

На правах рукописи



Козлов Дмитрий Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ  
ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ С НЕЛИНЕЙНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ  
ДОПЛЕРОВСКОЙ ФАЗЫ**

05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»  
05.12.14 «Радиолокация и радионавигация»

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань 2014

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем  
в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический  
университет»

Научный руководитель: Кошелев Виталий Иванович —  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Брюханов Юрий Александрович — док-  
тор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой Динамики элек-  
тронных систем ФГБОУ ВПО «Яро-  
славский государственный университет  
им. П.Г. Демидова»;

Колядов Дмитрий Валерьевич — док-  
тор технических наук, доцент кафедры  
Технической эксплуатации радиоэлек-  
тронного оборудования воздушного  
транспорта ФГБОУ ВПО «Московский  
государственный технический универ-  
ситет гражданской авиации»

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

Защита диссертации состоится 19 ноября 2014 г. в 12 часов на заседа-  
нии 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 ФГБОУ ВПО  
«РГРТУ»

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



Г.В. Овечкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время радиотехнические системы (РТС) применяются в различных областях науки и техники, находят гражданское и военное применение. Ряд прикладных радиотехнических задач связан с выделением информативных сигналов с нелинейным заранее неизвестным законом изменения фазы на фоне широкополосных и узкополосных помех.

Такой характер имеют сигналы, отраженные движущимися элементами, в РТС автоматической диагностики газотурбинных двигателей, что позволяет выдавать информацию об их состоянии в процессе эксплуатации без разборки силовой установки. Для повышения точности измерений, проводимых такими системами, необходим учет наличия производных доплеровской частоты. Даже при равномерном вращении из-за близости расположения измерительной системы и движущихся частей изменение ракурса приводит к появлению составляющих радиального ускорения, что является причиной нелинейного изменения доплеровской частоты. Также необходимо учитывать межпериодные фазовые набегги, вызванные ускорением, при определении параметров орбиты спутников, где для надежного обнаружения и измерения параметров обычно требуется длительное накопление.

Определенную аналогию имеют задачи различения объектов на фоне подстилающей поверхности в системах селекции движущихся целей. При достаточно высокой скорости движения объекта отраженный от него сигнал попадает в область, где влияние пассивной помехи мало. Однако при обнаружении медленно движущихся объектов сигналы, отраженные от них, попадают в режектируемую зону доплеровских частот. В этом случае отличительным признаком может являться ускорение движущегося объекта. Аналогично режекции по доплеровским частотам, не учитывая сигналы, отраженные от объектов с ускорением, близким к нулевому, могут быть обнаружены объекты, начинающие движение или обладающие признаками переменного движения (люди, животные).

На современном уровне развития авиационной техники среди множества типов летательных аппаратов (ЛА) можно выделить так называемые сверхманевренные летательные аппараты. Сверхманевренность присуща всем истребителям четвертого и пятого поколений: Су-27, Су-30, Су-35, Су-37, МиГ-35, F/A-18E/F, F-22, F-35, ПАК ФА, J-20. Кроме того, широкие возможности для создания сверхманевренных ЛА появляются с развитием беспилотных ЛА. Таким образом, сверхманевренность рассматривается как одна из основ концепции построения современных ЛА.

Сверхманевренность позволяет двигаться объектам со значительными радиальными ускорениями, что приводит к нелинейному изменению доплеровской фазы отражаемого сигнала. С технической точки зрения изменение радиальной скорости наблюдаемого объекта в течение длительности пачки, а соответственно и доплеровской частоты, приводит к невозможно-

сти когерентного накопления в пределах скоростного канала. В результате падают показатели качества обнаружения. По этой же причине невозможно увеличение времени накопления для повышения дальности действия РТС.

**Степень разработанности темы.** В области многоканальной фильтрации сигналов, в том числе и с нелинейным изменением доплеровской фазы, известно множество работ таких авторов, как Лукошкин А.П., Артемьева А.И., Сапрыкин В.А., Кузменков Ю.В., Сосулин Ю.Г., Логинов В.М., Меркулов В.И., Самарин О.Ф., Kapriel Krikorian, Winthrop Whitman Smith, Theagenis J. Abatzoglou.

Основным способом модификации устройств многоканальной обработки с целью повышения эффективности фильтрации сигналов с нелинейным изменением доплеровской фазы является введение многоканальности по ускорению, при этом возникает ряд проблем, связанных с уровнем ложных тревог, потерями в пороговом отношении сигнал-(помеха+шум) ( $s-(п+ш)$ ), количеством вычислительных операций. Работы данных авторов в той или иной степени направлены на минимизацию проблем, вызванных введением дополнительной многоканальности по ускорению, и обладают рядом недостатков, заключающихся в снижении точности оценки скорости и ускорения, ограничением возможности работы в многоцелевой обстановке, потерями на некогерентное накопление.

**Цель и задачи работы.** Цель работы заключается в повышении выигрыша в отношении  $s-(п+ш)$  по сравнению с известными системами многоканальной доплеровской фильтрации, что, в частности в радиолокации, приводит к большей вероятности правильного обнаружения радиосигналов высокоманевренных объектов, а в системах диагностики – к повышению эффективности оценки состояния анализируемой системы.

Для достижения обозначенных целей необходимо решить следующие задачи:

- 1) проанализировать существующие алгоритмы и устройства выделения радиосигналов с нелинейным характером изменения доплеровской фазы и выявить их основные недостатки и резервы повышения эффективности;
- 2) оценить влияние количества каналов ускорения и параметров их настройки на качественные характеристики алгоритмов обработки сигналов в многоканальном фильтре;
- 3) оптимизировать число каналов ускорения и параметры каналов обработки при условии фиксированных потерь в пороговом сигнале при выделении сигналов с нелинейным изменением доплеровской фазы на фоне коррелированной помехи;
- 4) разработать адаптивный алгоритм выделения сигнала маневрирующего объекта, движущегося с переменным ускорением, более эффективный, чем известные алгоритмы;
- 5) усовершенствовать алгоритм сопровождения до обнаружения

[track-before-detect (TBD)], обеспечивающий повышение эффективности выделения траектории высокоманевренного малоразмерного объекта по сравнению с традиционными двухэтапными алгоритмами первичной и вторичной обработки сигналов.

**Научная новизна** диссертации заключается в следующем:

1) разработан новый алгоритм оптимизации числа и параметров настройки каналов ускорения по критерию максимума средней по доплеровским сдвигам частоты вероятности обнаружения [коэффициента улучшения отношения с-(п+ш)] сигнала на фоне коррелированной помехи и некоррелированного шума;

2) разработан новый, более эффективный, чем известные, алгоритм выделения радиосигналов высокоманевренных объектов с адаптацией к межпериодным набегам фаз, обусловленным ускорением;

3) усовершенствован известный алгоритм TBD (сопровождения до обнаружения), что обеспечило повышение эффективности его применения для выделения радиосигналов с нелинейным характером изменения доплеровской фазы.

**Теоретическая и практическая значимость** заключается:

1) в определении параметров сигналов и движения объектов, при которых необходимо учитывать нелинейность изменения доплеровской фазы при построении РТС;

2) в сравнительном анализе характеристик обнаружения и вычислительной сложности существующих алгоритмов;

3) в анализе влияния многоканальности на эффективность алгоритмов;

4) в разработке алгоритма оптимизации числа каналов ускорения и их параметров при выделении радиосигналов на фоне шума и коррелированной помехи, позволяющего получить выигрыш в пороговом отношении с-(п+ш) до 4 дБ или в количестве вычислительных операций в 1,43 раза по сравнению со случаем равномерной фазовой настройки каналов при нормированной к периоду повторения ширине спектра флуктуаций помехи 0,3, числе импульсов в пачке 32, вероятности ложной тревоги  $10^{-3}$ ;

5) в разработке алгоритма выделения радиосигналов маневрирующих объектов с адаптацией к квадратичным межпериодным набегам фаз, позволяющего получить выигрыш в пороговом отношении с-(п+ш) до 3 дБ или в количестве вычислительных операций в 2,29 раз по сравнению с многоканальным неадаптивным алгоритмом при числе импульсов в пачке 512, вероятности ложной тревоги  $10^{-3}$ ;

6) в разработке многоэтапного алгоритма TBD, позволяющего выделять траектории малоразмерных объектов при пороговых отношениях до -13 дБ при вероятности правильного обнаружения 0,9, числе импульсов в пачке 64, вероятности ложной тревоги  $10^{-3}$ .

**Внедрение научных результатов.** Результаты диссертационной рабо-

ты внедрены в промышленную разработку ОП НИИ «Рассвет» – ОАО «Корпорация «Фазотрон–НИИР», г. Рязань, и в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» при преподавании дисциплин «Теоретические основы радиоэлектронной борьбы», «Проектирование средств помехозащиты РЛС», «Радиолокационные системы», «Теория и техника радиолокации и радионавигации» в том числе в форме программного обеспечения к лабораторным работам, что подтверждено соответствующими актами.

**Методология и методы исследования.** Анализ полученных результатов проводился с помощью методов статистической теории радиотехники и компьютерного имитационного моделирования. В частности, использовались методы линейной алгебры, матричных вычислений собственных значений и векторов матриц и имитационное моделирование методом Монте-Карло.

**Основные положения,** выносимые на защиту:

1) алгоритм оптимизации количества каналов ускорения и их фазовой настройки доплеровского фильтра выделения радиосигналов, позволяющий получить выигрыш в пороговом отношении  $c-(п+ш)$  до 4 дБ по сравнению со случаем равномерной фазовой настройки каналов при нормированной к периоду повторения ширине спектра флуктуаций помехи 0,3, числе импульсов в пачке 32, вероятности ложной тревоги  $10^{-3}$ ;

2) алгоритм выделения радиосигналов маневрирующих объектов с адаптацией к квадратичным межпериодным сдвигам фаз, позволяющий получить выигрыш в пороговом отношении  $c-(п+ш)$  до 3 дБ по сравнению с многоканальным неадаптивным алгоритмом при числе импульсов в пачке 512 и вероятности ложной тревоги  $10^{-3}$ ;

3) многоэтапный алгоритм TBD, позволяющий выделять траектории малоразмерных (высокоманевренных) объектов при пороговых отношениях до -13 дБ при вероятности правильного обнаружения 0,9, числе импульсов в пачке 64, вероятности ложной тревоги  $10^{-3}$ .

**Степень достоверности работы подтверждается апробацией результатов** в виде научных докладов и дискуссий на следующих конференциях и конкурсах.

1. 14-я международная конференция DSPA-2012 (г. Москва).
2. Международная заочная научно-практическая конференция «Наука и техника в современном мире», 2012 г. (г. Новосибирск).
3. 7-й всероссийский конкурс инновационных проектов студентов, аспирантов и молодых ученых, 2012 г. (г. Москва).
4. Всероссийский смотр-конкурс научно-технического творчества студентов вузов «Эврика», 2012 г. (г. Новочеркасск).
5. 3-и всероссийские Армандовские чтения, 4-я всероссийская научная конференция, 2013 г. (г. Муром).
6. 2-я средиземноморская конференция по встраиваемым вычисли-

- тельными системам МЕСО-2013 (г. Будва, Черногория).
7. 10-я международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2013 (г. Красноярск).
  8. 22-я международная конференция «Современное телевидение и радиоэлектроника», 2014 г. (г. Москва).
  9. 10-я международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2014», 2014 г. (г. Севастополь).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 2 статьи в журналах из списка рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 2 статьи в межвузовских сборниках научных трудов, 9 тезисов докладов на конференциях и конкурсах, из них 2 расширенных текстов докладов, включенных в реферативную базу SCOPUS, выдано два свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения и приложений. Общий объем диссертации составляет 117 страниц, включая список используемых источников.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** показаны актуальность работы и степень разработанности темы, обозначена цель работы и поставлены задачи, необходимые для ее решения. Кроме того, во введении показано, в чем заключается научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описаны методология и методы исследования, используемые в работе для анализа полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, перечислены научные мероприятия, на которых проводилась апробация работы, и публикации по теме работы. Также во введении отмечено, что результаты работы внедрены в учебный и производственный процессы.

**В первом разделе** определены параметры сигналов и свойства объектов, при которых необходим учет ускорения для повышения эффективности фильтрации сигналов с нелинейным изменением доплеровской фазы, произведен обзор и анализ существующих методов и алгоритмов выделения таких сигналов, приведена их классификация. Показано, что снижение вычислительной сложности в многоканальных по ускорению алгоритмах происходит при снижении эффективности обнаружения и разрешения по скорости и ускорению. Также в первом разделе выбрано направление исследования, заключающееся в разработке неадаптивных и адаптивных многоканальных по скорости и ускорению алгоритмов с компенсацией ускорения до операции быстрого преобразования Фурье.

**Во втором разделе** описаны критерии синтеза алгоритмов доплеровской фильтрации сигналов на фоне шумов и коррелированных помех и обоснован выбор критериев, используемых в работе. Произведен синтез алгоритма оптимизации числа каналов ускорения и их параметров, позво-

ляющий повысить эффективность выделения сигналов с нелинейным изменением доплеровской фазы на фоне шума и коррелированной помехи. Разработан алгоритм обнаружения маневрирующего объекта с адаптацией к квадратичным межпериодным фазовым набегам, позволяющий кроме повышения эффективности обнаружения увеличить точность оценки ускорения. Произведена разработка многоэтапного алгоритма ТВД с многоканальностью по ускорению, также позволяющего повысить эффективность выделения слабого сигнала с нелинейным изменением доплеровской фазы.

Критерием при выборе оптимального (минимально необходимого) числа каналов ускорения и их параметров в многоканальной по скорости и ускорению системе являются потери в пороговом отношении (ПО) с-(п+ш) относительно случая точной настройки канала на неизвестный параметр, определяемые в  $m$ -м канале ускорения как:

$$\Delta q_m = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} \frac{q_{m,l}}{q_{\min}}, \quad (1)$$

где  $q_{m,l} = \frac{d}{\mu_{m,l}}$  – ПО с-(п+ш) в  $m$ -м канале ускорения и  $l$ -м канале скорости,  $\mu_{m,l}$  – коэффициент улучшения отношения с-(п+ш) усредненный в

пределах ширины  $m$ -го канала ускорения и  $l$ -го канала скорости,

$$d = \frac{\ln(F/LM)}{\ln(D)} - 1, \quad F - \text{вероятность ложной тревоги, } D - \text{вероятность пра-}$$

вильного обнаружения,  $L$  – число каналов скорости,  $M$  – число каналов ускорения,  $q_{\min}$  – минимально достижимое ПО с-(п+ш).

При этом цель оптимизации при фиксированном значении потерь в ПО с-(п+ш) минимизировать число каналов ускорения за счет их неравномерной настройки и весовой обработки.

Усредненный максимальный коэффициент улучшения и соответствующий ему вектор весовых коэффициентов  $\mathbf{w}'_{m,l}$  в  $m$ -м канале ускорения и  $l$ -м канале скорости может быть найден из уравнения:

$$\left\{ \left\{ \mu \right\}_{m=0}^{M-1} \right\}_{l=0}^{L-1} = \max_{\mathbf{w}'_{m,l}} \frac{\mathbf{w}'_{m,l}{}^T \mathbf{R}'_{m,l}{}^c \mathbf{w}'_{m,l}}{\mathbf{w}'_{m,l}{}^T \mathbf{R}'_{m,l}{}^n \mathbf{w}'_{m,l}},$$

где  $\mathbf{R}'_{m,l}{}^c$  –  $N$ -мерная матрица с элементами:

$$R'_{j,k}{}^c = \rho_{j,k}^c \operatorname{sinc} \left[ \frac{(j-k)\Delta\Psi_l}{2} \right] \operatorname{sinc} \left[ \frac{(j^2-k^2)\Delta\Psi'_m}{4} \right],$$

$N$  – число импульсов в пачке,  $\Delta\Psi'_m$  и  $\Delta\Psi_l$  – ширина  $m$ -го канала ускорения



и ширина  $l$ -го канала скорости соответственно,  $\mathbf{R}'_{m,l}$  –  $N$ -мерная матрица с элементами:

$$R'_{j,k} = \rho_{j,k}^n \exp \left[ -i \left( (j-k)\psi_l + \frac{(j^2 - k^2)\Psi'_m}{2} \right) \right],$$

$\Psi'_m$  и  $\psi_l$  – настройки  $m$ -го канала ускорения и  $l$ -го канала скорости на межпериодные набеги фаз, обусловленные ускорением и скоростью соответственно,  $\rho_{j,k}^c$  и  $\rho_{j,k}^n$  – межпериодные коэффициенты корреляции сигнала и помехи соответственно.

Таким образом, величина  $\mu_{m,l}$  равна максимальному собственному значению матрицы  $\mathbf{Q}'_{m,l} \mathbf{R}'_{m,l} \mathbf{Q}'_{m,l}$ , где  $\mathbf{Q}'_{m,l}$  – матрица, обратная матрице  $\mathbf{R}'_{m,l}$ , а соответствующий ему правый собственный вектор является вектором  $\mathbf{w}'_{m,l}$ .

Минимально достижимое ПО с-(п+ш) в соответствии с выбранным критерием определяется при точной настройке на межпериодный фазовый набег, обусловленный ускорением:

$$q_{\min} = \frac{d'}{\sum_{l=0}^{L-1} \int_{\Phi'_c, \psi_l - \Delta\psi_l/2}^{\psi_l + \Delta\psi_l/2} \mu_{m,l}(\phi_c, \phi'_c) P(\phi_c, \phi'_c) d\phi_c d\phi'_c},$$

где  $d' = \frac{\ln(F/L)}{\ln(D)} - 1$ ,  $\Phi'_c$  – априорный диапазон изменения межпериодного набега фаз, обусловленного ускорением,  $P(\phi_c, \phi'_c)$  – априорная совместная плотность распределения вероятностей межпериодных набегов фаз, обусловленных скоростью и ускорением.

Алгоритм оптимизации числа каналов ускорения и их параметров является итерационным. Входными данными алгоритма являются вероятность ложной тревоги, вероятность правильного обнаружения, отношение компонент шума и коррелированной составляющей помехи по мощности, нормированная к периоду повторения ширина спектра флуктуаций помехи, нормированная к периоду повторения ширина спектра флуктуаций сигнала, априорный диапазон изменения межпериодного набега фаз, обусловленного ускорением, допустимые потери в ПО с-(п+ш). На первом этапе в соответствии с (1) вычисляются потери в ПО с-(п+ш) для случая, когда весь априорный диапазон межпериодных набегов фаз, обусловленных ускорением, обрабатывается в одном канале. Если полученное значение оказыва-

ется больше допустимого, то диапазон межпериодных набегов фаз, обрабатываемых каналом, уменьшается, и процедура повторяется до тех пор, пока потери в ПО с-(п+ш) не станут меньше или равными допустимому значению. Затем добавляется новый канал, ширина которого равна оставшемуся непокрытому каналами ускорения диапазону межпериодных набегов фаз. При этом введение нового канала вызывает необходимость повторной оптимизации предыдущих каналов, так как изменяется величина порога для сохранения уровня ложных тревог на прежнем уровне. Это видно из зависимости параметра  $d$  от числа каналов. Далее вышеописанные процедуры повторяются, пока не будет перекрыт весь априорный диапазон изменения межпериодных набегов фаз, обусловленных ускорением. На выходе алгоритма оптимизации получаем для каждого  $m$ -го канала ускорения векторы обработки.

При разработке алгоритма обнаружения маневрирующего объекта с адаптацией к квадратичным межпериодным фазовым набегам, обусловленным ускорением, используется тот факт, что при расширении доплеровского спектра сигнала снижение уровня сигнала в канале, соответствующем начальному значению скорости, зависит от величины рассогласования между истинным значением межпериодного набегу фаз, обусловленного ускорением, и настройкой канала ускорения. То есть среди всех каналов ускорения уровни сигналов  $|\hat{z}_j|$  будут максимальны в двух каналах, настройки которых наиболее близки к межпериодному набегу фаз, вызванному истинным ускорением [рисунок 1 – каналы ускорения  $m=1$  ( $\psi'_1 = 0,4 \cdot 10^{-4} \pi$ ) и  $m=2$  ( $\psi'_2 = 0,6 \cdot 10^{-4} \pi$ ), межпериодный набег фаз сигнала, обусловленный ускорением  $\phi'_c = 0,5 \cdot 10^{-4} \pi$ ,  $N=512$ , отношение сигнал-шум 0 дБ]. Следовательно, выбирая значения настроек двух соседних каналов ускорения, в которых наблюдаются максимумы амплитудных спектров, могут быть определены границы отрезка, внутри которого лежит истинный межпериодный фазовый набег, обусловленный ускорением. В ситуации, изображенной на рисунке 1, нижней и верхней границами отрезка являются межпериодные фазовые набегу  $0,4 \cdot 10^{-4} \pi$  и  $0,6 \cdot 10^{-4} \pi$  соответственно.

Таким образом, работу адаптивного алгоритма можно разбить на два этапа. На первом этапе настройки каналов ускорения распределяются равномерно по априорному диапазону межпериодных набегов фаз, обусловленных ускорением. Затем осуществляется вычисление амплитудных спектров и сравнение полученных значений с порогом. Вместе с тем описанным выше способом выбирается пара соседних каналов, определяющая границы нового диапазона межпериодных набегов фаз. На втором этапе настройки каналов ускорения перераспределяются равномерно по новому диапазону, вычисляются амплитудные спектры, полученные значения сравниваются с

порогом. Вследствие непостоянности ускорения настройки каналов ускорения вновь равномерно распределяются по априорному диапазону межпериодных фазовых набегов, обусловленных ускорением.

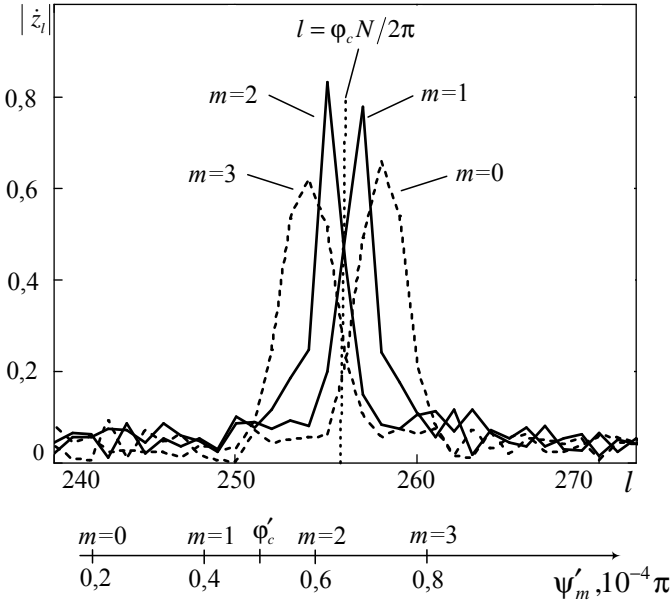


Рисунок 1 – Амплитудные спектры сигнала в четырех каналах ускорения с соответствующими настройками  $\psi'_m$

На втором этапе происходит более точная настройка на межпериодный набег фаз, и, следовательно, энергия сигнала накапливается эффективнее в доплеровском канале, соответствующем начальному значению скорости. Для обеспечения такой же точности настройки каналов ускорения в неадаптивном алгоритме необходимо повышение их числа, что приведет к увеличению порога обнаружения для поддержания уровня ложных тревог на заданном уровне.

Перспективными алгоритмами обработки сигналов в РТС являются алгоритмы сопровождения до обнаружения на основе парциальной фильтрации, осуществляющие рекуррентное вычисление формулы Байеса. Известные алгоритмы не учитывают расширение доплеровского спектра сигнала, в результате чего их эффективность снижается, что показано в третьем разделе диссертации. Для учета нелинейности изменения доплеровской фазы в вектор состояния на  $k$ -м зондировании  $\mathbf{x}_k$  введена новая компонента:

$$\mathbf{x}_k = [r_k, \dot{r}_k, \ddot{r}_k, A_k],$$

где  $r_k$  – дальность до объекта,  $\dot{r}_k$  – скорость объекта,  $\ddot{r}_k$  – ускорение объ-

екта,  $A_k$  – амплитуда сигнала.

При аппроксимации апостериорной плотности вероятности вектора состояния вычисляется отношение правдоподобия, которое при отсутствии полезного сигнала равно 1, а при наличии полезного сигнала с учетом ускорения на  $k$ -м зондировании в  $p$ -м канале дальности,  $l$ -м канале скорости и  $m$ -м канале ускорения примет вид:

$$\Lambda(z_k^{(p,l,m)} | \mathbf{x}_k) = \exp\left[-\frac{(h^{(p,l,m)}(\mathbf{x}_k))^2}{2\sigma_n^2}\right] I_0\left(\frac{z_k^{(p,l,m)} h^{(p,l,m)}(\mathbf{x}_k)}{\sigma_n^2}\right), \quad (2)$$

где  $z_k^{(p,l,m)}$  – измерения, полученные в многоканальной по дальности, скорости и ускорению системе:

$$z_k^{(p,l,m)} = h_k^{(p,l,m)} + n_k^{(p,l,m)},$$

$$h^{(p,l,m)}(\mathbf{x}_k) = \left| A_k \sum_{j=0}^{N-1} \left[ \Re_p \exp\left[i\left(j\phi_c + \frac{j^2}{2}\phi'_c\right)\right] \exp\left[-i\frac{j^2}{2}\psi'_m\right] \exp[-ij\psi_l] \right] \right|,$$

$\Re_p$  – значение корреляционной функции излученного импульса в  $p$ -м канале дальности,  $n_k^{(p,l,m)}$  – шум измерений,  $\sigma_n^2$  – мощность помеховой составляющей в  $p$ -м канале дальности,  $l$ -м канале скорости и  $m$ -м канале ускорения,  $I_0(\bullet)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Аппроксимации апостериорной плотности вероятности вектора состояния производится множеством точек, называемых парциальными фильтрами. Парциальные фильтры характеризуются состоянием объекта и весом, определяемым отношением правдоподобия (2). После осуществления процедуры фильтрации вероятность существования объекта  $\hat{P}_k$  и оценка его состояния  $\hat{\mathbf{x}}_k$  на  $k$ -м зондировании могут быть определены как:

$$\hat{P}_k = \frac{N_a}{N_f}, \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \frac{\sum_{i \in C(N_a)} \mathbf{x}_k^i}{N_a},$$

где  $N_a$  – количество фильтров, в которых объект существует,  $N_f$  – общее количество фильтров,  $C(N_a)$  – область фильтров, в которых объект существует.

Обнаружение объекта производится сравнением вероятности существования объекта (3) с порогом  $P_{пор}$ . При превышении порога принимается решение об обнаружении.

**В третьем разделе** выбраны критерии сравнения алгоритмов, в соответствии с которыми произведен анализ эффективности обнаружения, точности оценки ускорения и вычислительной сложности синтезированных алгоритмов. Кроме того, показана возможность их реализации на современной элементной базе.

Сравнение эффективности обнаружения проводилось по характеристикам обнаружения, полученным с помощью метода характеристических функций и имитационного моделирования. Погрешность оценки ускорения характеризуется среднеквадратическим отклонением оценки межпериодных набегов фаз. Сравнение вычислительной сложности проводилось по количеству элементарных операций сложения, умножения и сравнения действительных чисел, необходимых на реализацию алгоритма.

Анализ характеристик обнаружения показал, что увеличение числа каналов ускорения в многоканальном по скорости и ускорению алгоритме имеет ограниченное влияние на снижение ПО с-(п+ш). Это связано с тем, что при достижении определенной минимальной разницы между настройкой канала ускорения и реальным межпериодным набегом фаз, обусловленным ускорением, энергия сигнала «собирается» в пределах одного канала скорости. Кроме того, ограниченное повышение эффективности обнаружения определяется неоднозначностью влияния увеличения общего числа каналов системы на ПО с-(п+ш) (более точная настройка каналов стремится уменьшить ПО, но при этом необходимо поддерживать уровень ложных тревог на заданном уровне, для чего необходимо увеличение ПО). Так при числе импульсов в пачке 512 увеличение числа каналов ускорения в квазиоптимальном алгоритме с 3 до 4 приводит к снижению ПО с-(п+ш) по уровню вероятности правильного обнаружения 0,9 на 0,5 дБ, с 5 до 6 – на 0,2 дБ, с 7 до 8 – 0,1 дБ. Итого, при увеличении числа каналов ускорения с 3 до 8 происходит снижение ПО с-(п+ш) на 1,25 дБ при увеличении количества элементарных операций сложения, умножения и сравнения, необходимых на реализацию алгоритма, в 2,67 раз.

Показано, что алгоритм оптимизации числа каналов ускорения и их параметров позволяет снизить ПО с-(п+ш) до 4 дБ, либо при сохранении эффективности обнаружения на заданном уровне снизить вычислительную сложность алгоритма в 1,43 раза по сравнению с алгоритмом, реализующим обработку с равномерной расстановкой каналов скорости и ускорения. При этом оптимизация эффективна при относительной ширине спектра флюктуаций помехи выше 0,1 и малом числе каналов ускорения. Эффективность снижается при приближении ширины спектра флюктуаций к 1, так как расстановка каналов стремится к равномерной. Оптимизация при-

водит к снижению точности оценки межпериодного фазового набега, обусловленного ускорением, на величину до 0,0034π.

Адаптивный алгоритм позволяет снизить ПО с-(п+ш) на 3 дБ либо при сохранении эффективности обнаружения снизить вычислительную сложность алгоритма в 2,29 раз по сравнению с квазиоптимальным неадаптивным алгоритмом, реализующим обработку с равномерной расстановкой каналов скорости и ускорения. Установлено, что существует определенное число каналов, при котором наблюдается наибольший выигрыш в ПО с-(п+ш) по сравнению с квазиоптимальным алгоритмом. При этом с увеличением числа импульсов в пачке оптимальное число каналов также увеличивается. Применение адаптивного алгоритма позволяет увеличить точность оценки межпериодного фазового набега, обусловленного ускорением, по сравнению с квазиоптимальным на 0,00027π.

Многоканальный по ускорению многоэтапный алгоритм TBD позволяет снизить ПО с-(п+ш) на 8 дБ либо при сохранении эффективности обнаружения снизить вычислительную сложность алгоритма в 4 раза по сравнению с квазиоптимальным алгоритмом, реализующим обработку с равномерной расстановкой каналов скорости и ускорения. Применение алгоритма сопровождения до обнаружения позволяет увеличить точность оценки межпериодного фазового набега, обусловленного ускорением, по сравнению с квазиоптимальным на 0,0004π. ПО с-(п+ш), среднее количество обзоров, необходимое для обнаружения, и точность оценки межпериодного фазового набега, обусловленного ускорением, зависят от количества парциальных фильтров и каналов ускорения. Их увеличение приводит к росту эффективности обнаружения и точности оценки до некоторого предела, но также приводит к повышению вычислительной сложности алгоритма.

Синтезированные алгоритмы могут быть реализованы в реальном масштабе времени на одноядерных цифровых сигнальных процессорах серий TigerSHARC фирмы Analog Devices и C6000 фирмы Texas Instruments. В отличие от квазиоптимального алгоритма, реализующего обработку с равномерной расстановкой каналов скорости и ускорения, для реализации которого в реальном масштабе времени требуется применение многопроцессорных систем или многоядерных процессоров, повышающих сложность реализации и стоимость устройств.

**В заключении** описаны основные результаты, полученные в ходе выполнения работы, приведены количественные показатели эффективности синтезированных алгоритмов.

**В приложении** приведены копии актов внедрения результатов, полученных в диссертационной работе.

**Основные результаты диссертации опубликованы  
в изданиях из перечня ВАК**

1. Кошелев В.И., Козлов Д.Н. Адаптивный алгоритм обнаружения маневрирующей цели // Вестник РГРТУ. – 2014. – №47. – С. 38-41.

2. Кошелев В.И., Козлов Д.Н. Оптимизация каналов ускорения многоканального обнаружителя при действии коррелированной помехи // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – № 3. – С. 21-28.

### *Прочие публикации*

3. Козлов Д.Н. Обнаружение маневрирующих целей в многоканальных фильтрах // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах: межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 6. – Рязань: РГТУ, 2012. – С. 48-51.

4. Козлов Д.Н. Оптимизация расстановки каналов ускорения при обнаружении высокоманевренных целей // Наука и техника в современном мире: материалы междунар. заочной научно-практической конф. Часть I. – Новосибирск: «Сибирская ассоциация консультантов», 2012. – С. 75-80.

5. Кошелев В.И., Козлов Д.Н. Оптимизация расстановки частотных каналов доплеровского процессора сигналов // Цифровая обработка сигналов и ее применение: доклады 14-й междунар. конф. (Москва, 28-30 марта 2012 г.). – Москва, 2012. – С. 200-202.

6. Козлов Д.Н. Система обнаружения гармонического движения, создаваемого человеком // Седьмой всероссийский конкурс инновационных проектов студентов, аспирантов и молодых ученых: тезисы докладов. – М.: РГУТИП, 2012. – С. 135-136.

7. Козлов Д.Н. Обнаружение факта присутствия человека // Сборник работ победителей отборочного тура Всероссийского смотра-конкурса научно-технического творчества студентов вузов «Эврика», г. Новочеркасск, май-июль 2012 г. / Мин-во образования и науки РФ, Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. (НПИ). – Новочеркасск: ЛИК, 2012. – С. 30-32.

8. Козлов Д.Н. Обнаружение малоподвижных целей на фоне подстилающей поверхности с использованием ускорения в качестве информационного признака // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: межвуз. сб. научн. тр. / под ред. Ю.Н. Паршина. – Рязань: РГТУ, 2013. – С. 121-124.

9. Кошелев В.И., Козлов Д.Н. Анализ эхо-сигналов, отраженных от объектов, движущихся с ускорением // III Всероссийские Армандовские чтения: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике / Материалы IV Всероссийской научной конференции. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2013. – С. 111-113.

10. Koshelev V.I., Belokurov V.A., Kozlov D.N. Optimizing the velocity and acceleration channels' parameters in multichannel Doppler filter // 2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing MECO-2013, Budva, Montenegro. – 2013. – P. 180-183. (Входит в базу SCOPUS)

11. Koshelev V.I., Belokurov V.A., Kozlov D.N. Particle filtering algorithm for detecting a maneuvering target // International Siberian conf. on control and communications (SIBCON-2013), Krasnoyarsk, Russia. – 2013. – P. 1-2. (Входит в базу SCOPUS)

12. Козлов Д.Н. Адаптивная настройка каналов ускорения в многоканальном доплеровском обнаружителе // Современное телевидение и радиоэлектроника: доклады 22-й междунар. конф. (Москва, март 2014 г.). – М.: СКБ Электрон, 2014. – С.82–84.

13. Козлов Д.Н. Адаптация каналов ускорения доплеровского обнаружителя // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2014»: материалы 10-й междунар. молодежной науч.-техн. конф. (Севастополь, 12-17 мая 2014 г.) – Севастополь: СевНТУ, 2014. – С. 41.

### *Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ*

14. Программа для оптимизации каналов ускорения: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610093, заявл. 07.11.2012, зарег. 09.11.2013 / Козлов Д.Н., Кошелев В.И.

15. Программа систематической переборки в блоке обнаружителя малоразмерной цели: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661870, заявл. 25.10.2013, зарег. 17.12.2013 / Белокуров В.И., Козлов Д.Н.

**Козлов Дмитрий Николаевич**

Повышение эффективности многоканальной фильтрации сигналов с нелинейным изменением доплеровской фазы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_.\_\_.14. Формат бумаги 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л.1,0.  
Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_

ООО «НПЦ «Информационные технологии».  
390035, Рязань, ул. Островского, 21/1