

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.396.96

Башир Мухамед Ахмед Желили

**РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ
ОБЪЕКТОВ, ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ОТ СОПРОВОЖДАЕМОЙ
ЦЕЛИ, НА ФОНЕ МЕШАЮЩИХ СИГНАЛОВ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы
и устройства радиолокации, радионавигации и телевидения»

Минск, 2007

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель – **Горшков** Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, начальник цикла, профессор учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», кафедра радиолокации и приемопередающих устройств

Официальные оппоненты:

Охрименко Александр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, советник по науке НИЦ РУП «Алевуруп»

Иванишин Павел Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, начальник НИЛ учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

Оппонирующая организация:

Государственное научное учреждение «Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь»

Защита состоится 21 июня 2007 года в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013 Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, dissovet@bsuir.unibel.by, тел. 293-89-89

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Автореферат разослан «18» мая 2007 года.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

1 Результаты работы использовались в НИР «Алгоритм 2006», рег. № 20064703 от 09.08.2006.

Цель и задачи исследования

Цель: разработать эффективный метод обнаружения малоразмерного отделяющегося объекта от сопровождаемой цели на фоне мешающих сигналов, основанный на теории квазиполного разрешения–обнаружения.

Задачи исследования:

1 Разработать методику математического моделирования вторичного излучения разделяющихся воздушных объектов и провести обзор методов обнаружения отделяющегося объекта.

2 Разработать алгоритмы и синтезировать устройство адаптивного обнаружения отделяющегося от сопровождаемой цели объекта на фоне мешающих сигналов.

3 Проанализировать характеристики обнаружения отделяющегося объекта.

4 Проанализировать влияние на характеристики обнаружителя расстройек принятого и ожидаемого сигналов по времени, частоте и девиации частоты.

Объект и предмет исследования

Объект исследования – когерентные РЛС точного измерения координат воздушных объектов. **Предмет** исследования – алгоритмы и устройства обнаружения отделяющихся объектов.

Положения, выносимые на защиту

1 Математическая модель отраженного сигнала от сопровождаемого и отделяющегося от него объектов, отличающаяся учетом пространственно-поляризационных и времячастотных особенностей вторичного излучения, в том числе эффекта ротационной модуляции, существенных для оптимизации обнаружителя отделяющегося объекта, и позволяющая:

- оценивать параметры временной структуры, корреляционной функции и энергетического спектра отраженного сигнала отделяющегося объекта;

- оценивать и сопоставлять показатели качества различных обнаружителей отделяющегося объекта на фоне мешающего сигнала, отраженного от самолета-носителя.

2 Алгоритмы работы, структуры и показатели качества оптимальных и квазиоптимальных устройств обнаружения отделяющегося объекта на фоне мешающих сигналов с адаптацией к их параметрам, отличающиеся наличием адаптивного устройства когерентной компенсации мешающего сигнала и согласованием когерентного накопителя с линейным законом изменения частоты

Доплера отраженного сигнала, позволившие обеспечить близкие к потенциальным характеристики обнаружения на фоне мешающего сигнала, на 17–30 дБ превышающего полезный, и впервые решить задачу автоматического обнаружения малоразмерного высокодинамичного отделяющегося объекта, не разрешаемого с самолетом-носителем по угловым координатам и дальности.

3 Условная функция неопределенности ЛЧМ сигнала, отличающаяся от ранее использовавшихся зависимостей учетом рассогласования по девиации частоты и позволяющая определять форму выходных сигналов устройства когерентной обработки, а также методика минимизации требований к числу каналов обнаружителя.

Личный вклад соискателя

Соискателем лично получены следующие научные результаты:

- 1 Математическая модель вторичного излучения отделяющегося объекта.
- 2 Результаты математического моделирования показателей качества обнаружения оптимальных и квазиоптимальных обнаружителей отделяющихся объектов.
- 3 Структура адаптивного к характеристикам мешающего сигнала обнаружителя отделяющегося объекта.
- 4 Результаты математического моделирования работы известного и модифицированного акустического обнаружителя отделяющегося объекта.

Совместно с научным руководителем получены следующие научные результаты:

- 1 Алгоритм и структура оптимального обнаружителя отделяющегося объекта на фоне мешающих сигналов.
- 2 Алгоритм и структура квазиоптимального обнаружителя мешающих сигналов, сочетающего когерентное и некогерентное накопление.
- 3 Выражение для условной функции неопределенности ЛЧМ сигнала, учитывающей расстройку по времени, частоте и величине девиации частоты.
- 4 Структура модифицированного акустического обнаружителя отделяющегося объекта.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований по теме диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- 1 7-я научно-техническая конференция Военной академии Республики Беларусь, Минск, 26–27 января 2005 г.
- 2 Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития. 2-й Международный радиоэлектронный форум, Харьков, 19–23 сентября 2005г.

3 8-я научно-техническая конференция Военной академии Республики Беларусь, Минск, 30–31 марта 2006 г.

4 Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке. 10-й Юбилейный международный молодежный форум, Харьков, 10–12 апреля 2006 г.

5 42-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Радиотехника и электроника», Минск, 17–21 апреля 2006 г.

6 Современные информационные технологии. IX Международная школа-семинар аспирантов, магистрантов и студентов, Браслав, 2–9 июля 2006 г.

7 1-я Международная научная конференция «Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития», г. Туапсе, РФ, 3–6 октября 2006 г.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты научных исследований опубликованы в пяти статьях в рецензируемых научных журналах, общим объемом 1,5 авторских листа, а также в семи других печатных работах (трех статьях, в сборниках материалов конференций, трех тезисах докладов, одном отчете о НИР).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа содержит введение, общую характеристику работы, основную часть в трех главах, заключение, четыре приложения. Общий объем диссертации – 125 страниц, текст иллюстрируется 53 рисунками и 4 таблицами. При выполнении работы использовано 56 литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Последние вооруженные конфликты показали, что основным средством уничтожения наземных целей в наступательной воздушной операции является высокоточное оружие класса «воздух – поверхность». Это такие средства, как противорадиолокационные ракеты «HARM», ракеты воздух – земля «Maveric», планирующие бомбы «JDAM» и др. При нападении на Ирак ВВС США и НАТО использовали более чем в 90 % случаев именно высокоточное оружие.

Для принятия своевременных мер по защите РЛС или защищаемого объекта от наведения ВТО необходимо своевременно обнаружить его пуск и отделение от самолета.

Но возможности его обнаружения снижаются в результате:

- использования технологий «Стелс» при разработке ВТО, что позволяет уменьшить его ЭПР и приводит к снижению отношения сигнал – шум отделяющегося объекта по сравнению с сопровождаемым самолетом;
- постановки помех до и после пуска;
- наличия в спектре отраженного сигнала модуляционных составляющих, обусловленных вращением элементов силовых установок.

Первая глава диссертации посвящена разработке математической модели отраженного сигнала от сопровождаемой цели и отделяющегося от нее объекта.

Такая математическая модель включает в себя модель отделяющейся цели как объекта вторичного излучения, модель ее движения в турбулентной атмосфере, модель самолета-носителя и модель формирования принятого сигнала. Кроме того, введены математические описания временной структуры, корреляционной функции и энергетического спектра отраженного сигнала (ОС) от отделяющегося объекта.

Математическая модель ПРП HARM была разработана с использованием программы моделирования вторичного излучения воздушных целей BSS. При этом было проведено математическое описание поверхности ПРП (рисунок 1) и ее основных локальных отражателей. Общее число аппроксимирующих поверхностей составило 49. Из них – 1 эллиптический цилиндр с парой ограничивающих плоскостей, аппроксимирующий корпус цели, 1 эллиптический конус (хвостовая часть корпуса), 1 эллипсоид (носовая часть корпуса), а также антенна с радиопрозрачным обтекателем. Крылья, рули и хвостовое оперение описано 28-ю клиньями (кромки) и 16-ю многоугольными пластинами (несущие плоскости).

Результаты расчета диаграммы обратного вторичного излучения ПРП для двух различных длин волн – 3 и 10 см приведены на рисунке 2, а, б.

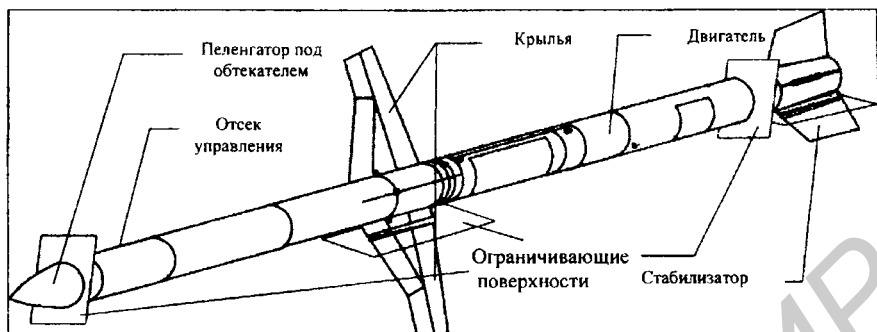


Рисунок 1 – Общий вид планера ПРП «HARM»

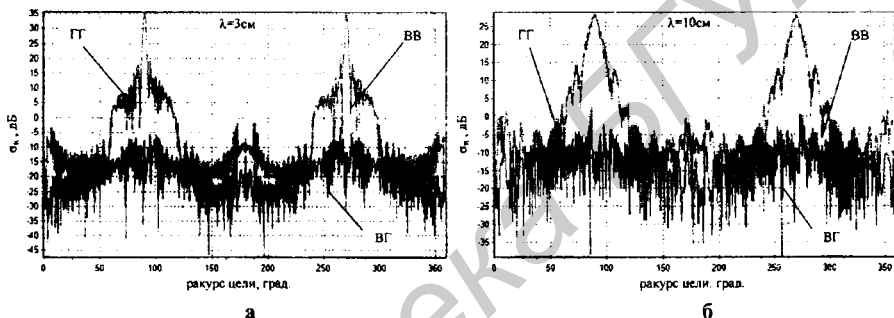


Рисунок 2 – Диаграмма обратного вторичного излучения ПРП «HARM»

На рисунках показаны результаты расчета для двух согласованных на передачу и прием линейных поляризаций (горизонтальная на прием и передачу – ГГ, вертикальная на прием и передачу – ВВ), а также – для приема на кросс-поляризации (вертикальная на прием, горизонтальная на передачу – ВГ). Расчетные значения ЭОП в носовом секторе ракурсов, близких к 180° , оказались около -10 дБ (0.1 м^2) для длины волны 3 см. В частности, усредненное в секторе ± 15 значение ЭОП составило для горизонтальной поляризации -14.1 дБ, а для вертикальной поляризации -13.1 дБ относительно 1 м^2 , что соответствует ошибке моделирования не более 1–2 дБ по отношению к известным результатам. Для бортовых ракурсов, близких к 90° или 270° , наблюдающийся выброс ЭОП до уровня 35 дБ (более 3000 м^2) объясняется зеркальным отражением от боковой поверхности цилиндрического корпуса и крыльев (рулей) цели.

Моделирование движения отделяющегося объекта типа ПРП или УАБ проводилось с использованием системы дифференциальных уравнений Жуковского для движения в турбулентной атмосфере. Результаты моделирования движения отделяющегося объекта и частоты Доплера отраженного от него сигнала

позволяют ввести на ограниченном временном интервале линейный закон изменения частоты Доплера ОС.

Временная структура ОС отделяющегося объекта аппроксимирована произведением медленно флюктуирующего амплитудного множителя и комплексного закона модуляции дискретно модулированного по фазе

$$m_c(t) = M(t)e^{i\Omega_a t} \sum_{k=0}^{L-1} U_0 [t - kT_n - t_r(t - t_0)] \cdot d_k, \quad (1)$$

где $d_k = e^{i\Phi_{0k}}$ – символ кода фазовой модуляции, фактически представляющий собой дискретные значения комплексной огибающей ЛЧМ импульса длительностью LT_n , с девиацией частоты Δf_m , взятые в моменты времени kT_n ;

$$\Phi_{0k} = \pi \frac{\Delta f_m}{LT_n} (kT_n)^2 \text{ – начальная фаза } k\text{-го дискрета;}$$

$$\Delta f_m = \frac{2a_r LT_n}{\lambda} \text{ – девиация частоты Доплера за время наблюдения } LT_n.$$

Соответствующее временной структуре (1) выражение для корреляционной функции ОС отделяющегося объекта имеет следующий вид:

$$R_m(\tau) = \frac{1}{LT_0} \int_{-\infty}^{\infty} m_c(t) m_c^*(t - \tau) dt = 2\sigma_c^2 r_c(\tau) \frac{1}{L} \sum_{k,l=0}^{L-1} d_k d_l^* \cdot C_0[\tau - (k-l)T_n], \quad (2)$$

где σ_c^2 – мощность ОС;

$r_c(\tau) \approx \exp(-|\tau|/\tau_c)$ – нормированная корреляционная функция флюктуаций отраженного сигнала;

τ_c – время корреляции флюктуаций ОС;

$C_0(\tau)$ – корреляционная функция закона модуляции зондирующего импульса.

Энергетический спектр ОС может быть описан следующим выражением:

$$S_m(\omega) = 2\sigma_c^2 S_{Lc}[(\omega - \omega_0 - \Omega_a)T_n] S_0[\omega - \omega_0 - \Omega_a], \quad (3)$$

где $S_0[\omega - \omega_0 - \Omega_a]$ – энергетический спектр одиночного радиоимпульса;

$$S_{Lc}[(\omega - \omega_0 - \Omega_a)T_n] = \sum_{m=n} r_{Lc}[(m-n)T_n] \cdot e^{-i(\omega - \omega_0 - \Omega_a)(m-n)T_n} \text{ – междупериодный}$$

энергетический спектр (ЭС) ОС;

$r_{Lc}[(m-n)T_n] = r_c[(m-n)T_n] \cdot r_L[(m-n)T_n]$ – отсчеты НКФ огибающей последовательности манипулированных по фазе и δ -модулированных по амплитуде флюктуирующих импульсов;

$$r_L[(m-n)T_n] = \frac{1}{L} \cdot \begin{cases} \sum_{k=0}^{L-1+m-n} d_k d_{k-(m-n)}^*, & \text{при } (m-n) \leq 0, \\ \sum_{k=m-n}^{L-1} d_k d_{k-(m-n)}^*, & \text{при } (m-n) > 0 \end{cases} \quad - \text{дискретные значения}$$

нормированной корреляционной функции между периодической огибающей.

Методика моделирования отраженного сигнала сопровождаемой цели и отделяющегося объекта включала:

- расчет ОС от самолета-носителя на временном интервале 1–3 с;
- расчет последовательности отраженных сигналов от запускаемого в момент времени t_0 объекта;
- формирование смеси сигналов и внутреннего шума для заданных отношений сигнал – шум и мешающий сигнал - шум;
- расчет огибающей одиночного радиопульса для учета выхода объекта из элемента дальности сопровождаемой цели.

По результатам проведенного моделирования был сделан вывод о близости закона изменения частоты Доплера ОС отделяющегося объекта к линейному и о возможности согласованной обработки такого сигнала при заданном ускорении и времени наблюдения. В то же время радиолокационному наблюдению отделяющегося объекта мешают:

- ОС от планера самолета-носителя;
- модуляционные составляющие в его спектре ОС самолета-носителя, обусловленные наличием вращающихся элементов силовой установки;
- мешающие отражения и остатки от их компенсации;
- амплитудно-скоростная характеристика устройства когерентной компенсации мешающих отражений.

Вторая глава работы посвящена обнаружению отделяющихся объектов на фоне модуляционных компонентов отраженного сигнала.

Особенности радиолокационного наблюдения движущихся с радиальным ускорением объектов на фоне мешающих сигналов сводятся к когерентной компенсации мешающих сигналов и когерентному накоплению искаженного предыдущим этапом обработки полезного сигнала с изменяющейся доплеровской частотой. На ограниченных временных интервалах закон изменения частоты можно считать линейным. Для расширения возможностей обработки когерентное накопление дополняют некогерентным.

Ускорение объекта заранее неизвестно, что приводит к необходимости ведения одновременного обзора по радиальному ускорению.

Рассмотренная задача решается в рамках теории квазиполного обнаружения – разрешения. При этом как помеха, так и сопровождаемая цель считаются мешающими сигналами с гауссовской статистикой.

На этой основе формируется квадрат АЧХ когерентной части устройства обработки:

$$|K_{\text{мно}}(\omega T_n)|^2 = |K_I(\omega T_n)|^2 |K_{II}(\omega T_n)|^2, \quad (4)$$

где $|K_I(\omega T_n)|^2 = 1/S_{\Phi}(\omega T_n)$ – квадрат АЧХ первого этапа междупериодной обработки или устройства когерентной компенсации фазы;

$|K_{II}(\omega T_n)|^2 = |G_L[(\omega - \omega_0 - \Omega_{\text{дс}})T_n]|^2 / S_{\Phi}(\omega T_n)$ – квадрат АЧХ второго этапа междупериодной обработки или устройства когерентного накопления сигнала, искаженного прохождением через устройство когерентной компенсации фазы;

$|G_L[(\omega - \omega_0 - \Omega_{\text{дс}})T_n]|^2$ – квадрат модуля междупериодного спектра ожидаемого сигнала;

$S_{\Phi}(\omega T_n)$ – междупериодный ЭС фона.

Этап когерентной компенсации фона может быть разбит на два следующих подэтапа:

- подэтап когерентной компенсации пространственно распределенных мешающих отражений с обелением их ЭС в фильтре, квадрат АЧХ $K_{\text{In}}(\omega T_n)$ которого описывается следующим выражением:

$$|K_{\text{In}}(\omega T_n)|^2 = \frac{1}{1 + \gamma_n S_{L_n}[(\omega - \omega_0 - \Omega_{\text{дн}})T_n]},$$

где $S_{L_n}[\omega T_n]$ – междупериодный ЭС мешающих отражений;

$\gamma_n, \Omega_{\text{дн}}$ – отношение мощности помехи к мощности внутреннего шума на один импульс и частота Доплера мешающих отражений;

- подэтап когерентной компенсации мешающего сигнала сопровождаемой цели с обелением его ЭС в фильтре с квадратом АЧХ $|K_{\text{Iu}}(\omega T_n)|^2$, учитывающем искажения ЭС спектра мешающего сигнала, внесенные предыдущей ступенью компенсации:

$$|K_{\text{Iu}}(\omega T_n)|^2 = \frac{1}{1 + |K_{\text{In}}(\omega T_n)|^2 \gamma_u S_{L_u}[(\omega - \omega_0 - \Omega_{\text{дн}})T_n]},$$

где $S_{L_u}[\omega T_n]$ – междупериодный ЭС мешающего сигнала;

$\gamma_u, \Omega_{\text{дн}}$ – отношение мощности мешающий сигнал – шум на выходе устройства междупериодной обработки и частота Доплера мешающего сигнала.

Структура устройства когерентной обработки показана на рисунке 3.

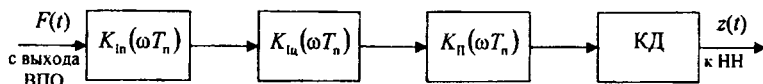


Рисунок 3 – Структурная схема когерентной части устройства обработки

Структура оптимального обнаружителя отделяющегося объекта рассматривается в составе устройства временной обработки РЛС сопровождения. При этом полагается, что момент отделения заранее неизвестен, а частотная характеристика $K_{\text{лц}}(\omega T_n)$ устройства компенсации мешающего сигнала от самолета-носителя известна или неизвестна и подлежит оцениванию. В первом случае устройство обработки можно считать неадаптивным, а во втором – адаптивным. Структура адаптивного обнаружителя показана на рисунке 4.

Принятый сигнал $f(t)$ проходит вначале через фильтр внутривременной обработки (ВПО), а затем – через фильтровое устройство когерентной компенсации мешающих отражений (ККМО) с частотной характеристикой $K_{\text{лц}}(\omega T_n)$. Выходной сигнал устройства ККМО через временной селектор поступает на смеситель (СМ), опорным сигналом которого является выход управляемого генератора системы сопровождения по скорости (ССС). В состав последнего входят также фильтр грубой селекции (ФГС), частотный дискриминатор (ЧД), а также цепи фильтрации и экстраполяции (ФЦЭ). Напряжение управляемого генератора поступает также на следующую систему по дальности (ССД), которая вырабатывает стробирующие импульсы дальности (СИД), необходимые для работы временного селектора.

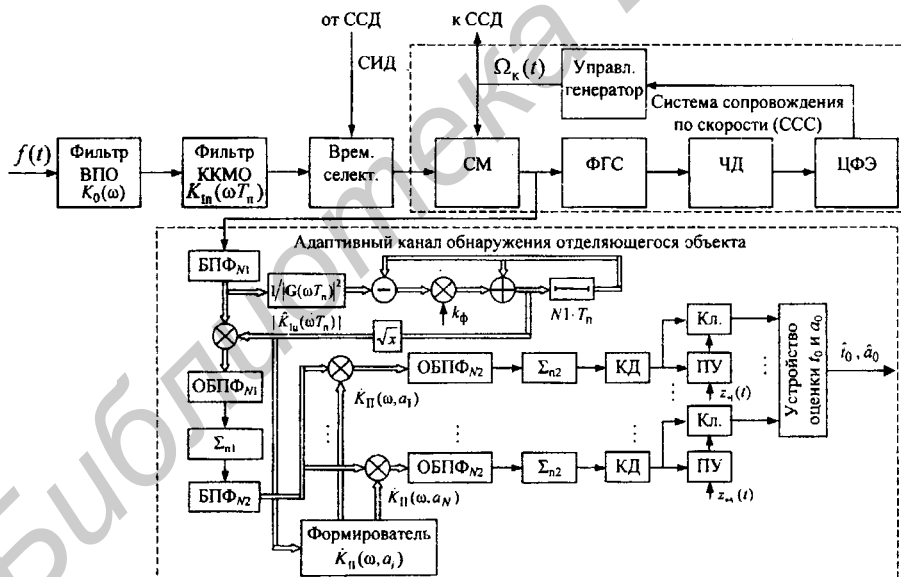


Рисунок 4 – Структурная схема адаптивного квазиоптимального обнаружителя отделяющегося объекта

С выхода смесителя сигнал подается на адаптивный цифровой обнаружитель отделяющегося объекта (АЦП на схеме не показан).

Данный канал реализует операции когерентной компенсации мешающего сигнала (самолета-носителя), когерентного накопления сигнала отделяющегося

объекта, принятия решения об обнаружении, а также оценки момента отделения \hat{t}_0 и начального ускорения объекта $\hat{a}_{t,0}$.

Системы сопровождения по скорости и дальности самолета-носителя устраняют априорные неопределенности относительно начальной дальности и частоты Доплера отделяющегося объекта.

Когерентная компенсация мешающего сигнала реализована путем свертки входных отсчетов с импульсной характеристикой «обесцвечивающего» фильтра в частотной области с использованием прямого и обратного быстрого преобразования Фурье (БПФ и ОБПФ). При этом реализуется секционированная свертка без наложения входных отсчетов с суммированием выходных.

Для реализации такой свертки протяженная входная последовательность $f(k)$ делится на смежные подпоследовательности $f_i(k)$ ($i = 0, 1, 2, \dots$) длиной по N_f отсчетов. Наиболее простой вариант – когда $N_f = N_{\text{ц}}$, где $N_{\text{ц}}$ – число отсчетов импульсной характеристики фильтра $v_{\text{ц}}(k)$. Перед БПФ входная подпоследовательность дополняется нулями до необходимого числа отсчетов $N_f \geq N_f + N_{\text{ц}} - 1$. Импульсная характеристика дополняется нулями аналогичным образом. Результат их БПФ $K_{\text{ц}}(\omega T_n)$ запоминается.

Вычисляются частичные свертки $w_i(k)$ импульсной характеристики $v_{\text{ц}}(k)$ с каждой из последовательностей $f_i(k)$. Длительности частичных сверток составят $2N_f - 1$ отсчетов. При этом i -я и $(i+1)$ -я частичные свертки перекрываются на участке длиной $N_f - 1$. Поэтому для получения конечного результата свертки $w(k)$ отсчеты частичных сверток на участках их перекрытия суммируются.

Рассмотренная структурная схема включает в себя также и канал оценки АЧХ фильтра когерентной компенсации мешающего сигнала.

На следующем этапе реализуется когерентное накопление ожидаемого сигнала в фильтре, квадрат амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) которого $|K_{\text{ц}}(\omega T_n)|^2$ определяется формой энергетического спектра ОС отделяющегося объекта, искаженного прохождением через обесцвечивающие фильтры помехи и мешающего сигнала. Центральная частота настройки фильтра определяется как $\Delta f_m / 2$, т.е. половина девиации частоты ОС отделяющегося объекта. Фазочастотная характеристика такого фильтра $\arg K_{\text{ц}}(\omega T_n)$ определяется имеющим параболическую форму фазочастотным спектром ожидаемого сигнала, взятого с обратным знаком и соответствующим фазовым сдвигом за счет запаздывания в фильтре.

Вследствие неопределенности ускорения объекта, в схеме реализован параллельный обзор в M каналах обработки ожидаемого сигнала по ускорению. Число параллельных каналов обработки определяется отношением максимального ожидаемого ускорения цели к допустимому разному между фильтрами.

Характеристики обнаружения отделяющегося объекта, полученные по результатам математического моделирования, приведены на рисунке 5. Число

отсчетов импульсной характеристики фильтра подавления мешающего сигнала равнялось 64, число когерентно накапливаемых импульсов – 512.

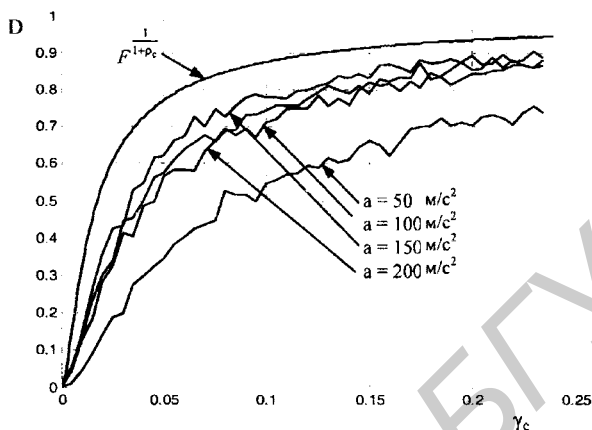


Рисунок 5 – Характеристики обнаружения адаптивного квазиоптимального обнаружителя отделяющегося объекта при $N_2=512$

Ухудшение характеристик обнаружения менее динамичных объектов обусловлено эффектом частичного «самоподавления» в фильтре когерентной компенсации мешающего сигнала, на формирование оценки АЧХ которого влияет полезный сигнал. Эффект «самоподавления» усиливается с увеличением времени пребывания полезного сигнала в одном и том же доплеровском фильтре и с повышением отношения сигнал–шум.

Для определения величины энергетических потерь при отклонениях закона изменения частоты Доплера от линейного было проведено математическое моделирование, исходя из результатов которого допустимое время когерентного накопления составило 50–100 мс. Для улучшения характеристик обнаружения необходимо дополнять когерентное накопление некогерентным.

Дальнейшее упрощение обработки ОС отделяющегося объекта было достигнуто при отказе от согласования частотной характеристики фильтра накопления с законом изменения частоты Доплера, т.е. к несогласованной (рассогласованной) обработке. При этом на этапе когерентного накопления использовалась обычная многоканальная узкополосная фильтрация в цифровой форме, реализуемая с помощью БПФ.

В результате такого упрощения наблюдался дальнейший рост энергетических потерь обнаружения, которые увеличивались с ростом относительной интенсивности мешающего сигнала. Причем разброс потерь для объектов с от-

личающимся ускорением обусловлен различным влиянием модуляционного фона на обнаруживаемый сигнал.

Было также проведено моделирование работы акустического обнаружителя, показавшее его пониженные на 3–10 дБ характеристики обнаружения, по сравнению с автоматическим (см. рисунок 4).

Предложена структура модифицированного акустического обнаружителя, содержащего фильтр когерентной компенсации планерной и модуляционных составляющих спектра мешающего сигнала, обеспечивающая потери в пороговом сигнале до 1–3 дБ.

В третьей главе рассмотрены требования к устройствам обзора по радиальному ускорению.

Число параллельных каналов обработки для ведения одновременного обзора определяется соотношением максимального ускорения цели и допустимой взаимной расстройки каналов.

Наиболее полную информацию о допустимых времячастотных рассогласованиях параметров ожидаемого сигнала несет его функция неопределенности (ФН) $\rho(\tau, F)$, где τ – рассогласование по времени, а F – по частоте. Для фиксированного времени когерентного накопления $T_{кн}$, определяющего длительность сигнала T_0 , введены дополнительные параметры ФН: частотные девиации ожидаемого Δf_m и опорного $\Delta f_m - dF$ сигналов, где dF – расстройка по девиации частоты.

Условную ФН прямоугольного импульса с линейной частотной модуляцией, зависящую от трех параметров τ , F и dF , по которым возможна расстройка при фиксированном значении Δf_m , можно записать в следующем виде:

$$\rho(\tau, F, dF | \Delta f_m) = \frac{1}{T_0^2} \left| \int_{-\infty}^{\infty} U_0(t, \Delta f_m) U_0^*(t - \tau, \Delta f_m - dF) e^{-i2\pi Ft} dt \right|^2. \quad (5)$$

Аналогичную ФН можно получить и для ЛЧМ сигнала, модулированного по амплитуде последовательностью коротких импульсов, длительностью T_0 . С учетом введенной в главе 1 аппроксимации, заменяющей частотную модуляцию поимпульсной фазовой, выражение для ФН имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \rho(\tau, F, dF | \Delta f_m) = & \frac{1}{N} \sum_{k,l=0}^{N-1} \exp\left(-i \left[\pi \frac{\Delta f_m}{N} (k^2 - l^2) T_n + \pi \frac{dF}{N} l^2 T_n \right]\right) \times \\ & \times \exp(-i2\pi F k T_n) \cdot \rho_0(\tau - [k-l]T_n, F), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\rho_0(\tau - [k-l]T_n, F)$ – нормированная функция рассогласования одиночного ППРИ, смещенная по τ на $[k-l]T_n$.

Анализ полученного выражения показал, что рассогласование по девиации частоты приводит к временному смещению максимума огибающей выход-

ного сигнала канала обработки и к появлению энергетических потерь. Так как эти смещения малы по сравнению со временем наблюдения, то диапазон взаимных расстроек каналов был оптимизирован для фиксированного значения энергетических потерь (например, 3 дБ), что привело к сокращению числа каналов обработки. С ростом абсолютного значения ускорения форма ФН искажается и значения расстроек уменьшаются. Уменьшаются расстройки и при малых значениях девиации частоты.

На рисунке 6 показаны вертикальные сечения ФН, определяемые выражением (6), при $F, dF, \Delta f_m = \text{const}$ и $\tau \geq 0$. Параметры сигнала следующие: длительность ППРИ 10 мкс, период повторения 50 мкс, число наблюдаемых импульсов – 32. Время когерентного накопления составляло 1.6 мс. Графики отнормированы к своему максимальному значению при $F, dF = 0$.

Показанное на рисунке 6,а сечение при нулевой девиации частоты совпадает с известным результатом для ограниченной пачки ППРИ.

Ширина огибающей по уровню 0.5 здесь обратно пропорциональна времени когерентного накопления, т.е. $1/LT_n$. При $\Delta f_m \neq 0$ ширина огибающей уменьшается до величины, обратно пропорциональной значению девиации частоты $1/\Delta f_m$ (см. рисунок 6,б для $\Delta f_m = 2500$ Гц).

С использованием полученных выражений для сечений ФН вертикальной плоскостью вдоль оси τ была разработана методика минимизации требований к числу каналов когерентной обработки при заданных ограничениях на радиальное ускорение отделяющейся цели, время когерентного накопления и энергетические потери.

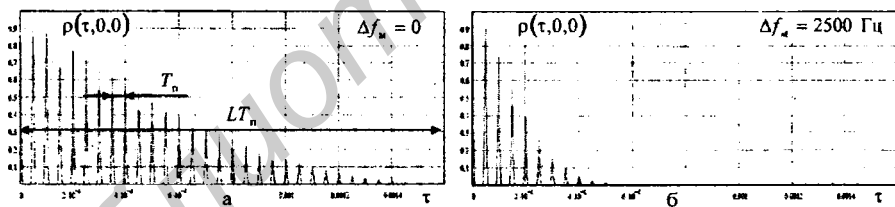


Рисунок 6 – Вертикальные сечения ФН $\rho(\tau, F, dF | \Delta f_m)_{F, dF=0}$

Методика включает в себя следующую последовательность действий:

1 Задать допустимые потери в отношении сигнал – шум на выходе устройства когерентной обработки за счет расстроек между каналами обработки по девиации частоты (радиальному ускорению объекта), которые обычно не должны превышать 3 дБ.

2 Задать время когерентного накопления сигнала, ограниченное сверху допустимыми энергетическими потерями, возникающими вследствие отклонения закона изменения частоты ОС от линейного.

3 Задать максимальное значение радиального ускорения отделяющегося объекта и соответствующую ему девиацию частоты ОС (для заданного времени когерентной обработки и длины волны). При обнаружении отделяющихся объектов с реактивными силовыми установками, например ПРР или крылатых ракет воздушного базирования, рассматривают только положительные ускорения. При необходимости обнаружения отделяющихся планирующих или нестабилизированных в полете объектов, например УАБ, необходимо рассматривать и отрицательные радиальные ускорения.

4 Задать максимальные допустимые ошибки сопровождения самолета-носителя по частоте Доплера.

5 Проводя расчеты сечений условной многопараметрической ФН вертикальной плоскостью вдоль оси τ при фиксированных значениях расстроек F и dF , определить значения настроек каналов обработки Δf_m и интервалов dF между ними, начиная от значения $\Delta f_m = 0$ до максимальной девиации $\Delta f_{m \max}$. При этом значения энергетических потерь при отклонении dF влево и вправо от настроек $\Delta f_m(k)$ и $\Delta f_m(k-1)$ k -го и $(k-1)$ -го каналов обработки не должны превышать заданных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Основные научные результаты диссертации состоят в следующем:

1 Разработана математическая модель вторичного излучения группы объектов: сопровождаемого и отделяющегося от него малозаметного объекта, учитывающая наличие вторичной модуляции объекта-носителя и разгонную динамику на начальном этапе отделения [7-А]. В качестве носителя рассмотрена модель самолета F-15, а в качестве отделяющегося объекта – модели ПРР «HARM» и управляемой авиационной бомбы. Такая модель позволила проанализировать особенности всех этапов обработки разрабатываемых устройств и получить характеристики обнаружения в различных условиях. В частности, предложена линейная аппроксимация закона изменения доплеровской частоты ОС отделяющегося объекта на ограниченном временном интервале.

Предложена математическая модель временной структуры, корреляционной функции и энергетического спектра ОС отделяющегося объекта. Такая модель может быть представлена как ОС от цели, летящей с постоянной радиальной скоростью, для зондирующего сигнала в виде последовательности коротких ППРИ с квадратичным законом междупериодного изменения фазы, обу-

словленным малой девиацией частоты (десятки герц – единицы килогерц) за время когерентной обработки.

2 Разработаны алгоритмы работы, структуры оптимальных и квазиоптимальных устройств обнаружения отделяющегося объекта на фоне мешающих сигналов с адаптацией к их параметрам, отличающиеся наличием адаптивного устройства когерентной компенсации мешающего сигнала и согласованием когерентного накопителя с линейным законом изменения частоты Доплера отраженного сигнала, позволившие обеспечить близкие к потенциальным характеристики обнаружения на фоне мешающего сигнала, на 17–30 дБ превышающего полезный, и впервые решить задачу автоматического обнаружения малоразмерного высокочастотного отделяющегося объекта, не разрешаемого с самолетом-носителем по угловым координатам и дальности [7-А].

Обнаружитель отделяющегося объекта может быть частично совмещен (этапами внутрипериодной обработки и когерентной компенсации мешающих отражений) со следящим измерителем частоты Доплера с последующими автономной компенсацией мешающего сигнала (сопровождаемой цели); согласованной многоканальной по неизвестному радиальному ускорению обработкой сигнала; принятием решения с одновременной оценкой момента отделения и радиального ускорения [5-А, 10-А].

Неизвестная априори форма АЧХ устройства компенсации мешающего сигнала может быть оценена с использованием экспоненциального сглаживающего фильтра [3-А]. Потери на такую адаптацию растут с уменьшением ускорения отделяющегося объекта и ухудшением разрешения по частоте.

Возникающие энергетические потери на нелинейность закона изменения частоты Доплера отделяющегося объекта могут быть частично скомпенсированы сочетанием когерентной и некогерентной обработки [4-А, 6-А].

Возможно использование вместо согласованной когерентной обработки несогласованной с сигналом узкополосной фильтрации. Возникающее при этом упрощение обработки сигнала «компенсируется» снижением показателей качества обнаружения, особенно по объектам с большими ускорениями, вследствие эффекта «рассыпания» отраженного сигнала по узкополосным фильтрам за время когерентного накопления.

Проведено моделирование работы акустического обнаружителя [1-А, 8-А, 9-А], показавшее его пониженные характеристики по сравнению с оптимизированной структурой. В частности, потери в пороговом отношении сигнал – шум составили 3–10 дБ.

Предложенная структура модифицированного акустического обнаружителя, содержащего перед фазовыми детекторами фильтр когерентной компенсации не только планерной, но и модуляционных составляющих спектра ме-

шающего сигнала, продемонстрировала снижение потерь в пороговом сигнале до 1–3 дБ.

3 Получены выражения для условных функций неопределенности непрерывного ЛЧМ и дискретно кодированных по фазе сигналов, отличающиеся от ранее использовавшихся зависимостей учетом рассогласования по девиации частоты и позволяющие определять форму выходных сигналов устройства когерентной обработки [2-А]. Разработана методика минимизации требований к числу каналов обработки при заданных ограничениях на радиальное ускорение отделяющейся цели, время когерентного накопления и энергетические потери.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ

1 Алгоритмы и структуры устройств адаптивного обнаружения отделяющихся объектов, полученные в ходе диссертационных исследований, могут быть в дальнейшем использованы при разработке и совершенствовании РЛС точного измерения координат [12-А].

2 Разработанная математическая модель сопровождаемой цели и отделяющегося от нее объекта может быть использована для исследования алгоритмов и устройств обнаружения, измерения, распознавания и разрешения.

3 Разработанные математические описания временной структуры ОС отделяющегося объекта, его корреляционной функции и энергетического спектра могут быть использованы для получения алгоритмов автоматического захвата на сопровождение маневрирующих объектов.

4 Модифицированный акустический обнаружитель отделяющегося объекта с каналом адаптивной компенсации мешающего сигнала сопровождаемой цели может быть использован для совершенствования РЛС точного измерения координат при отсутствии экономической целесообразности использования более дорогого автоматического обнаружителя.

5 Результаты исследования условных многопараметрических функций неопределенности могут использоваться для минимизации требований к числу каналов обработки автоматического обнаружителя отделяющихся объектов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Результаты исследования опубликованы в научных статьях, а также в сборниках докладов по материалам конференций и семинаров.

Статьи в рецензируемых журналах:

1-А Аль-Желили, Б. Автоматическое и акустическое обнаружение отделяющихся объектов на фоне модуляционных компонентов отраженного сигнала / Б. Аль-Желили, С. А. Горшков // Доклады БГУИР. – 2006. – №2 (14). – С. 30–36.

2-А Аль-Желили, Б. Обзор по радиальному ускорению в задачах радиолокационного наблюдения отделяющихся объектов / Б. Аль-Желили, С. А. Горшков // Доклады БГУИР. – 2006. – №3 (15). – С. 18–23.

3-А Аль-Желили, Б. Адаптивное обнаружение отделяющихся объектов на фоне модуляционных компонентов отраженного сигнала / Б. Аль-Желили // Вестник Белорусской инженерной академии. – 2006. – №1(21)/3. – С. 147–150.

4-А Аль-Желили, Б. Обнаружение отделяющихся объектов на фоне модуляционных компонентов отраженного сигнала / Б. Аль-Желили, С. А. Горшков // Вестник Военной академии Республики Беларусь. – 2006. – №3 (12). – С. 18–23.

5-А Горшков, С. А. Анализ характеристик цифровых адаптивных устройств принятия решения / С. А. Горшков, Б. Аль-Желили // Прикладная радиоэлектроника. – 2006. – Т.5. – №3. – С. 405–407.

Материалы конференций:

6-А Горшков, С. А. Моделирование показателей качества разрешения сигналов при использовании адаптивных устройств принятия решения / С. А. Горшков, Б. Аль-Желили // Сб. докл. Седьмой военно-науч. конф. Военной академии Республики Беларусь, Минск, 26–27 января 2005 г. / ВА РБ. – Минск, 2005. – С. 137–141.

7-А Аль-Желили, Б. Оптимальное разрешение разделяющихся объектов на фоне помех с учетом влияния ротационной модуляции отраженного сигнала / Б. Аль-Желили // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития : Сб. науч. трудов 2-го Международного радиоэлектронного форума. Харьков, Украина, 19–23 сент. 2005 г. – Харьков : ХНУРЭ, 2005. – Т.2. – С. 213–214.

8-А Аль-Желили, Б. Обнаружение отделяющихся объектов на фоне модуляционных компонентов отраженного сигнала: человек или автомат? / Б. Аль-Желили, С. А. Горшков // Сб. докл. Восьмой научно-технической конф.

Военной академии Республики Беларусь, Минск, 30–31 марта 2006 г. / ВА РБ. – Минск, 2006. – С. 189–195.

Тезисы докладов:

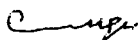
9-А Аль-Желили, Б. Обнаружение отделяющихся объектов на фоне модуляционных компонентов отраженного сигнала: человек или автомат? / Б. Аль-Желили, С. А. Горшков // Сб. тез. докл. Восьмой военно-науч. конф. Военной академии Республики Беларусь (30–31 марта 2006 г.). Отв. за выпуск Т. Я. Талалейкина. – Минск : ВА РБ, 2006 г. – С. 230. Инв. № 1455/1 (436 с.).

10-А Аль-Желили, Б. Обнаружение отделяющихся объектов на фоне модуляционных компонентов отраженного сигнала / Б. Аль-Желили // Материалы 10-го юбилейного международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (10–12 апреля 2006 г.). Отв. за выпуск М. И. Слипченко, О. С. Булавина. – Харьков : ХНУРЭ, 2006 г. – С. 29.

11-А Аль-Желили, Б. Адаптивное обнаружение отделяющихся объектов на фоне модуляционных компонентов отраженного сигнала / Б. Аль-Желили, С. А. Горшков // Материалы 1-й междунар. конф. «Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития» (3–6 октября 2006 г.). Отв. за выпуск М. И. Слипченко, О. С. Булавина. – Харьков – Туапсе, РФ, 2006 г. – С. 428–429.

Отчеты о НИР:

12-А Алгоритмическое обеспечение тактических характеристик РЛС кругового обзора и точного измерения координат с цифровой обработкой сигналов: отчет о НИР «Алгоритм 2006» (промежуточный) / УО «ВА РБ» ; С. А. Горшков, Б. Аль-Желили, С. Ю. Седышев, А. С. Солонар, М. В. Крикливый, В. Н. Завиженец – Минск, 2006. – 72с. Рег. № 20064703 от 09.08.2006.



Радыёлакацыйнае выяўленне малапамерных аб'ектаў, якія аддзяляюцца ад суправаджаемай цэлі на фоне перашкаджальных сігналаў.

Ключавыя словы: адбіты сігнал, аб'ект, які аддзяляецца, дэвіацыя частаты, частата Доплера, перашкаджальны сігнал, аптымальная апрацоўка, рэжэкцыя, наапапенне, функцыя разузгаднення.

Распрацаваны эфектыўны метадад выяўлення малапамернага аб'екта, які аддзяляецца ад суправаджаемай цэлі на фоне перашкаджальных сігналаў, які заснаваны на тэорыі квазіпоўнага распазнавання-выяўлення. У працы атрыманы наступныя новыя навуковыя вынікі.

1. Матэматычная мадэль адбітага сігнала ад суправаждаемага аб'екта і аб'екта, які аддзяляецца ад яго, якая вызначаецца ўлікам тонкай структуры адбітага сігнала, у тым ліку эфектаў ратацыйнай мадуляцыі, а таксама дынамікі руху аб'ектаў у турбулентнай атмасферы, і дазваляе выяўляць узаемасувязь усіх фізічных з'яў і працэсаў, якія ўплываюць на прынцыпы пабудовы і характарыстыкі выяўляльніка аб'ектаў, якія аддзяляюцца.

2. Алгарытмы працы, структура і паказчыкі якасці аптымальных і квазіаптымальных прыстасаванняў выяўлення аб'екта, які аддзяляецца, на фоне перашкаджальных сігналаў з адаптацыяй да іх параметраў, якія вызначаюцца наяўнасцю адаптыўнага прыстасавання кагерэнтнай кампенсацыі перашкаджальнага сігнала і узгадненнем кагерэнтнага наапапляльніка з лінейным законам змянення частаты Доплера адбітага сігнала, якія дазваляюць забяспечыць блізкія да патэнцыяльных характарыстыкі выяўлення на фоне перашкаджальнага сігнала, які на 30 дБ перавышае карысны, што на 10–20 дБ пераўзыходзіць магчымасці прыстасаванняў, распрацаваных раней.

3. Умоўная функцыя нявызначанасці ЛЧМ-сігнала, якая адрозніваецца ад раней выкарыстоўваемых залежнасцей улікам разузгаднення па дэвіацыі частаты і дазваляе вызначыць форму выхадных сігналаў, а таксама метадыка мінімізацыі патрабаванняў да колькасці каналаў апрацоўкі.

Атрыманыя алгарытмы і структуры прыстасаванняў могуць быць выкарыстаны для павышэння інфарматыўнасці мадэрнізуемых і новых радыёлакацыйных сістэм.

РЕЗЮМЕ

Башир Мухамед Желили

Радиолокационное обнаружение малоразмерных объектов, отделяющихся от сопровождаемой цели на фоне мешающих сигналов

Ключевые слова: отраженный сигнал, отделяющийся объект, девиация частоты, частота Доплера, мешающий сигнал, оптимальная обработка, режекция, накопление, функция рассогласования.

Разработан эффективный метод обнаружения малоразмерного отделяющегося объекта от сопровождаемой цели на фоне мешающих сигналов, основанный на теории квазиполного разрешения–обнаружения. В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Математическая модель отраженного сигнала от сопровождаемого и отделяющегося от него объектов, отличающаяся учетом тонкой структуры отраженного сигнала, в том числе эффектов ротационной модуляции, а также динамики движения объектов в турбулентной атмосфере и позволяющая вскрывать взаимосвязь всех физических явлений и процессов, влияющих на принципы построения и характеристики обнаружителя отделяющихся объектов.

2. Алгоритмы работы, структуры и показатели качества оптимальных и квазиоптимальных устройств обнаружения отделяющегося объекта на фоне мешающих сигналов с адаптацией к их параметрам, отличающиеся наличием адаптивного устройства когерентной компенсации мешающего сигнала и согласованием когерентного накопителя с линейным законом изменения частоты Доплера отраженного сигнала, позволяющие обеспечить близкие к потенциальным характеристики обнаружения на фоне мешающего сигнала, на 30 дБ превышающего полезный, что на 10–20 дБ превышает возможности разработанных ранее устройств.

3. Условная функция неопределенности ЛЧМ сигнала, отличающаяся от ранее использовавшихся зависимостей учетом рассогласования по девиации частоты и позволяющая определить форму выходных сигналов, а также методика минимизации требований к числу каналов обработки.

Полученные алгоритмы и структуры устройств могут быть использованы для повышения информативности модернизируемых и новых радиолокационных систем.

SUMMARY

Basher Mohamed Gelili

Radar detection of small object which is separated from the tracked target, on the background of interfering signals

Keywords: reflected signal, separated object, frequency deviation, Doppler frequency, interfering signal, optimum processing, rejection, integration, mismatching function.

We developed an effective method for the detection of a small separated object which is separated from the tracked target on the background of interfering signals, based on the theory quasicomplete detection and resolution. In this work we have received the following new scientific results.

1. The mathematical model of a reflected signal from the tracked target and object separated from it, which differ in a fine structure of a reflected signal, including effects of rotational modulation and dynamic movement of object in the turbulent atmosphere which shows the intercoupling of all physical phenomena and the processes, influencing principles of construction and the characteristic of detection of a small separated object.

2. Operating Algorithms, quality factors, and structures of optimum and quasioptimum detection devices of separating object on the background of interfering signals, with adaptation to their parameters, such devices differ by the presence of adaptive device coherent compensation of interfering signals, and by the coherent integrator matched with linear law of change of Doppler frequency of reflected signal, which allow to get close to potential detection characteristic on the background of interfering signals exceeding by 30 dB useful one, and increase the capability of the old devices by 10–20 dB .

3. The conditional ambiguity function of chirp signal which differ from the old used relations, by considering the mismatching of the frequency deviation, allows to define (determine) the form of output signals, and to get the method of minimization the required number of processing channels .

The received algorithms and devices structures can be used to increase the capability of modernized and new radar systems.

Башир Мухамед Ахмед Желили

**РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ
ОБЪЕКТОВ, ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ОТ СОПРОВОЖДАЕМОЙ
ЦЕЛИ, НА ФОНЕ МЕШАЮЩИХ СИГНАЛОВ**

Специальность 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства радиолокации, радионавигации и телевидения»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать	14.05.2007.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.		Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 65 экз.		Заказ 327.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6.