодной обработки в этом случае достигает 3,2 дБ при коэффициенте децимации F , принимающим значения 1 ÷ 5.

2. На практике достаточно накапливать результаты межпериодной обработки при значении коэффициента децимации F , равного числу обрабатываемых импульсов N , что приведет к экономии вычислительных ресурсов. Так, при обработке пачки из 13 импульсов (рис. 5), рассмотренный ранее алгоритм

$$\begin{aligned} & \text{обнаружения с некогерентным накоплением приобретает вид } \begin{matrix} H_1 \\ > \\ < \\ H_0 \end{matrix} C. \end{aligned}$$

В третьей главе предложена адаптация полученных ранее алгоритмов обнаружения к пассивной помехе.

Рассмотрены существующие методы адаптации к корреляционным свойствам пассивных помех в случае наличия и отсутствия априорной информации о специфике корреляционной матрицы межпериодных флюктуаций помехи K . Получено, что меньшие вычислительные затраты соответствуют адаптивным алгоритмам обнаружения, реализуемых с помощью методов решетчатой фильтрации, описанных в [Л7].

Показано, что в случае наличия априорной информации о специфике корреляционной матрицы помехи K , в частности, теплицевости, вычислительные затраты алгоритмов обнаружения можно существенно уменьшить. Отмечается, что теплицевость корреляционной матрицы соответствует регулярной посылке зондирующих импульсов, которой стремятся избежать на практике из-за появления эффекта «слепых» скоростей и, соответственно, ухудшения помехоустойчивости РЛС.

На основе анализа реальных радиолокационных данных установлено, что в случае высокой межпериодной корреляции, характерной для РЛС ДМВ диапазона, вид собственных векторов $\vec{\psi}_k$ слабо зависит от тонкой структуры корреляционной матрицы межпериодных флюктуаций помехи K (рис. 7) и может быть определен заранее. Последнее является искомой априорной информацией о специфике корреляционной матрицы межпериодных флюктуаций помехи K .

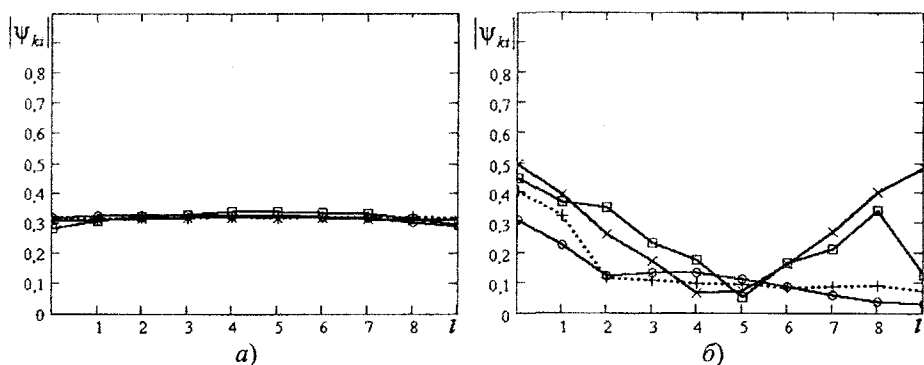


Рис. 7. Собственные вектора $\vec{\psi}_k$ корреляционной матрицы помехи K :
 $a - k = 0$; $b - k = -1$

На рис. 7 символами * на кривых обозначены значения собственных векторов корреляционной матрицы помехи K , рассчитанной теоретически, а символами \odot , + и \boxplus — значения собственных векторов экспериментальной корреляционной матрицы помехи, где источником помех являются горы, местные предметы и облака соответственно.

В результате аппроксимаций формы кривой экспериментальной корреляционной функции помехи гауссовской функцией и функцией вида $\sin x/x$ установлено, что при условии высокой межпериодной корреляции собственные

вектора могут рассчитываться на произвольную форму кривой корреляционной функции помехи.

Предложен алгоритм адаптации к классу помех, который допускает следующее представление корреляционной матрицы помехи K :

$$k_{ij} = \sum_{k=0}^{N-1} \lambda_k \psi_{kj} \psi_{ki} g_i g_j^* \quad (9)$$

где $g_i = \exp(j2\pi f_c t_i)$ – множители поворота; система ортонормированных векторов $\vec{\psi}_k$ выбрана заранее, а параметры λ_k и f_c – собственные числа корреляционной матрицы помехи и доплеровское смещение частоты помехи могут варьироваться.

Показано, что адаптивный к классу помех (9) алгоритм обнаружения (5) без учета неодинаковой энергии обрабатываемых импульсов имеет вид

$$\frac{H_1}{H_0} \left| \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{\lambda_k} \left| \sum_{j=0}^{N-1} \psi_{kj} g_0 g_j^* x_j \right|^2 \right| > C, \quad (10)$$

где максимально правдоподобные оценки неизвестных параметров $g_0 g_j^*$ и λ_k могут быть вычислены на основе обучающей выборке помехи размером n :

$Y = (\vec{Y}_0, \vec{Y}_1, \dots, \vec{Y}_{n-1})$ по формулам:

$$g_0 g_j^* = \frac{\sum_{d=0}^{n-1} y_{0d} y_{jd}^*}{\left| \sum_{d=0}^{n-1} y_{0d} y_{jd}^* \right|}, \quad \lambda_k = \frac{1}{n} \sum_{d=0}^{n-1} \left| \sum_{i=0}^{N-1} y_{di} \psi_{ki} g_0 g_i^* \right|^2. \quad (11)$$

Также, приведены адаптивные к классу помех (9) различные варианты реализации алгоритма обнаружения (5).

Отмечается, что межпериодная обработка радиолокационного сигнала адаптивных алгоритмов обнаружения, основанных на алгоритме обнаружения (5), является многоканальной, что позволяет перейти к параллельной межпериодной обработке и уменьшить время вычислений в число, равное числу каналов межпериодной обработки M .

В четвертой главе рассмотрено имитационное моделирование алгоритмов обнаружения с помощью разработанного программного комплекса [6]. Методом Монте-Карло генерировались исходные тестовые данные, соответствующие модели помехи (3) и сигнала (7).

Моделирование проводилось следующим образом: предпороговая статистика моделируемых алгоритмов обнаружения, полученная в результате серий опытов по гипотезам H_0 и H_1 , запоминалась. По реализациям предпороговой статистики, полученным по гипотезе H_0 , устанавливался порог C , обеспечивающий заданную вероятность ложной тревоги P_F . Вероятность ложной тревоги P_F рассчитывалась как отношение числа реализаций предпороговой статистики, полученных по гипотезе H_0 и превысивших значение порога C , к общему числу реализаций предпороговой статистики по гипотезе H_0 .

Далее, рассчитывалась вероятность правильного обнаружения цели P_D как отношение числа реализаций предпороговой статистики, полученных по гипотезе H_1 и превысивших значение порога C , к общему числу реализаций предпороговой статистики по гипотезе H_1 .

Рассчитано число опытов, необходимое для получения достоверной РСХ алгоритма обнаружения. Согласно расчетам, чтобы доверительный интервал был меньше 0,01 для вероятности правильного обнаружения P_D , равной 0,9, необходимо проделать число независимых опытов, равное 10^5 , при этом доверительная вероятность равна 0,9.

С целью проверки адекватности предложенной имитационной модели выполнено моделирование неадаптивных алгоритмов обнаружения, рассмотренных во второй главе (рис. 8). На рис. 8 кривые соответствуют РСХ алгоритмов обнаружения, рассчитанным теоретически, а точками на кривых обозначены значения вероятности правильного обнаружения P_D , вычисленные по результатам имитационного моделирования. Кривая 1 рис. 8 соответствует РСХ оптимального алгоритма обнаружения когерентного сигнала (1), кривая 2 – алгоритму обнаружения (5), кривая 3 – алгоритму обнаружения, приведенному в [Л3], кривая 4 – алгоритму обнаружения с ЧПК, кривая 5 – алгоритму обнаружения, приведенному в [Л4].

При расчете РСХ алгоритмов обнаружения выбраны значения: $N = 10$, $d_s^2 = 30$ дБ, $\Delta f = 11,66$ Гц.

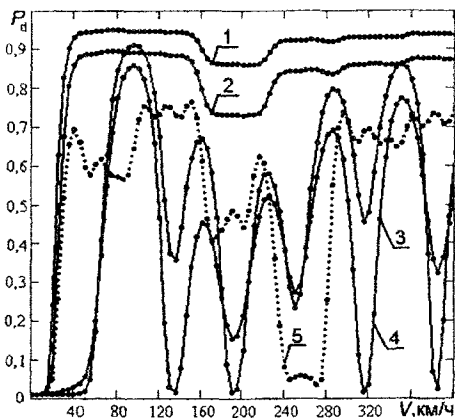


Рис. 8. РСХ алгоритмов обнаружения

Как видно на рис. 8, результаты теоретических расчетов РСХ алгоритмов обнаружения согласуются с РСХ алгоритмов обнаружения, полученными в результате имитационного моделирования, что указывает на достоверность выполненных теоретических расчетов, адекватность предложенной имитационной модели и проведенного имитационного моделирования.

С помощью имитационного моделирования проведен анализ адаптивного алгоритма обнаружения (10).

На рис. 9 изображены РСХ адаптивного алгоритма обнаружения (10), полученные по результатам имитационного моделирования при размере обучающей выборки n , равной 4, 14, 24 и 44 (кривые 5, 4, 3, и 2 соответственно). Кривая 1 рис. 9 соответствует РСХ алгоритма обнаружения (10), рассчитанной для случая известной априорной информации о сигнале и помехе. Исходные расчетные данные соответствуют предыдущему расчету.

Как видно на рис. 9, характер кривых (1) – (5) одинаковый, что позволяет определить эффективность адаптации путем расчета величины проигрыша в энергии сигнала (ΔL) от размера обучающей выборки помехи (n) способом, описанным ранее. Результат проведенных расчетов представлен на рис. 10.

Из рис. 10 следует, что на практике достаточно ограничиться размером обучающей выборки, равном 24, при этом проигрыш в энергии сигнала адаптивного алгоритма обнаружения в силу конечного объема выборки составит 1,5 дБ, а общий проигрыш оптимальному неадаптивному алгоритму обнаружения когерентного сигнала (1) на фоне пассивной гауссовской помехи – 4,7 дБ.

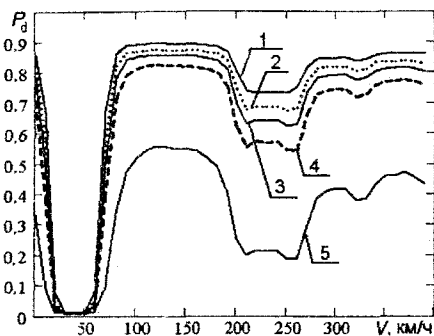


Рис. 9. РСХ алгоритма обнаружения (10)

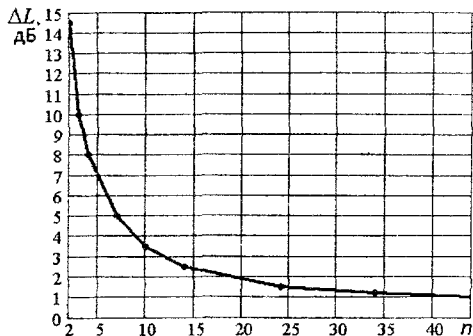


Рис. 10. Проигрыш в энергии сигнала алгоритма обнаружения (10) от размера обучающей выборки помехи

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований адаптивных алгоритмов обнаружения с помощью разработанного программного комплекса [6]. В отличие от имитационного моделирования, исходные данные представляли собой реальные радиолокационные данные РЛС АОРЛ-1АС, полученные с помощью устройства цифровой обработки сигналов [Л8].

В качестве источника пассивной помехи выступали облака с около нулевым доплеровским смещением частоты, наблюдаемые на фоне шумов. Для сопоставления результатов, полученных в результате эксперимента и результатов, полученных теоретически и по данным имитационного моделирования, было увеличено доплеровское смещение частоты помехи на 92,59 Гц, что соответствует радиальной скорости помехи 40 км/ч.

В качестве источника полезной цели выступали сигналы от воздушных судов, наблюдаемые на фоне шумов. По результатам вторичной обработки радиолокационной информации, радиальная скорость воздушных судов на трассе составляла 600 – 630 км/ч, что позволило изменить доплеровское смещение частоты сигнала на заданную величину для получения экспериментальной рабочей скоростной характеристики алгоритма обнаружения.

Наличие отдельных сигналов от полезных целей и помех позволило создать необходимую радиолокационную обстановку и провести эксперимент –

обнаружение сигнала на фоне пассивных помех адаптивным алгоритмом обнаружения (10) при размере обучающей выборки помехи n , равном 24. По результатам эксперимента построены РСХ алгоритма обнаружения (рис. 11).

Кривая 1 рис. 11 представляет РСХ алгоритма обнаружения, рассчитанную для случая известной априорной информации о сигнале и помехе, кривая 2 – РСХ алгоритма обнаружения, полученную с помощью имитационного моделирования, кривая 3 – экспериментальную РСХ алгоритма обнаружения и кривая 4 – экспериментальную РСХ оптимального алгоритма обнаружения некогерентного сигнала на фоне белого гауссовского шума.

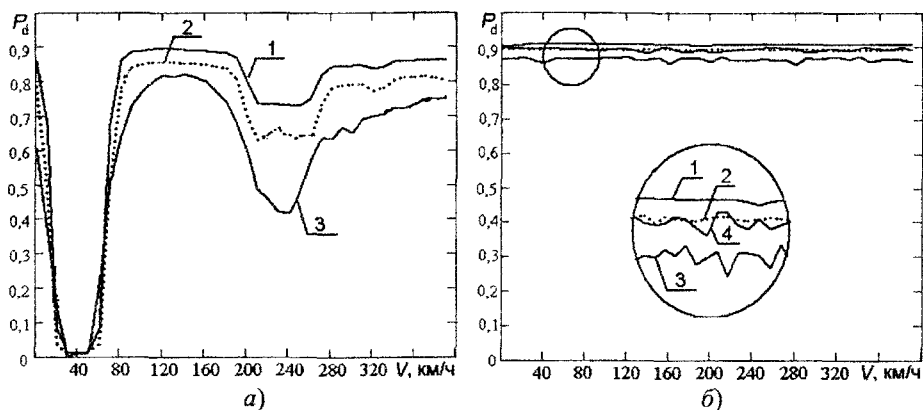


Рис. 11. Рабочие скоростные характеристики алгоритма обнаружения (10):
 $a - d_{\alpha}^2 = 30$ дБ; $b - d_{\alpha}^2 = -30$ дБ

В ходе экспериментальных исследований получены следующие выводы.

1. При сильном сигнале относительно помехи (рис. 11, б) адаптивный алгоритм обнаружения близок по эффективности к оптимальному алгоритму обнаружения некогерентного сигнала на фоне белого гауссовского шума.
2. Как при слабом сигнале относительно помехи (рис. 11, а), так и при сильном сигнале относительно помехи (рис. 11, б) экспериментальные РСХ адаптивного алгоритма обнаружения подтверждают результаты расчетов РСХ, выполненных теоретически и с помощью имитационного моделирования.

По результатам расчетов, при слабом сигнале относительно помехи (рис. 11, а) и радиальной скорости цели, равной 100 км/ч, проигрыш в энергии сигнала при имитационном моделировании адаптивного алгоритма обнаружения (кривая 2) неадаптивному алгоритму обнаружения (кривая 1) составляет 1,5 дБ, а проигрыш в энергии сигнала по результатам экспериментального исследования адаптивного алгоритма обнаружения (кривая 3) неадаптивному алгоритму обнаружения (кривая 1) составляет 2,3 дБ. Расхождение в 0,8 дБ между результатами имитационного моделирования и экспериментальных исследований алгоритма обнаружения (10) объясняется отличием реально действующей помехи от ее модели, выбранной при синтезе алгоритма обнаружения.

В Заключение сформулированы основные итоги работы.

1. Разработаны новые адаптивные алгоритмы обнаружения, предназначенные для решения актуальной задачи обнаружения радиолокационной цели на фоне пассивной помехи в условиях априорной неопределенности доплеровской частоты отраженного сигнала. Особенность алгоритмов обнаружения заключается в применении разложения корреляционной матрицы помехи по системе собственных векторов и учет специфики когерентно-импульсных РЛС ДМВ диапазона (высокой межпериодной корреляции пассивных помех).
2. Предложена методика анализа помехоустойчивости алгоритмов обнаружения с помощью расчета рабочих скоростных характеристик алгоритмов обнаружения; разработано соответствующее программное обеспечение.
3. Выполнен сравнительный анализ помехоустойчивости полученных и известных алгоритмов обнаружения. По результатам расчетов, разработанный базовый алгоритм обнаружения проигрывает в энергии сигнала оптимальному, но практически сложно реализуемому алгоритму обнаружения когерентного сигнала на фоне пассивной гауссовской помехи 2,0 дБ и 3,2 дБ при пяти и десяти обрабатываемых импульсах соответственно.
4. Исследованы разработанные алгоритмы обнаружения с точки зрения выбора значений их параметров для повышения помехоустойчивости РЛС и уменьшения вычислительных затрат.
5. Рассчитаны вычислительные затраты адаптивных алгоритмов обнаружения. По результатам расчетов, при вобуляции периодов повторения зондирующих импульсов, разработанные адаптивные алгоритмы обнаружения обладают меньшими вычислительными затратами по сравнению с известными адаптивными алгоритмами обнаружения. Свойство многоканальности межпериодной обработки радиолокационного сигнала разработанных алгоритмов обнаружения позволяет перейти к параллельной межпериодной обработке и уменьшить время вычислений в число, равное числу каналов межпериодной обработки.
6. Разработано программное обеспечение для имитационного моделирования и экспериментальных исследований адаптивных алгоритмов обнаружения.
7. Проведен анализ адаптивных алгоритмов обнаружения с помощью имитационного моделирования и экспериментальных исследований, результаты которого подтверждают выполненные теоретические расчеты, адекватность выбранной модели радиолокационной обстановки, проведенного моделирования и эксперимента.

Применение разработанных адаптивных алгоритмов обнаружения позволяет улучшить помехоустойчивость РЛС, и, как следствие, повысить безопасность полетов. По результатам полевых испытаний РЛС АОРС-1АС, при применении полученных адаптивных алгоритмов обнаружения, коэффициент подавления отражений от местных предметов на 24 дБ выше, чем при применении алгоритма обнаружения типа ЧПК-2, и составляет 48 дБ.

Разработанный адаптивный алгоритм обнаружения с рекомендованными значениями параметров используется в составе РЛС АОРЛ-1АС, выпускаемой ОАО Челябинский радиозавод «Полет».

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Родионов В.В. Синтез цифрового КИХ-фильтра для сигналов с нерегулярной дискретизацией по времени / В.В. Родионов, А.Ю. Светлов // Дни науки ОТИ МИФИ: тезисы межотраслевой научно-технической конференции. – Озерск: Форт Диалог – Исеть, 2002. – С. 278–280.

2. Родионов В.В. Синтез и анализ адаптивных алгоритмов обнаружения точечных целей на фоне протяженных по дальности помех / В.В. Родионов, А.Ю. Светлов // Радиолокация, навигация, связь: Сб. науч. докладов 9-й международной научно-технической конференции. – Воронеж: НПФ Саквое, 2003. – Т.3. – С. 1338–1346.

3. Родионов В.В. Адаптивный алгоритм обнаружения радиолокационных целей / В.В. Родионов, А.Ю. Светлов // Теория и техника передачи, приема и обработки информации: Сб. науч. тр. 8-й международной конференции. – Харьков: ХНУРЭ, 2002. – С. 279–280.

4. Rodionov V.V. Adaptive Detection Algorithm of the Moving Pin-Point Targets on the Clutter Background with High Period-To-Period Correlation Factor / V.V. Rodionov, A.Y. Svetlov // In proceedings of the IEEE-Siberian Conference on Control and Communications. – Tomsk, 2003. – P. 43–46.

5. Родионов В.В. Алгоритмы адаптивного обнаружения радиолокационных целей на фоне пассивных помех / В.В. Родионов, А.Ю. Светлов // СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2004: Сб. науч. тр. 1-го Евро-Азиатского международного форума. – Екатеринбург, 2004. – С. 127–138.

6. Светлов А.Ю. Программный комплекс моделирования и обработки радиолокационной информации в РЛС УВД / А.Ю. Светлов, В.В. Бубнов // Доклады 56-й научно-технической конференции ЮУрГУ (Кыштымский филиал). – Кыштым, 2004. – С. 7–10.

7. Бубнов В.В. Оптимальная вобуляция периода повторения импульсов в пакке для повышения вероятности правильного обнаружения движущейся цели / В.В. Бубнов, А.Ю. Светлов // Доклады 56-й научно-технической конференции ЮУрГУ (Кыштымский филиал). – Кыштым, 2004. – С. 11–14.

8. Родионов В.В. Обнаружение радиолокационных целей на фоне пассивных помех в когерентно-импульсных РЛС / В.В. Родионов, А.Ю. Светлов // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: материалы 13-й международной научно-технической конференции. – Рязань, 2004. – С. 80–82.

9. Родионов В.В. Адаптивный алгоритм обнаружения точечных целей на фоне пассивных помех в когерентных РЛС / В.В. Родионов, А.Ю. Светлов // Радиолокация, навигация, связь: Сб. науч. докладов 11-й международной научно-технической конференции. – Воронеж: НПФ Саквое, 2005. – Т.3. – С. 1607–1617.

10. Родионов В.В. Алгоритм вычисления оценки обратной корреляционной матрицы пассивной помехи в когерентно-импульсных РЛС / В.В. Родионов, А.Ю. Светлов // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр.; под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань: РГРТА, 2005. – С. 92–94.

11. Родионов В.В. Адаптивные обнаружители радиолокационных сигналов на фоне пассивных помех с высоким коэффициентом межпериодной корреляции / В.В. Родионов, А.Ю. Светлов // Системы локации и навигации: Сб. науч. тр. международной конференции. – Харьков: ХНУРЭ, 2005. – С. 118–121.

Библиографический список

Л1. Nayebi M.M. Detection of coherent radar signals with unknown Doppler shift / M.M. Nayebi, M.R. Aref, M.H. Bastani // IEE Proc. Radar, Sonar Navig. – April 1996. – №2. – P. 79–86.

Л2. Бакулев П.А. Устойчивое обнаружение когерентно-импульсного сигнала на фоне неоднородной пассивной помехи / П.А. Бакулев, С.В. Гуськов // Радиоэлектроника. – 1990. – №4. – С. 4–9.

Л3. Попов Д.И. Синтез и анализ эффективности систем адаптивной междупериодной обработки сигналов на фоне помех с неизвестными корреляционными свойствами / Д.И. Попов // Радиотехника и электроника. – 1983. – №12. – С. 2373–2380.

Л4. Баранов П.Е. Синтез и исследование эффективности оптимальных по критерию минимума СКО фильтров когерентно-весовой обработки / П.Е. Баранов, В.С. Токолов // Радиоэлектроника. – 1985. – №11. – С. 82–84.

Л5. Бакулев П.А. Методы и устройства селекции движущихся целей / П.А. Бакулев, В.М. Степин. – М. : Радио и связь, 1986.

Л6. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Сколника. Нью-Йорк, 1970: Пер. с англ. (в четырех томах); под общей ред. К.Н. Трофимова; Том 3. Радиолокационные устройства и системы; под ред. А.С. Виницкого. – М. : Сов. радио, 1978.

Л7. Леховицкий Д.И. Обобщенный алгоритм Левинсона и универсальные решетчатые фильтры / Д.И. Леховицкий // Изв. вузов Радиофизика. – 1992. – №9–10. – С. 790–808.

Л8. Родионов В.В. Реализация адаптивного обнаружения радиолокационных сигналов на цифровых сигнальных процессорах ADSP-21160 / В.В. Родионов, С.Л. Рацбуржинский, М.Ю. Худякова // Тезисы докладов 57-й научно-технической конференции ЮУрГУ (Кыштымский филиал). – Кыштым, 2005. – С. 60–63.

Издательство Южно-Уральского государственного
университета

Подписано в печать 27.03.2006. Формат 60x84 1/16.

Печать офсетная. Усл.печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1.

Тираж 100 экз. Заказ 66/110.

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им.В.И.Ленина, 76