

На правах рукописи
УДК 621.396

Белокуров Владимир Александрович

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ И
ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭХО-СИГНАЛОВ
СВЕРХМАНЕВРЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2006

Работа выполнена в ГОУВПО «Рязанский государственный
радиотехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кошелев Виталий Иванович

Официальные оппоненты: Лауреат Государственной премии СССР,
доктор технических наук, профессор,
Толкалин Лев Николаевич

кандидат технических наук, доцент
(г.Рязань)
Филатов Александр Дмитриевич

Ведущая организация: ОАО «Корпорация «Фазотрон–
НИИР» – НИИ «Рассвет» г.Рязань

Защита состоится 29 июня 2006 г. в 11.00 часов на заседании
диссертационного совета Д212.211.04 в Рязанском государственном
радиотехническом университете по адресу: 390005, г.Рязань, ул.Гагарина,
59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ГОУВПО «РГРТУ»

Автореферат разослан " ____ " _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

А.Г. Борисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие теории и практики авиационной науки, основанное на использовании достижений нестационарной аэродинамики, динамики полёта в неустановившемся движении и применение более совершенных алгоритмов и систем автоматического управления, обладающих существенно более высокой адаптацией к условиям полёта, привели к созданию нового типа летательных аппаратов, отличающихся свойствами сверхманевренности. Таким образом, сверхманевренными считаются те самолёты, в которых за счёт развитой механизации крыла, специальных органов непосредственного управления подъёмной и боковой силами и применения высокоэнергетических двигателей с управляемым вектором тяги возможно выполнение маневров, таких как «кобра Пугачёва», «колокол», «мангуст» и другие, с существенно более сложными пространственными эволюциями, приводящими к дополнительной частотной модуляции отражённых радиосигналов. Также важно отметить, что дополнительная частотная модуляция отражённого сигнала проявляется и при равномерном прямолинейном движении объекта за счёт изменения ракурса. В той или иной степени элементами сверхманевренности обладают все истребители и многофункциональные самолёты четвёртого поколения: F-15, F-16, F-18, МиГ-29, Су-27, Су-35, Су-37, а также многофункциональные самолёты пятого поколения (F-22).

В техническом плане изменение доплеровской частоты или, что эквивалентно, наличие радиального ускорения объекта в процессе обнаружения приводит к нарушению когерентности принимаемого сигнала, выраженному в «размытии» спектра, и, как следствие, к снижению эффекта когерентного накопления, резкому уменьшению дальности обнаружения, потерям в пороговом отношении сигнал-шум. При небольшой дальности до маневрирующего объекта или большой эффективной площади рассеяния отражённый сигнал имеет большую мощность, «размытие» спектра за счёт дополнительной частотной модуляции, по нескольким фильтрам может привести к принятию ложного решения о наличии нескольких объектов. В свою очередь, при обнаружении группового объекта факт «размытия» спектра приводит к ухудшению разрешающей способности по скорости.

Данная проблема особенно актуальна для бортовых импульсно-доплеровских РЛС (ИД РЛС), в которых время когерентного накопления сигнала составляет сотни мс и при этом ракурс объекта в результате собственного движения носителя изменяется в больших пределах, чем для наземных РЛС.

Для решения задачи обнаружения, в том числе маневрирующих объектов, широкое распространение получили многоканальные

алгоритмы обнаружения, представленные в работах Лукошкина А.П., Самарина О.Ф., Кузменкова Ю.В., Логинова В.М., Аганина А.Г., Алексеева Ю.Я., Артемьева А.И., Томоса Д., Лихарева В.А., коллектива авторов корпорации LOCKHEED и др. Наряду с достоинствами – меньшее число вычислительных операций, затрачиваемых на реализацию, им присущи существенные недостатки, связанные с увеличением потерь в пороговом отношении сигнал-шум, пропорциональные диапазону измерения ускорения движения объекта. Это приводит к резкому снижению их эффективности в ряде режимов работы ИД РЛС, например в режиме средней частоты повторения импульсов, при которых диапазон анализируемого радиального ускорения достигает существенных величин (до 500 м/с^2).

Одним из способов однозначного измерения дальности в ИД РЛС, работающей в режиме высокой частоты повторения импульсов (режим ВЧПИ), является использование сигналов с ЛЧМ-модуляцией, описанное в работах Бакулева П.А., Ширмана Я.Д., Винницкого А.С. При измерении дальности до маневрирующего объекта, за счёт появления дополнительной частотной модуляции, точность измерения дальности существенно ухудшается. Соответственно ухудшается точность оценки параметров движения объекта, выдаваемых в алгоритмы захвата и сопровождения.

Цель работы заключается в создании новых квазиоптимальных адаптивных и неадаптивных алгоритмов обнаружения маневрирующих объектов для ИД РЛС, отличающихся от известных более высокой эффективностью обнаружения маневрирующих объектов и меньшей погрешностью измерения дальности.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- произвести детальный анализ влияния радиального ускорения объекта на вероятностные и энергетические характеристики многоканального доплеровского фильтра (МДФ), дальность обнаружения и использовать полученную информацию при синтезе алгоритмов обнаружения маневрирующих объектов;
- произвести анализ влияния числа каналов по ускорению на эффективность обнаружения при использовании многоканального по скорости и ускорению алгоритма обнаружения сигналов с целью определения числа каналов, при котором обеспечивается минимум средней величины порогового отношения сигнал-шум;
- произвести статистический синтез и анализ квазиоптимального неадаптивного алгоритма обнаружения маневрирующих объектов с секционированием последовательности входных отсчётов, требующего для реализации меньшее число вычислительных операций;

- разработать инвариантный к скорости объекта способ обнаружения маневрирующих объектов с предварительной мультипликативной обработкой входных отсчётов, обеспечивающий выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум;

- произвести статистический синтез и анализ квазиоптимального адаптивного алгоритма обнаружения маневрирующих объектов с предварительной мультипликативной обработкой последовательности входных отсчётов;

- разработать алгоритм повышения точности оценки дальности до маневрирующего объекта частотным способом с использованием многоканального по скорости и ускорению алгоритма обнаружения на основе применения интерполяционных алгоритмов оценки частоты;

- произвести сравнение синтезированных алгоритмов обнаружения с известными по критерию вычислительной эффективности;

- рассмотреть возможности технической реализации синтезированных алгоритмов обнаружения маневрирующих объектов.

Методы анализа, используемые в диссертационной работе, основаны на методах статистической теории обнаружения, измерения параметров случайных процессов, методах доплеровской фильтрации, ЛЧМ-фильтрации, математическом моделировании. Основные числовые результаты получены в рамках методов максимального правдоподобия, собственных значений, экстремальных статистик, статистического моделирования, граничных оценок, определяемых неравенством Рао-Крамера.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) квазиоптимальный инвариантный к скорости объекта и многоканальный по ускорению алгоритм обнаружения с предварительной мультипликативной обработкой последовательности входных отсчётов, обеспечивающий выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум в среднем до 4 дБ, по сравнению с известным многоканальным по скорости и ускорению алгоритмом обнаружения, и значительно превосходящий его по вычислительной эффективности;

- 2) квазиоптимальный неадаптивный алгоритм обнаружения с секционированием входных отсчётов, позволяющий в 2,5 раза повысить вычислительную эффективность по сравнению с известным многоканальным по скорости и ускорению алгоритмом обнаружения;

- 3) квазиоптимальный адаптивный алгоритм обнаружения с предварительной мультипликативной обработкой входных отсчётов, позволяющий многократно повысить вычислительную эффективность;

- 4) алгоритм повышения точности измерения дальности до маневрирующего объекта частотным методом, на основе применения интерполяционных алгоритмов, позволяющий в 2,5 раза снизить

среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки дальности, по сравнению с широко применяемым на практике методе максимума параболической огибающей трёх дискретных отсчётов.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- произведён анализ влияния радиального ускорения объекта на вероятностные и энергетические характеристики МДФ, а также на дальность его обнаружения;

- получены значения нижних границ дисперсий совместных оценок скорости и ускорения с применением неравенства Рао-Крамера;

- разработан квазиоптимальный неадаптивный алгоритм обнаружения с секционированием входных отсчётов, позволяющий снизить вычислительные затраты системы обработки;

- разработан квазиоптимальный инвариантный к скорости и многоканальный по ускорению способ обнаружения с предварительной мультипликативной обработкой последовательности входных отсчётов, обеспечивающий выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум в среднем до 4 дБ, по сравнению с многоканальным по скорости и ускорению алгоритмом обнаружения, и значительно превосходящий его по вычислительной эффективности;

- разработан квазиоптимальный адаптивный алгоритм обнаружения с предварительной мультипликативной обработкой входных отсчётов, позволяющий многократно повысить вычислительную эффективность;

- усовершенствован алгоритм измерения дальности до маневрирующего объекта при использовании зондирующего ЛЧМ-сигнала.

Научное и практическое значение заключается:

- в проведении всестороннего анализа влияния радиального ускорения на вероятностные и энергетические характеристики МДФ;

- в анализе зависимости средней вероятности правильного обнаружения (СВПО) от числа каналов по ускорению многоканального по скорости и ускорению алгоритма обнаружения, позволяющего выбрать число каналов по ускорению, при котором обеспечивается минимум средней величины порогового отношения сигнал-шум;

- в разработке квазиоптимального инвариантного к скорости и многоканального по ускорению способа обнаружения с предварительной мультипликативной обработкой входных отсчётов, обеспечивающего выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум в среднем до 4 дБ по сравнению с многоканальным по скорости и ускорению алгоритмом обнаружения для режима средней частоты повторения импульсов;

- в разработке квазиоптимального адаптивного алгоритма обнаружения с предварительной мультипликативной обработкой

входных отсчётов, позволяющего существенно сократить число вычислительных операций при реализации;

- в разработке алгоритма повышения точности оценки дальности до маневрирующего объекта при использовании зондирующего ЛЧМ-сигнала.

Внедрение научных результатов. Результаты диссертационной работы внедрены в опытно-конструкторские работы и промышленные разработки ОАО «Корпорация «Фазотрон-НИИР» г.Москва (НИИ «Рассвет»), а также в учебный процесс Рязанского государственного радиотехнического университета при преподавании дисциплин «Теоретические основы радиоэлектронной борьбы» и «Средства радиоэлектронной защиты РЭС», в т.ч. в форме программно-методического обеспечения к лабораторной работе, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Апробация работы произведена в форме научных докладов, дискуссий по основным результатам диссертационной работы, которые проходили на следующих научных конференциях VII-научно-технической конференции НИТ-2003, (г. Рязань); 12-й международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (г. Рязань); международных научно-технических конференциях DSPA-2003, DSPA-2005 (г. Москва); 39-й научно-технической конференции РГРТА (г. Рязань).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных и 2 рукописных научных работы, в том числе 2 статьи в центральной печати, 5 тезисов докладов на конференциях, 2 статьи в межвузовских сборниках, 1 статья в «Вестнике РГРТА», 2 отчета по НИР, получено положительное решение о выдаче патента на способ обнаружения маневрирующих объектов.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения и приложений. Общий объём диссертации включает 135 страниц, библиографический список состоит из 102 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, представлены основные положения, выносимые на защиту, определены цель и задачи исследования, изложены новые результаты, полученные при исследовании, их научное и практическое значение, а также реализация и практическое внедрение.

В первом разделе рассмотрен выбор диапазона изменения радиального ускорения объекта на основе анализа пространственных изменений дальности от носителя РЛС до объекта. Рассмотрено влияние

радиального ускорения объекта на усреднённый коэффициент улучшения отношения сигнал-(помеха+шум) МДФ, СВПО на фоне шумов и на фоне помех МДФ и дальность обнаружения. Рассмотрены существующие в настоящее время алгоритмы обнаружения маневрирующих объектов и измерения их параметров, классификация которых представлена на рис. 1. Определены направления диссертационного исследования.



Рис. 1

Во втором разделе применены критерии статистического синтеза алгоритмов обнаружения радиолокационных сигналов, обоснованы методы анализа эффективности алгоритмов обнаружения, синтезирован и проанализирован оптимальный алгоритм обнаружения маневрирующих объектов, синтезированы и проанализированы неадаптивный, инвариантный к скорости и многоканального по ускорению и адаптивные алгоритмы обнаружения маневрирующих объектов. Найдено выражение для определения нижней границы Рао-Крамера оценок скорости и ускорения. На основании анализа СВПО многоканального алгоритма обнаружения определено наличие числа каналов по ускорению, при котором обеспечивается минимум средней величины в пороговом отношении сигнал-шум (сигнал-(помеха+шум)). Исследована возможность повышения точности оценки дальности до маневрирующего объекта частотным способом.

Оптимальная обработка согласно статистической теории обнаружения основана на вычислении отношения правдоподобия. Входной процесс является аддитивной смесью флуктуирующих по амплитуде отражений от маневрирующего объекта, внутреннего шума приёмника (некоррелированной составляющей). При этом совместная N -мерная плотность распределение смеси сигнала и шума $P_{\text{см}}(\mathbf{U})$ при известных значениях доплеровской фазы сигнала φ_c и его первой производной φ'_c имеет вид:

$$P_{\text{см}}(\mathbf{U}) = (2\pi)^{-N} [\det(\mathbf{R}^{\text{см}})]^{-1} \exp\left(-\frac{1}{2} \mathbf{U}^H \mathbf{R}_{\text{см}}^{-1} \mathbf{U}\right) =$$

$$= (2\pi)^{-N} [\det(\mathbf{R}^{\text{cm}})]^{-1} \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_j \sum_k^N W_{jk}^{\text{cm}} U_j U_k^*\right),$$

где \mathbf{U} – вектор входной выборки; \mathbf{W}^{cm} – матрица, обратная корреляционной матрице \mathbf{R}^{cm} с элементами:

$$R_{j,k}^{\text{cm}} = q\rho_{j,k}^c \exp(i(j-k)\varphi_c + \frac{1}{2}((t_0-j)^2 - (t_0-k)^2)\varphi'_c) + \delta_{j,k}, \quad (1)$$

где q – отношение сигнала к шуму по мощности, $\rho_{j,k}^c$ – коэффициенты межпериодной корреляции сигнала, φ_c – межпериодный набег фазы сигнала за счёт скорости, φ'_c – межпериодный набег фазы сигнала за счёт ускорения, t_0 – точка отсчёта скорости. Отношение правдоподобия с использованием N -мерных плотностей распределения для суммы сигнала и шума имеет следующий вид:

$$L(\mathbf{U}) = C_0 \exp\left\{\frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^N Q_{jk} U_j^* U_k\right\} \geq L_0,$$

где $C_0 = \det \mathbf{R}_m / \det \mathbf{R}_{\text{cm}}$, \mathbf{Q} – матрица обработки, элементы которой определяются как $Q_{jk} = \delta_{jk} - W_{jk}^{\text{cm}}$, L_0 – порог обнаружения. Показано, что эффективность оптимального алгоритма обнаружения маневрирующих объектов совпадает с эффективностью оптимального алгоритма обнаружения неманеврирующих объектов при полностью известных параметрах сигнала.

Точка отсчёта скорости определялась из анализа элементов матрицы Фишера. При гауссовской функции плотности распределения сигнала и шума элементы информационной матрицы Фишера примут следующий вид:

$$IF_{0,0}(\varphi_c, \varphi'_c) = \frac{\text{tr}(\mathbf{B}_V \mathbf{R}^*)}{\det(\mathbf{R})}, \quad IF_{0,1}(\varphi_c, \varphi'_c) = \frac{\text{tr}(\mathbf{B}_{VA} \mathbf{R}^*)}{\det(\mathbf{R})}, \quad IF_{1,1}(\varphi_c, \varphi'_c) = \frac{\text{tr}(\mathbf{B}_A \mathbf{R}^*)}{\det(\mathbf{R})},$$

\mathbf{R} – корреляционная матрица входного процесса (1), элементы матрицы \mathbf{B}_V имеют вид: $B_{V_{i,j}} = -(i-j)^2 a_{i,j}$, элементы матрицы \mathbf{B}_{VA} имеют вид:

$$B_{VA_{i,j}} = \left(-\frac{1}{2}(i-j)((t_0-i)^2 - (t_0-j)^2)\right) a_{i,j},$$

элементы матрицы \mathbf{B}_A имеют вид:

$$B_{A_{i,j}} = -\frac{1}{4}((t_0-i)^2 - (t_0-j)^2)^2 a_{i,j},$$

$a_{i,j}$ – алгебраическое дополнение i -го, j -го элемента корреляционной матрицы \mathbf{R} . Показано, что при $t_0=N/2$ коэффициент корреляции оценок скорости и ускорения равен нулю.

В первом разделе отмечено, что недостатком существующих алгоритмов обнаружения является очень существенное число вычислительных операций на реализацию и отсутствие разрешения по ускорению, поэтому применение их на практике затруднительно, в связи

с чем, исследована зависимость СВПО $\bar{D}(M_a)$ от числа каналов по ускорению многоканального по скорости и ускорению алгоритма :

$$\bar{D}(M_a) = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M_a-1} D_{j,k} \frac{1}{\Delta\varphi_c \Delta\varphi'_c} \int_{\varphi_{uj}}^{\varphi_{oj}} \int_{\varphi_{nk}}^{\varphi'_{ok}} \left(\frac{F}{NM_a} \right)^{\frac{1}{1+q}} \frac{w^H \mathbf{R}_c(\varphi_c, \varphi'_c) \mathbf{w}}{w^H \mathbf{1} w} d\varphi_c d\varphi'_c,$$

где $\Delta\varphi_c$ – ширина канала по скорости, $\Delta\varphi'_c$ – ширина канала по ускорению, \mathbf{w} – вектор обработки $\{w_j\} = \{\exp(-i(j\varphi_c + 1/2j^2\varphi'_c))\}$, $j=0,1..N-1$, \mathbf{I} – единичная матрица, $\varphi_{oj} = \varphi_j + 1/2\Delta\varphi_c$, $\varphi_{uj} = \varphi_j - 1/2\Delta\varphi_c$, $\varphi'_{ok} = \varphi'_k - 1/2\Delta\varphi'_c$, $\varphi'_{ok} = \varphi'_k + 1/2\Delta\varphi'_c$, $\Delta\varphi_c = 2\pi/(N-1)$, $\Delta\varphi'_c = \varphi'_{cmax}/(M_a-1)$, φ'_{cmax} – межпериодный набег фазы сигнала за счёт ускорения, соответствующий максимальному значению ускорения, M_a – число каналов по ускорению.

На основе анализа изменения спектра отражённого сигнала при накоплении в МДФ синтезирован неадаптивный алгоритм обнаружения с разбиением входной выборки на короткие сегменты, длина которых выбирается таким образом, чтобы ширина канала короткого сегмента равнялась суммарной ширине каналов МДФ на всю пачку, в которых находится спектр сигнала. Достаточная статистика имеет вид:

$$\xi(p, m) = \left| \sum_{i=0}^{M_{aS}-1} \sum_{k=0}^{N_m-1} U_{k+iN_m} \cdot \exp\left(\frac{-j2\pi pk}{N_m}\right) \right|^2, \quad (2)$$

где M_{aS} – количество сегментов БПФ в канале по ускорению; N_m – длина короткого БПФ, p – номер канала по скорости, m – номер канала по ускорению.

На основе анализа статистики (2) синтезирован неадаптивный алгоритм обнаружения маневрирующих объектов с разбиением входной выборки на короткие сегменты и прореживанием входных отсчётов. Длина сегмента выбирается аналогичным образом. Достаточная статистика имеет вид:

$$\xi(p, m) = \left| \sum_{k=0}^{N_m} \sum_{i=0}^{M_{aS}-1} U_{k+iN_m} \exp\left(\frac{-j2\pi pk}{N_m}\right) \right|^2. \quad (3)$$

Анализ эффективности рассмотренных алгоритмов обнаружения производился с помощью метода собственных значений, при этом алгоритм обнаружения, вычисляющий статистику (2), проигрывает многоканальному по скорости и ускорению алгоритму обнаружения 4 дБ, алгоритм обнаружения, вычисляющий (3), проигрывает 4,1 дБ.

Другой подход к синтезу алгоритмов обнаружения основан на разложении матрицы обработки многоканального по скорости и ускорению алгоритма обнаружения в ленточно-диагональной вид. При

этом также возможно введение многоканальности как по скорости, так и по ускорению. Достаточная статистика при этом имеет вид:

$$\begin{aligned} \xi(p, m) = & \operatorname{sinc}(\Delta\varphi/2) \cos(\varphi_p) \operatorname{Re} \left(\sum_{j=0}^{N-2} U_{j+1} U_j^* \operatorname{sinc} \left(j \frac{\Delta\varphi'_c}{2} \right) \exp \left(-i \left(j + \frac{1}{2} - \frac{N}{2} \right) \varphi'_m \right) \right) + \\ & + \operatorname{sinc}(\Delta\varphi/2) \sin(\varphi_p) \operatorname{Im} \left(\sum_{j=0}^{N-2} U_{j+1} U_j^* \operatorname{sinc} \left(j \frac{\Delta\varphi'_c}{2} \right) \exp \left(-i \left(j + \frac{1}{2} - \frac{N}{2} \right) \varphi'_m \right) \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\varphi'_m = \frac{\varphi'_{c \max}}{M_a - 1} m$ – настройка m -го канала по ускорению; M_a – число

каналов по ускорению; $\varphi_p = 2\pi p / (N - 1)$ – настройка p -го канала по скорости; N – число каналов по скорости. Недостатком данного алгоритма обнаружения является большое (число каналов по скорости и ускорению равно числу каналов по скорости и ускорению в многоканальном по скорости и ускорению алгоритме) суммарное число каналов обнаружения, усложняющих реализацию.

Вычисление оценки максимального правдоподобия скорости и введение многоканальности по ускорению приводят к квазиоптимальному инвариантному к скорости и многоканальному по ускорению алгоритму обнаружения с предварительной мультипликативной обработкой:

$$\xi(\hat{\varphi}_{c m}, m) = \left| \sum_{j=0}^{N-2} U_{j+1} U_j^* \exp \left(-i \left(j + \frac{1}{2} - \frac{N}{2} \right) \varphi'_m \right) \right|. \quad (5)$$

Алгоритм обнаружения, вычисляющий статистику (5), инвариантен к межпериодному набегу фазы сигнала за счёт скорости и осуществляет накопление мультипликаций в каналах по ускорению. Канал по ускорению определяет значения фазовращающих множителей, на которые последовательно умножаются мультипликации. Особенностью алгоритма (5) является то, что спектральный анализ выполняется в диапазоне, существенно меньшем, чем 2π , поэтому применение для вычисления статистики (5) алгоритма БПФ нецелесообразно. Используем при вычислении достаточной статистики (5) алгоритм z-преобразования с использованием ЛЧМ-фильтрации:

$$\xi(\hat{\varphi}_c, m) = \left| \exp \left(-i \left(\frac{1}{2} - \frac{N}{2} \right) \varphi'_m \right) W^{\frac{m^2}{2}} \sum_{j=0}^{N-2} (Y_j V_{m-j}) \right|, \quad (6)$$

где $Y_j = X_j A^{-j} W^{\frac{j^2}{2}}$, $V_j = W^{\frac{j^2}{2}}$. Таким образом, вычисление статистики (6) заключается в вычислении взвешенной свёртки последовательностей $\{Y\}$ и $\{V\}$ и умножении на соответствующие фазовращатели. Причём все элементы последовательностей $\{A\}$, $\{W\}$, $\{v\}$ ($m=0 \dots M_a-1$) вычисляются заранее и хранятся в ПЗУ. На данный способ обнаружения маневрирующих объектов получено положительное решение из ФИПС.

Для анализа характеристик обнаружения применён метод собственных значений. Матрица обработки алгоритма (4) имеет вид: $Q1_{j,k} = \exp(-i(\varphi_p + (j+(1-N)/2)\varphi'_m))$, если $k-j=1$ (наддиагональные элементы), $Q1_{j,k} = \exp(i(\varphi_p + (k+(1-N)/2)\varphi'_m))$, если $j-k=1$ (поддиагональные элементы). Элементы матрицы обработки алгоритма (5) имеют вид: $Q2_{j,k} = \exp(-i(\hat{\varphi} + (j+(1-N)/2)\varphi'_m))$, если $k-j=1$, $Q2_{j,k} = \exp(i(\hat{\varphi} + (k+(1-N)/2)\varphi'_m))$, если $j-k=1$.

При использовании для анализа алгоритма с накоплением мультипликации метода собственных значений при длительности пачки $N > 40$ собственные значения матрицы **RQ** близки, что приводит к неработоспособности метода из-за накопления вычислительной ошибки при расчёте. Поэтому для анализа эффективности данных алгоритмов при большом числе импульсов применено статистическое моделирование. Порог обнаружения определялся на основе метода экстремальных статистик при вероятностях ложной тревоги больше 10^{-3} .

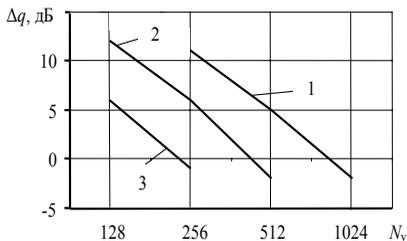


Рис. 2

многоканальным по скорости и ускорению. Кривая 1 соответствует $N=1024$, 2 – $N=512$, 3 – $N=256$. Из анализа зависимостей следует, что инвариантный к скорости и многоканальный по ускорению алгоритм обнаружения с предварительной мультипликативной обработкой проигрывает в пороговом отношении сигнал-шум многоканальному по скорости и ускорению, при равенстве числа каналов по скорости числу импульсов в пачке ($N=N_v$): 2 дБ при $N=1024$, $N=512$, $N=256$. При уменьшении числа каналов по скорости в два раза $N_v=N/2$ инвариантный к скорости и многоканальный по ускорению алгоритм обнаружения с предварительной мультипликативной обработкой выигрывает в пороговом отношении сигнал-шум у многоканального по скорости и ускорению около 6 дБ при $N=1024$, $N=512$, $N=256$, N_v – число каналов по скорости.

Неопределённость относительно ускорения, возможно устранить адаптацией по этому параметру. Синтезирован квазиоптимальный адаптивный алгоритм обнаружения с предварительной мультипликативной обработкой с оценкой скорости и ускорения:

$$\xi(\hat{\varphi}_c, \hat{\varphi}'_c) = \left| \sum_{j=0}^{N-2} U_{j+1} U_j^* \exp\left(-i\left(j + \frac{1}{2} - \frac{N}{2}\right)\hat{\varphi}'_c\right) \right|. \quad (7)$$

Оценка ускорения определяется по правилу:

$$\hat{\varphi}'_c = \arctg(\text{Im}(Y) / \text{Re}(Y)), \quad (8)$$

где $Y = \sum_{j=0}^{N-3} S_{j+1} S_j^*$; $S_j = U_{j+1} U_j^*$.

Эффективность алгоритма (7) определялась на основе статистического моделирования. Квазиоптимальный адаптивный алгоритм обнаружения с предварительной мультипликативной обработкой с оценкой скорости и ускорения проигрывает многоканальному по скорости и ускорению в пороговом отношении сигнал-шум от 1 до 2,5 дБ: при $N=128$, $M_a=10$, $N_v=64 - 1$ дБ; при $N=512$, $M_a=20$, $N_v=256 - 2,5$ дБ.

Одним из основных методов измерения дальности в режиме ВЧПИ является частотный, при этом точность оценки дальности низкая. Измерение дальности производится в два этапа: на первом этапе достаточная статистика имеет вид $\xi(\varphi_c, \varphi'_c) = \mathbf{U}_{os}^H \mathbf{Q}_{os} \mathbf{U}_{os}$, где элементы матрицы \mathbf{Q}_{os} имеют вид: $Q_{osj,k} = \exp(i((j-k)\varphi_c) + 1/2((N/2-j)^2 - (N/2-k)^2)\varphi'_c)$, \mathbf{U}_{os} – вектор входной выборки на первом этапе. После усреднения по доплеровской фазе получим максимально правдоподобную оценку φ_c и φ'_c с точностью до канала.

На втором этапе достаточная статистка имеет вид: $\xi(\varphi_c, \varphi'_c, \varphi_R) = \mathbf{U}_{TS}^H \mathbf{Q}_{TS} \mathbf{U}_{TS}$, где элементы матрицы \mathbf{Q}_{TS} имеют вид: $Q_{TSj,k} = \exp(i((j-k)(\varphi_c - \varphi_R) + 1/2((N/2-j)^2 - (N/2-k)^2)\varphi'_c))$, \mathbf{U}_{TS} – вектор входной выборки на втором этапе, $\varphi_R = \frac{4\pi W_f R}{c N}$ – дальномерный набег фазы сигнала, W_f –

девиация частоты излучаемого колебания, R – дальность до объекта, c – скорость света. Для повышения точности оценки дальности до маневрирующего объекта частотным способом применён интерполяционный алгоритм повышения точности оценки частоты:

$$T(\varphi) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l \varphi^l, \quad \varphi \in [\varphi_{K-M}, \varphi_{K+M}], \quad L=2M+1 - \text{общее число спектральных}$$

отсчётов, участвующих в алгоритме повышения точности. На рис. 3 представлены зависимости СКО оценки дальности при различных значениях девиации частоты, кривые 1 соответствуют девиации 25 кГц, кривые 2 – 60 кГц. Сравнение кривых на рис. 3 показывает, что применение интерполяционного алгоритма позволяет в 2,5 раза повысить точность измерения дальности по сравнению с известным алгоритмом повышения точности. Увеличение параметра окна приводит к

повышению точности измерения дальности, но при этом происходят расширение полосы пропускания доплеровского канала, уменьшение когерентного усиления в доплеровском канале, что в свою очередь приводит к возрастанию порогового отношения сигнал-шум.

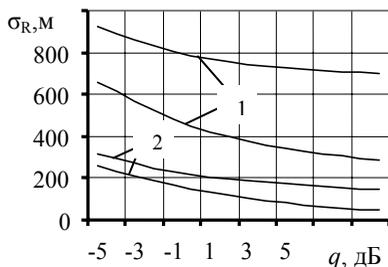


Рис. 3

потерь в пороговом отношении сигнал-шум, применяя окно Дольфа-Чебышева. При увеличении параметра окна (уменьшении уровня боковых лепестков АЧХ доплеровских каналов) потери в отношении сигнал-шум могут превысить допустимые, что приведет к уменьшению дальности обнаружения.

Таблица 1

a	3	4	5
Δq , дБ	1,8	1,9	3,4

Таблица 2

a	2,2	3	3,7	5,2
Δq , дБ	2	2,6	3,2	3,3

Поэтому данный алгоритм повышения точности оценки дальности целесообразно использовать не на предельных энергетических дальностях, при этом на первом этапе обнаружения-измерения дальности окно ДЧ выбирать с небольшим значением параметра окна ($\alpha = 2,5 \dots 3,0$), на втором этапе – окно ДЧ с большим значением параметра окна ($\alpha = 4,0 \dots 4,5$).

В третьем разделе рассмотрены вопросы имитационного моделирования синтезированных алгоритмов обнаружения, а также вопросы вычислительной эффективности. Определение порога обнаружения осуществлялось по методу экстремальных статистик, вероятность правильного обнаружения определялась по определению. При вычислении дисперсии оценки межпериодного набега фазы за счёт скорости учтена цикличность оценки. Квадратурные проекции сигнала задавались в виде:

$$u_j = G_j(u_{j-1} \cos(j\varphi_c + \frac{1}{2}j^2\varphi'_c) - v_{j-1} \sin(j\varphi_c + \frac{1}{2}j^2\varphi'_c)) + rnorm(N,0,1)_j$$

$$v_j = G_j(u_{j-1} \sin(j\varphi_c + \frac{1}{2}j^2\varphi'_c) + v_{j-1} \cos(j\varphi_c + \frac{1}{2}j^2\varphi'_c)) + rnorm(N,0,1)_j .$$

Расхождение теоретических характеристик обнаружения, полученных на основании метода собственных значений, с характеристиками, полученными при моделировании, не превосходит 0,2 дБ.

Суммарные вычислительные затраты, определяемые в элементарных операциях (ЭО), под которыми понимаются операции сложения и умножения, на реализацию алгоритмов обнаружения представлены в таблице 3.

Таблица 3

Алгоритм обнаружения	Число ЭО, затрачиваемых на реализацию
Многоканальный по скорости и ускорению	$M_a(5N \log_2 N + 6N) + 3N_v M_a$
Неадаптивный с секционированием входных отсчётов	$2(5N/2 \log_2(N/2)) + (N-1)/2 + 3N_v/2 + 5N + \log_2(N)$
Неадаптивный с секционированием и прореживанием входных отсчётов	$(5N/2 \log_2(N/2)) + 2(N-1)/2 + 3N_v/2 + 5 + \log_2(N)$
Инвариантный к скорости и многоканальный по ускорению с предварительной мультипликативной обработкой	$6(N-2) + 10(N + M_a - 2) \log_2(N + M_a - 2) + 6(N + M_a - 2) + 6M_a + 3M_a$
Адаптивный с предварительной мультипликативной обработкой	$2(N-1) + 2(N-2) + 12 + 3$

Показано, что квазиоптимальный инвариантный к скорости и многоканальный по ускорению алгоритм обнаружения превосходит по вычислительной эффективности многоканальный в 10-11 раз и до 5 раз – известный с разбиением на секции. При этом выигрыш не зависит от числа каналов по скорости. Квазиоптимальный адаптивный алгоритм обнаружения с предварительной мультипликативной обработкой превосходит многоканальный в 108 раз ($N=512$, $M_a=20$, $N_v=N$) и в 55 раз – известный с разбиением на секции. Квазиоптимальный неадаптивный алгоритм обнаружения с секционированием входных отсчётов по

вычислительной эффективности превосходит многоканальный по скорости и ускорению (при $N_v=N$ в 3,2 раза, $N=512$, $M_a=4$).

Рассмотрена возможность реализации синтезированных алгоритмов на основе цифровых сигнальных процессоров.

В заключении подведены итоги диссертационной работы и сформулированы её основные научные и практические результаты, которые сводятся к следующему:

- исследовано влияние радиального ускорения объекта на вероятностные и энергетические характеристики систем межпериодной обработки радиолокационных сигналов;

- проанализировано изменение пространственных координат сверхманевренного объекта и носителя в процессе обнаружения, позволяющее определить реальный диапазон изменения радиального ускорения с учётом физических возможностей современных ЛА. Показано, что при зондировании пространства пачкой простых импульсных сигналов данный диапазон существенно меньше, чем значение первого «слепого» ускорения;

- проведён анализ влияния радиального ускорения объекта на энергетические характеристики МДФ, вероятностные характеристики, дальность обнаружения, показано, что наличие радиального ускорения приводит к потерям в КУ до 10 дБ, снижению дальности обнаружения в 2...3 раза;

- исследована и проанализирована зависимость СВПО от числа каналов по ускорению. Показано наличие числа каналов по ускорению для многоканального по скорости и ускорению алгоритма обнаружения сигналов, отражённых от маневрирующего объекта, при котором обеспечивается минимум средней величины порогового отношения сигнал-шум (сигнал-(помеха+шум)), в частности при $N=512$, $F=10^{-7}$, $\Delta f_c T=0,01$, $M_{aopt}=128$;

- проведён статистический синтез квазиоптимального инвариантного к скорости и многоканального по ускорению алгоритма обнаружения с предварительной мультипликативной обработкой, обеспечивающего выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум в среднем до 4 дБ по сравнению с многоканальным по скорости и ускорению для ряда режимов работы ИД РЛС;

- проведён статистический синтез квазиоптимального адаптивного алгоритма обнаружения с предварительной мультипликативной обработкой, обеспечивающего многократный выигрыш в количестве вычислительных операций по сравнению с многоканальным по скорости и ускорению;

- проведён статистический синтез квазиоптимального неадаптивного алгоритма обнаружения с секционированием входных

отсчётов, обеспечивающего выигрыш в количестве вычислительных операций в среднем в 2,5 раза по сравнению с многоканальным по скорости и ускорению;

- исследована возможность применения интерполяционного алгоритма повышения точности оценки частоты для задачи повышения точности оценки дальности до маневрирующего объекта частотным способом и показано, что это позволяет снизить СКО оценки дальности в среднем в 2,5 раза по сравнению с применяемым на практике методом;

- разработан программный комплекс для анализа влияния радиального ускорения объекта на вероятностные и энергетические характеристики многоканальных обнаружителей.

В приложении приведены список условных обозначений и аббревиатур, встречающихся в тексте диссертации, а также копии актов внедрения результатов, полученных в данной диссертационной работе.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах

1. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Синтез и анализ обнаружителей радиолокационных сигналов, отражённых от маневрирующей цели // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2005. №3. С. 56-63.

2. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Адаптивное выделение маневрирующих целей // Цифровая обработка сигналов. 2005. №1. С. 41-46.

3. Кошелев В.И., Белокуров В.А., Горкин В.Н. Алгоритмы повышения точности измерения дальности в РЛС с квазинепрерывным линейно-частотно-модулированным сигналом // Вестник РГРТА. Вып. 16. 2005. С. 103-106.

4. Белокуров В.А. Характеристики обнаружения систем обработки отражённых сигналов от маневрирующей цели // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических устройствах: Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТА, 2004. С.48-51.

5. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Влияние эффекта маневрирования цели на обнаружение доплеровских сигналов // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах: Межвузовский сборник научных трудов. – Рязань: РГРТА, 2003. С. 79-83.

6. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Алгоритм обнаружения маневрирующей цели // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPA-2003): Тезисы докладов международной научно-техн. конф. Москва, 2003.

7. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Адаптивное выделение сигналов, отражённых маневрирующим объектом на фоне шумов // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPA-2005): Тезисы докладов международной научно-техн. конф. Москва, 2005.

8. Белокуров В.А. Разработка программного комплекса «Стрела» для расчёта обнаружителя маневрирующих объектов // Новые информационные технологии (НИТ – 2003): Тезисы докладов VII научно-техн. конф. Рязань: РГРТА, 2003. С. 53-55.

9. Кошелев В.И. Белокуров В.А. Анализ влияния радиального ускорения цели на вероятностные и энергетические характеристики многоканальных систем межпериодной обработки // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Тезисы докладов 12-й Международной научно-техн. конф. Рязань: РГРТА, 2003. С. 35-37.

10. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Алгоритмы обнаружения маневрирующей цели // Тезисы докладов 39-й научно-техн. конф. Рязань. 2003. С. 3.

11. Разработка методов и устройств первичной и вторичной обработки эхо-сигналов сверхманевренных объектов: Отчет о НИР (закл.) / РГРТА; Науч. рук. Кошелев В.И. Тема №10-04Г; №ГР01200410118. Рязань, 2004. 65 с. Соисполн.: Андреев В.Г., Алпатов Б.А., Белокуров В.А., Бохан К.А.

12. Технологии обработки видео- и радиолокационной информации в комплексах обнаружения, распознавания и сопровождения целей: Отчет о НИР (закл.) / РГРТА; Науч. рук. Алпатов Б.А. Тема № 9-05Г; №ГР01200501965. Рязань, 2005. 249 с. Соисполн.: Селяев А.А., Кошелев В.И., Кириллов С.Н., Белокуров В.А. и др.

БЕЛОКУРОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ

Методы повышения эффективности обнаружения и измерения параметров эхо-сигналов сверхманевренных объектов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 25.05.06. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л.1,0.
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.