

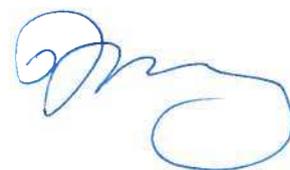
УДК 621.396  
На правах рукописи

Кондрашов Кирилл Сергеевич

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ФОНОЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ  
В ОБЗОРНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации  
(в технических системах)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный  
руководитель:

**Жураковский Валерий Николаевич**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные  
оппоненты:

**Антипов Владимир Никитович**, доктор технических наук, профессор, главный специалист ПАО «Туполев»

**Калашников Константин Сергеевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет"

Ведущая  
организация:

АО «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники»

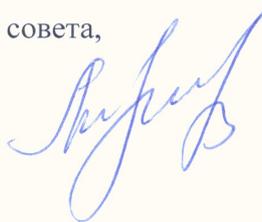
Защита состоится "24" января 2017 года в 14 ч 30 мин на заседании диссертационного Совета Д 212.141.02 при Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, пер. Госпитальный, д.10, ауд. 613м

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2016 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба выслать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

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



Муратов И.В.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность и степень разработанности темы**

Диссертационная работа Кондрашова Кирилла Сергеевича посвящена разработке алгоритмов вторичной обработки радиолокационной информации в рамках решения задачи формирования фоноцелевой обстановки в обзорной радиолокационной станции. Данная проблема широко распространена на практике и активно развивается, особенно применительно к многоцелевой обстановке и наличию помех.

В настоящее время разработан целый ряд алгоритмов вторичной обработки. По большей части, однако, синтез известных алгоритмов осуществлен эвристически без привлечения математического аппарата, описывающего множество целей с учетом их стохастического характера и системного подхода. Кроме того, требуется дополнительный учет маневрирования целей и наличия пассивных помех, что зачастую не отражено в существующих алгоритмах. При реализации на практике необходимо учитывать распространенную на сегодняшний день программно-аппаратную платформу, а именно встраиваемые системы на базе микропроцессоров. В таких системах обработка информации делается в реальном времени в параллельном режиме.

Подобные проблемы в совокупности должны решаться с использованием методов системного анализа применительно к РЛС как системе и алгоритмов в ней как ее составляющих с учетом их работы в реальном времени. Это предполагает, в частности, введение показателей качества в рамках вторичной обработки информации с учетом параллельных операций, выполняемых с заданными временными ограничениями, и решение оптимизационных задач применительно к данным показателям качества.

Актуальной проблемой в связи с этим является разработка алгоритмов вторичной обработки, учитывающих многоцелевую обстановку, возможность маневрирования и наличие пассивных помех в рамках современных встраиваемых систем на базе микропроцессора. При этом должна решаться задача оптимизации многопоточного процесса вторичной обработки данных о целях в реальном времени при наличии временных ограничений.

### **Цель и задачи диссертации**

**Цель** исследования состоит в разработке алгоритмов вторичной обработки информации в обзорной РЛС, обеспечивающих (по сравнению с известными алгоритмами) увеличение точности оценки параметров истинных траекторий с учетом действия пассивных помех в многоцелевой обстановке; увеличение

эффективности использования вычислительных ресурсов в обзорной РЛС; уменьшение времени ожидания обнаружения истинных траекторий целей; уменьшение частоты выдачи ложных траекторий, по сравнению с известными в настоящее время.

В соответствии с целью диссертационной работы были **сформулированы и решены следующие задачи:**

1. Построение математической модели входных данных вторичной обработки информации для односточечных, распределенных и помеховых объектов в обзорной РЛС;

2. Синтез алгоритма вторичной обработки с адаптивным автозахватом траекторий и разделением малоподвижных и скоростных целей;

3. Синтез многоканального фильтра Калмана для сопровождения маневрирующих и малоподвижных целей в условиях воздействия помех;

4. Разработка алгоритма оптимизации многопоточного процесса вторичной обработки данных о целях в реальном времени при наличии временных ограничений;

5. Разработка алгоритма моделирования вторичной обработки информации в обзорной РЛС с учетом помеховой обстановки и сложной кинематики обзора пространства.

6. Проверка работы алгоритма вторичной обработки по экспериментальным данным, полученных для обзорной РЛС в реальной фоноцелевой обстановке.

### **Методы исследования**

Методы исследования базируются на теории системного анализа, теории принятия решений, кластерном анализе, теории случайных потоков, аналитических и численных методах, статистических методах обработки информации и математических методах обработки информации на компьютере.

### **Научная новизна работы**

1. Разработана математическая модель входных данных вторичной обработки информации для односточечных, распределенных и помеховых объектов в обзорной РЛС на основе цифрового адаптивного обнаружителя сигналов, для которого получены вероятностные характеристики;
2. Синтезирован новый алгоритм вторичной обработки сигналов обзорной РЛС для множества целей с учетом предлагаемой в работе функции штрафов, предусматривающий адаптивный автозахват траекторий и разделение малоподвижных и скоростных целей;
3. Синтезирован многоканальный фильтр Калмана для сопровождения маневрирующих и малоподвижных целей в условиях воздействия помех;

- 4 Разработаны алгоритмы моделирования вторичной обработки информации в обзорной РЛС с учетом помеховой обстановки и сложной кинематики обзора пространства;
- 5 Получены данные экспериментальных исследований сигналов РЛС в реальной фоно-целевой обстановке, подтверждающие результаты теоретических исследований.

#### **Положения, выносимые на защиту**

- 1 Математическая модель входных данных вторичной обработки информации для одноточечных, распределенных и помеховых объектов в обзорной РЛС;
- 2 Алгоритм вторичной обработки с адаптивным автозахватом траекторий и разделением малоподвижных и скоростных целей;
- 3 Синтез многоканального фильтра Калмана для сопровождения маневрирующих и малоподвижных целей в условиях воздействия помех;
- 4 Алгоритм оптимизации многопоточного процесса вторичной обработки данных о целях в реальном времени при наличии временных ограничений;
- 5 Алгоритмы моделирования вторичной обработки информации в обзорной РЛС с учетом помеховой обстановки и сложной кинематики обзора пространства.
- 6 Результаты вторичной обработки экспериментальных данных, полученных обзорной РЛС в реальной фоно-целевой обстановке.

#### **Достоверность научных выводов**

Достоверность обеспечивается:

- 1 Корректностью исходных математически положений, обоснованностью принятых допущений, репрезентативностью статистических данных.
- 2 Соответствием результатов теоретических исследований, результатов математического моделирования и результатов экспериментальных исследований.

#### **Личный вклад автора**

Основные результаты, вывод и рекомендации, приведенные в диссертации, получены автором лично.

#### **Практическая и теоретическая значимость работы**

Разработана математическая модель вторичной обработки информации для одноточечных, распределенных и помеховых объектов в обзорной РЛС с учетом цифровой обработки, распространенной на сегодняшний день. Получены имеющие теоретическую значимость вероятностные характеристики адаптивного обнаружителя сигналов в аналитической форме для приведенных типов объектов.

Разработаны новые алгоритмы вторичной обработки сигналов обзорной РЛС, реализующие совместное обнаружение и оценку параметров множества целей, в том числе маневрирующих и малоподвижных, при наличии пассивных помех, и имеющие преимущество над традиционными аналогичными алгоритмами. Данные алгоритмы могут быть использованы в любой обзорной РЛС без существенных ограничений.

Предложены специфические для обзорной РЛС функция штрафов, которые использовались при синтезе алгоритмов вторичной обработки информации, которые имеют теоретическую значимость в рамках разработки аналогичных алгоритмов. При этом в рамках синтеза минимизировался средний апостериорный риск с учетом предложенных функций штрафов.

Разработан алгоритм оптимизации многопоточного процесса вторичной обработки данных о целях в реальном времени при наличии временных ограничений, который представляет практическую ценность при реализации вторичной обработки с учетом современных аппаратно-программных платформ.

Разработаны алгоритмы моделирования вторичной обработки информации в обзорной РЛС с учетом помеховой обстановки и сложной кинематики обзора пространства. На основе данных алгоритмов разработаны математические и имитационные модели обзорных РЛС. Модели и алгоритмы могут быть использованы для разработки и оценки результатов работы алгоритмов, предназначенных для подобных систем.

### **Апробация работы**

Доклад на Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2013);

Доклад на XLVIII Научных чтений памяти К.Э.Циолковского (Калуга, 2013);

Доклад на Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2014);

Доклад на на L Научных чтений памяти К.Э.Циолковского (Калуга, 2015);

### **Внедрение результатов работы**

- 1 Результаты диссертации используются в учебном процессе на кафедре автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждается актом об использовании.
- 2 Результаты внедрены в изделие 5П-10М АО «РАТЕП», что подтверждается актом об использовании;

- 3 Результаты внедрены в НИР, выполняемую совместно с ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А. И. Берга», что подтверждается актом об использовании;
- 4 Результаты внедрены в НИР по изделию 5П-27 АО «ВНИИРТ», что подтверждается актом об использовании.

### **Публикации по теме диссертации**

Результаты отражены в 11 научных работах, из них в 4 статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК РФ, общий объем 3.5 п. л.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (наименований). Общий объем составляет 158 страниц, 28 иллюстраций, .

### **Содержание работы**

**Во введении** сказано об актуальных проблемах в рамках РЛС кругового обзора. На основе анализа литературы по теме диссертации показано, что зачастую алгоритмы в рамках вторичной обработки разрабатывались эвристически без учета множества целей, возможности маневрирования и наличия пассивных помех. В связи с этим обоснована необходимость синтеза алгоритма, учитывающего эти факторы в комплексе.

Реализация алгоритмов вторичной обработки осуществляется в рамках встраиваемых систем. Во введении раскрываются проблемы разработки программного обеспечения (ПО) во встраиваемых системах, а также приводятся ограничения, касающиеся ПО вторичной обработки, которые должны быть удовлетворены в данной работе.

С учетом всех приведенных факторов обосновывается необходимость использования некоторых методов системного анализа применительно к проблемам разработки алгоритмов в обзорной РЛС.

Также во введении определены цели и задачи исследования, используемые для достижения целей методы, описаны научная и практическая значимость работы, а также указаны положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводятся необходимые сведения для разработки алгоритма вторичной обработки в обзорной РЛС кругового обзора. Приводятся используемые системы координат и связь между ними, классификация объектов в окружающем пространстве и модели сигналов и помех, процедура сканирования пространства и модель тракта обработки сигналов и предварительной координатной обработки. С использованием этих данных можно сформировать математические модели исходных данных (содержащих

координатные отметки и радиальные скорости) на входе алгоритма вторичной обработки; также они лежат в основе численного моделирования.

В диссертации рассматриваются следующие объекты: точечные цели; протяженные (распределенные) цели; пассивные помехи (естественные и искусственные). С учетом введенной номенклатуры объектов вводятся математические модели сигналов на входе РЛС (в виде комплексных огибающих), которые служат входом математической модели устройства цифровой обработки. В рамках цифровой обработки разрабатывается модель адаптивного обнаружителя, который анализирует  $N_D$  дискретов по дальности слева и справа от данного дискрета  $k$ . По ним делается оценка уровня шумов, и если в данном дискрете сигнал превышает этот уровень, формируется признак обнаружения.

Основной характеристикой выхода ЦОС является вероятность истинного обнаружения (либо вероятность срабатывания по помехе), и вероятность ложной тревоги. Выражения для них были получены аналитически с учетом используемого обнаружителя. Вероятность истинного обнаружения:

$$\begin{aligned}
P_{D,k}(R) &= \frac{1}{2^{2(N_D+1)} \sigma^{4(N_D+1)}} \int_0^\infty dz_l[k] \int_0^\infty dz_r[k] \times \\
&\times \int_R \dots \int_R dz[k-1] \dots dz[k-N_D] dz[k+1] \dots dz[k+N_D] \times \\
&\times \left( z_l[k] - \frac{1}{N_D} \sum_{k=1}^{N_D} z[k-n] \right) \left( z_r[k] - \frac{1}{N_D} \sum_{k=1}^{N_D} z[k+n] \right) \times \\
&\times \exp \left( - \left[ \left( z_l[k] - \frac{1}{N_D} \sum_{k=1}^{N_D} z[k-n] \right)^2 + \left( z_r[k] - \frac{1}{N_D} \sum_{k=1}^{N_D} z[k+n] \right)^2 - 2v_R^2[k] \right] / 2\sigma^2 \right) \times \\
&\times I_0 \left( \left[ z_l[k] - \frac{1}{N_D} \sum_{n=1}^{N_D} z[k-n] \right] \frac{v_R[k]}{2\sigma^2} \right) I_0 \left( \left[ z_r[k] - \frac{1}{N_D} \sum_{n=1}^{N_D} z[k+n] \right] \frac{v_R[k]}{2\sigma^2} \right) \times \\
&\times \exp \left( - \left[ \sum_{n=1}^{N_D} z^2[k-n] + \sum_{n=1}^{N_D} z^2[k+n] - 2v_R^2[k-n] \right] / 2\sigma^2 \right) \times \\
&\times \prod_{n=1}^{N_D} z[k-n] I_0 \left( \frac{v_R[k-n] z[k-n]}{2\sigma^2} \right) \prod_{n=1}^{N_D} z[k+n] I_0 \left( \frac{v_R[k+n] z[k+n]}{2\sigma^2} \right)
\end{aligned}$$

где  $R$  - дальность,  $\sigma$  - СКО шума,  $I_0$  - модифицированная функция Бесселя 0-го порядка,

$$v_R[k]^2 = \left( \sum_{i=0}^k \operatorname{Re}_y[i] \operatorname{Re}_h[k-i] - \operatorname{Im}_y[i] \operatorname{Im}_h[k-i] \right)^2 + \left( \sum_{i=0}^k \operatorname{Re}_y[i] \operatorname{Im}_h[k-i] - \operatorname{Im}_y[i] \operatorname{Re}_h[k-i] \right)^2$$

где  $\tilde{h}[k] = \text{Re}_h[k] + j \text{Im}_h[k]$  - комплексная огибающая импульсной характеристики фильтра, согласованной с формой ожидаемого сигнала,

$$z_r = \frac{1}{N_D} \sum_{i=1}^{N_D} z[k+i] \quad z_l = \frac{1}{N_D} \sum_{i=1}^{N_D} z[k-i]$$

Аналогичное выражение (с учетом дальномерного и углового шума) получается для протяженной цели.

Для пассивных помех выражение вероятности срабатывания варьируется в зависимости от распределения  $\omega(E)$ ; все возможные варианты здесь не приводятся.

Вероятность ложного обнаружения (по шумам) одинаковая для всех перечисленных объектов:

$$\begin{aligned} F_{D,k} &= \frac{1}{2^{2(N_D+1)} \sigma^{4(N_D+1)}} \int_0^\infty dz_l[k] \int_0^\infty dz_r[k] \times \\ &\times \int_R \dots \int_R dz[k-1] \dots dz[k-N_D] dz[k+1] \dots dz[k+N_D] \times \\ &\times \left( z_l[k] - \frac{1}{N_D} \sum_{k=1}^{N_D} z[k-n] \right) \left( z_r[k] - \frac{1}{N_D} \sum_{k=1}^{N_D} z[k+n] \right) \times \\ &\times \exp \left( - \left[ \left( z_l[k] - \frac{1}{N_D} \sum_{k=1}^{N_D} z[k-n] \right)^2 + \left( z_r[k] - \frac{1}{N_D} \sum_{k=1}^{N_D} z[k+n] \right)^2 \right] / 2\sigma^2 \right) \times \\ &\times \exp \left( - \left[ \sum_{n=1}^{N_D} z^2[k-n] + \sum_{n=1}^{N_D} z^2[k+n] \right] / 2\sigma^2 \right) \times \prod_{n=1}^{N_D} z[k-n] z[k+n] \end{aligned}$$

Разрабатывается математическая модель следующей за процедурой ЦОС предварительной координатной обработки, которая заключается в формировании слитных групп отметок с выхода ЦОС с учетом известной диаграммы направленности антенны по азимуту с последующим оцениванием положения цели на основе весовой обработки и пересчетом его в глобальную систему координат.

Выражения для  $P_{D,k}$ ,  $F_{D,k}$  и модель предварительной координатной обработки служат исходными данными для синтеза алгоритма вторичной обработки.

**Во второй главе** осуществляется синтез алгоритма вторичной обработки без маневров и пассивных помех с учетом моделей главы 1 и математического аппарата случайных потоков. При этом решается совместная задача обнаружения и оценки параметров неизвестного числа целей со случайными характеристиками. Каждая цель описывается стохастическим

дифференциальным уравнением вида:  $\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} + \alpha\mathbf{x}(t) = \beta\mathbf{n}(t)$ , где  $\mathbf{x} \in Q$  - вектор состояния объекта,  $\mathbf{n}$  - случайный процесс типа белого шума. Парциальные плотности, описывающие совокупность  $n$  объектов:  $\Delta P_n(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n; Q) = \omega_n(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n; Q) d\mathbf{x}_1 \dots d\mathbf{x}_n [1 + o(1)]$ , где  $\Delta P_n$  - это вероятность нахождения каждой из неразличимых  $n$  точек в непересекающихся областях размером  $d\mathbf{x}_i$  в области  $Q$  при условии, что где-либо еще в  $Q$  они отсутствуют. С учетом приведенного стохастического ДУ, эволюция парциальных плотностей описывается марковским правилом с известными переходными вероятностями.

В соответствии с общим подходом формируется рекуррентное выражение процедуры байесовской фильтрации для парциальных плотностей сложного дискретно-непрерывного случайного процесса, описывающего точечные и протяженные цели в пространстве, на основе априорных и условных характеристик данного процесса.

До начала наблюдения поток целей считается пуассоновским. Координатные отметки на входе обычно представлены в сферической системе; при переходе в декартову используются специальные формулы перевода, приближенно описывающие измерения с помощью многомерного гауссового распределения, то есть правдоподобие  $f(\mathbf{z}|\mathbf{x})$  имеет гауссову форму. На выходе байесовской фильтрации получается семейство апостериорных парциальных плотностей  $\tilde{\omega}_{n,t}(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n; Q)$ , описываемых суперпозицией пуассоновского потока необнаруженных целей с интенсивностью  $\mu_i(\mathbf{x})$  и потока сложной структуры, который может быть приближен бернуллиевским потоком предварительно обнаруженных и сопровождаемых целей с учетом введенных априорных и условных характеристик. Для бернуллиевского потока описание дается  $\tilde{e}_{i,t_k}(\mathbf{x}); i = 1 \dots m_{k-1}$  парциальными интенсивностями для  $m_{k-1}$  измерений на момент времени  $t_0$  и  $\tilde{e}_{m_{k-1}+j,t}(\mathbf{x}); j = 1 \dots m_k$  на момент времени  $t$ .

Применяя теорию принятия решений, для бесконечного семейства апостериорных плотностей можно получить оценки параметров целей, минимизирующих апостериорный средний риск. Оказывается, что апостериорные оценки зависят только от интенсивности апостериорного потока

$\tilde{f}_1(\mathbf{x}) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \int_Q \dots \int_Q \tilde{\omega}_{1+k}(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{1+k}; Q) d\mathbf{x}_2, \dots, d\mathbf{x}_{1+k}$ , имеющей смысл среднего количества точек на единицу фазового пространства. При этом с учетом гауссовой формы

$f(\mathbf{z}|\mathbf{x})$  и выражения апостериорного потока в виде смеси пуассоновского и бернуллиевского, апостериорная интенсивность имеет вид смеси гауссоид

$$\tilde{f}_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n a_i N(\mathbf{x}; \mu_i, \mathbf{P}_i)$$

В рамках диссертации предлагаются функции штрафов в рамках решения совместной задачи обнаружения-оценивания:

$$I_1(n, \hat{n}, \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n, \hat{\mathbf{x}}_1, \dots, \hat{\mathbf{x}}_{\hat{n}}) = I_{10}\hat{n} + I_{01}n + \sum_{i=0}^n (I_{10} + I_{01}) \left( -\exp\left(-0.5 \min_{j=1 \dots \hat{n}} [\mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{x}}_j]^T \mathbf{C}^{-1} [\mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{x}}_j] \right) \right)$$

где  $n, \hat{n}$  - истинное и оцененное количество объектов;  $\mathbf{x}_i; i=1 \dots n$  - истинные вектора состояния объектов;  $\hat{\mathbf{x}}_j; j=1 \dots \hat{n}$  - оценки;  $I_{10}$  - штраф за ложное обнаружение;  $I_{01}$  - штраф за пропуск. Эта функция штрафов подходит для любых целей. Если задать повышенные требования к приоритетным целям:

$$I_2(n, \hat{n}, \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n, \hat{\mathbf{x}}_1, \dots, \hat{\mathbf{x}}_{\hat{n}}) = I_{10}\hat{n} + I_{01}n + \sum_{i=0}^n (I_{10} + I_{01}) \left( -\exp\left\{-0.5 \min_{j=1 \dots \hat{n}} [\mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{x}}_j]^T \mathbf{C}(P, \tau) [\mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{x}}_j] \right\} \right)$$

где  $P(\mathbf{x}_i)$  - параметр,  $\tau$  - подлетное время,  $\mathbf{C}(P, \tau)$  - ступенчатая функция, определяющая требования к точности измерения для приоритетных целей вида:

$$\mathbf{C}(P, \tau) = \begin{cases} \mathbf{C}_1; & \text{если } P < P', \tau < \tau', \tau > 0, \\ \mathbf{C}_2; & \text{иначе;} \end{cases}; \|\mathbf{C}_1\| < \|\mathbf{C}_2\|.$$

Усредняя апостериорный риск с учетом апостериорных плотностей  $\tilde{\omega}_{n,i}(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n; Q)$  для функций штрафов  $I_1, I_2$ , получаем, что оптимальные по минимуму апостериорного среднего риска оценки лежат в области

$$\Omega = \left\{ \hat{\mathbf{x}} : q(\hat{\mathbf{x}}) > \frac{I_{10}}{I_{10} + I_{01}} \right\}, \quad \text{где} \quad q(\hat{\mathbf{x}}) = \int_{\mathcal{Q}} \tilde{f}_1(\mathbf{x}) \exp\left(-0.5(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})^T \mathbf{C}[P(\mathbf{x}), \tau(\mathbf{x})](\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})\right) d\mathbf{x}.$$

Производя преобразования, получаем, что оптимальная процедура обнаружения-оценивания заключается в следующем:

- 1 Вычисление апостериорной интенсивности  $\tilde{f}_1(\mathbf{x})$ ;
- 2 Пороговая обработка по  $\tilde{f}_1(\mathbf{x})$  с выделением компонент интенсивности с весами  $a_i$  и параметрами  $\mu_i, P_i$ , попадающими в область  $\Omega$  оптимальных оценок. Количество таких компонент соответствует количеству целей, а их параметры – оптимальным оценкам.

Для морских целей при малом волнении и для воздушных целей эта процедура может быть легко реализована путем калмановской фильтрации по

каждому объекту, сопровождаемой расчетом весов гауссовских компонент интенсивности. При этом формируются корреляционные стробы  $S_i = \{z : v^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_i^{k|k-1}\mathbf{H} + \mathbf{R})^{-1}v \leq \delta\}$ ;  $v = [\mathbf{H}\mu_i^{k|k-1} - z_j]$  и решается задача отождествления отметок и траекторий. Обнаружение траектории делается с помощью рекурсивного расчета весов гауссовских компонент интенсивности и последующего сравнения с порогом.

**В третьей главе** процедура, описанная в главе 2 расширяется для маневрирующих целей и пассивных помех. Принимая характерную для обзорных РЛС модель маневра в виде движения по участкам прямых, сопряженным дугами окружностей, вместо каждого фильтра Калмана по отдельности формируется многоканальный фильтр, настроенный на разную интенсивность маневра. При этом каждый фильтр к моменту начала маневра находится в стационарном режиме и является линейным, но с разным соотношением матриц  $\mathbf{R}$  и  $\mathbf{Q}$  для разных каналов, которые соответствуют разным резонансным частотам и ширине каналов. Также учитываются шумовые отметки, которые принимаются в соответствии с моделью, приведенной в главе 1 и 2. В итоге процедуру расчета многоканального фильтра с учетом помех для каждой координаты можно привести в следующем виде:

- 1 Выбор резонансных и частот среза для каналов фильтра из диапазона интенсивностей маневра, выраженных в виде отношения  $v/R$ , где  $v$  - линейная скорости,  $R$  - радиус кривизны при маневрировании;

- 2 Нахождение коэффициента усиления (для случая фильтрации скорости и координаты) для заданной ширины  $\Delta(v/R) = \frac{1}{2\pi T}(1 - TK_x/K_v)$ , где  $T$  - частота обзора,  $K_x$  - коэффициент усиления по координате,  $K_v$  - по скорости; и

$$(v/R)_0 = \frac{1}{2\pi T} \frac{\sqrt{4K_v T - K_x^2 - 2K_v K_x T - K_v^2 T^2}}{2 - K_x - K_v T};$$

резонансной частоты

- 3 Нахождение  $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{xx} & 0 \\ 0 & q_{vv} \end{bmatrix}$  для полученного в 2 коэффициента  $\mathbf{K} = [K_x \ K_v]$ ;

$$q_{xx} = \frac{RK_x^2 + K_v RTK_x - 2K_v RT}{1 - K_x}, \quad q_{vv} = \frac{K_v^2 R}{1 - K_x};$$

- 4 Определение вероятности ложного отождествления с шумом вместо цели  $P_{fa} = P(e > 0)$ , где  $e = e_i - e_c$ ; здесь  $e_i \sim N(0, \mathbf{S})$ ;  $\mathbf{S} = \mathbf{R} + \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T$ , а  $e_c \sim \Gamma(2, \beta_c(\gamma))$ , где  $\beta_c$

- параметр гамма-распределения, зависящий от интенсивности потока шумовых отметок.

В процессе оценивания многоканальным фильтром используется выход того фильтра, для которого меньше величина  $\mathbf{v}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_i^{k|k-1}\mathbf{H} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{v}$ . В итоге, в процедуре, приведенной в главе 2, каждый фильтр заменяется несколькими при сохранении ее общей структуры.

Пассивные помехи сильно затрудняют формирование апостериорной интенсивности в соответствии с главой 2; однако с достаточной степенью достоверности источники пассивных помех можно описывать с помощью многомерного гауссового распределения. Тогда учет пассивных помех сводится к задаче разделения смеси распределений, загрязненной отметками от подвижных целей. При этом дополнительно используется информация о радиальной скорости, формируемая в устройстве ЦОС. Отметки с малой радиальной скоростью отбираются отдельно, и для них осуществляется процедура, основанная на SEM-алгоритме. Поскольку смесь загрязнена, к нему добавляется шаг, заключающийся в проверке критерия согласия  $\chi^2$  и отбрасывании отметок с наименьшим правдоподобием. Сформированные кластеры выдаются потребителю как области существования пассивных помех, а отброшенные отметки передаются на вход процедуры автозахвата траекторий, адаптивной к уровню пассивных помех.

Автозахват заключается в проверке превышения логарифмического порога  $\Lambda$  по группе отметок:

$$\lambda(\dot{R}_0, \dot{V}) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{m_k} [\ln p_d(k, i) - \ln(1 - p_d(k, i)) - \ln p_f]; p_d(k, i) = p_d(\mathbf{z}_{k,i} | r_0, v_0, v, \varphi_v);$$

$$\Lambda = \int_{\Omega} p(r_0, \varphi_{r_0}, v, \varphi_v) \lambda(\dot{R}_0, \dot{V}) dr_0 d\varphi_{r_0} dv d\varphi_v > \Lambda^*$$

Здесь  $P_d$  - правдоподобие  $i$ -го измерения на  $k$ -ом обзоре:

$$p_d(\mathbf{z} | r_0, v_0, v, \varphi_v) = \frac{1}{2\pi\sigma_r\sigma_\varphi} \exp\left(-\left[r - |\dot{R}_k|\right]^2 / 2\sigma_r^2\right) \exp\left(-\left[\varphi - \arg(\dot{R}_k)\right]^2 / 2\sigma_\varphi^2\right);$$

$$\dot{R}_0 = r_0 \exp(j\varphi_{r_0}); \dot{V} = v \exp(j\varphi_v)$$

где  $\sigma_r$  - СКО ошибки измерения дистанции;  $\sigma_\varphi$  - азимута;  $r_0$  - начальная дистанция для траектории;  $\varphi_{r_0}$  - начальный азимут;  $\varphi_v$  - курс;  $v$  - величина скорости;  $P_f$  - правдоподобие шумовой отметки (зависит от  $F_D$ );  $\Lambda^* = 0$  для метода максимума правдоподобия. В случае превышения порога по данным

точкам после переноса начала координат в первую точку траектории получаются формулы для оценки скорости величины скорости и курса:

$$\hat{v} = \frac{1}{T(m_1 + \dots + m_N)} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{m_k} \frac{r_{i,k}}{k-1}; \quad \hat{\phi}_v = \frac{1}{(m_1 + \dots + m_N)} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{m_k} \varphi_{i,k}$$

Здесь  $\mathbf{z}_{i,k} = [r_{i,k} \ \varphi_{i,k}]^T$ ,  $N$  - количество обзоров, по которым принимается решение;  $m_k$  - количество отметок на  $k$ -ом обзоре.

Комплексный алгоритм вторичной обработки состоит в использовании алгоритма, разработанного в главе 2, дополненного многоканальной фильтрацией по Калману; мультиплексированного с оценкой помеховой обстановки и последующего автозахвата, приведенными в данной главе.

**В четвертой главе** в рамках разработки алгоритма оптимизации многопоточного процесса вторичной обработки данных о целях в реальном времени при наличии временных ограничений:

1. Выработаны рекомендации по декомпозиции ПО на модули с учетом системного анализа;
2. Описан процесс диспетчеризации параллельных потоков для заданных временных ограничений путем минимизации функции, описывающей срыв диспетчеризации;
3. Получено выражение, описывающее вероятность  $P$  срыва диспетчеризации:

$$P \leq \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_i^2}{T_i^2} \left/ \left( 1 - \sum_{i=1}^N \frac{C_i + B_i}{T_i} \right)^2 \right., \quad \text{где } \sigma_i; i=1 \dots N - \text{СКО времени } C_i \text{ выполнения } i\text{-го параллельного потока на периоде } T_i; B_i - \text{ время блокирования на периоде.}$$

На основе этого разрабатывается алгоритм моделирования вторичной обработки с учетом кинематики обзора пространства, параллельных операций и временных ограничений. С помощью разработанного на их основе ПО на реальную траекторию накладывается модельная помеховая обстановка с разной интенсивностью. Предлагаются и рассчитываются наглядные показатели качества, связанные с соотношением штрафов  $I_{10}$  и  $I_{01}$  и функцией точности измерения  $C[P, \tau]$ , использованных при синтезе алгоритма:

*показатель качества работы по ложным отметкам:* частота ложных тревог; показано, что чем выше порог по интенсивности, тем меньше частота ложных тревог в зависимости от интенсивности ложных отметок (Рис. 1, а);

*показатель качества работы по истинным траекториям:* среднее время ожидания (выраженное в обзорах) выдачи истинной трассы; показано, что с

падением вероятности истинного обнаружения время ожидания возрастает (Рис. 1, б).

Подбор соотношения  $I_{10}$ ,  $I_{01}$  в инженерной практике, таким образом, может быть сделан на основе приведенных результатов моделирования из желаемого компромисса между данными показателями качества.

Было осуществлено сравнение работы предлагаемого алгоритма вторичной обработки и традиционного, основанного на «цифровой критерии»  $m/n < 1; m \in \mathbf{Z}; n \in \mathbf{Z}$ , в котором делается подсчет  $m$  попаданий в  $n$  корреляционных стробов. Сравнилось среднее время ожидания до выдачи истинной траектории при одинаковом характере зависимости частоты ложных тревог от вероятности ложной тревоги для одного и другого алгоритма; а также частота ложных тревог – при одинаковом характере зависимости времени ожидания от вероятности истинного обнаружения. Числовой эксперимент с использованием данных реальной трассы показал превосходство предлагаемого алгоритма, результаты можно видеть на Рис. 2.

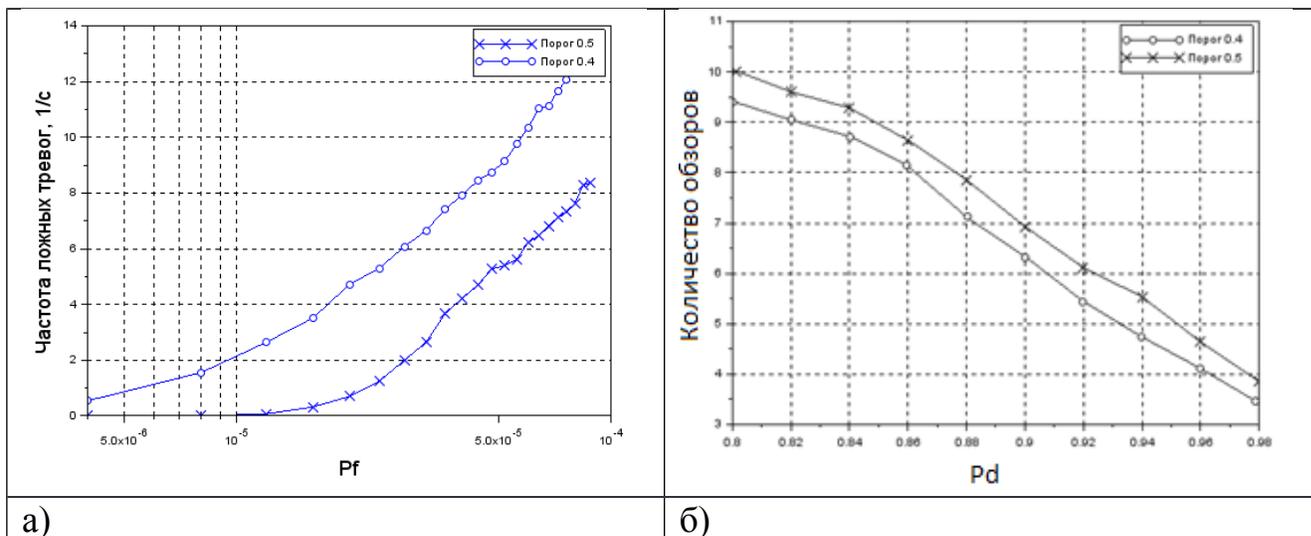


Рис. 1. Показатели качества работы порогового алгоритма: а) средняя частота ложных тревог в зависимости от вероятности ложного обнаружения; б) среднее время ожидания в зависимости от вероятности истинного обнаружения

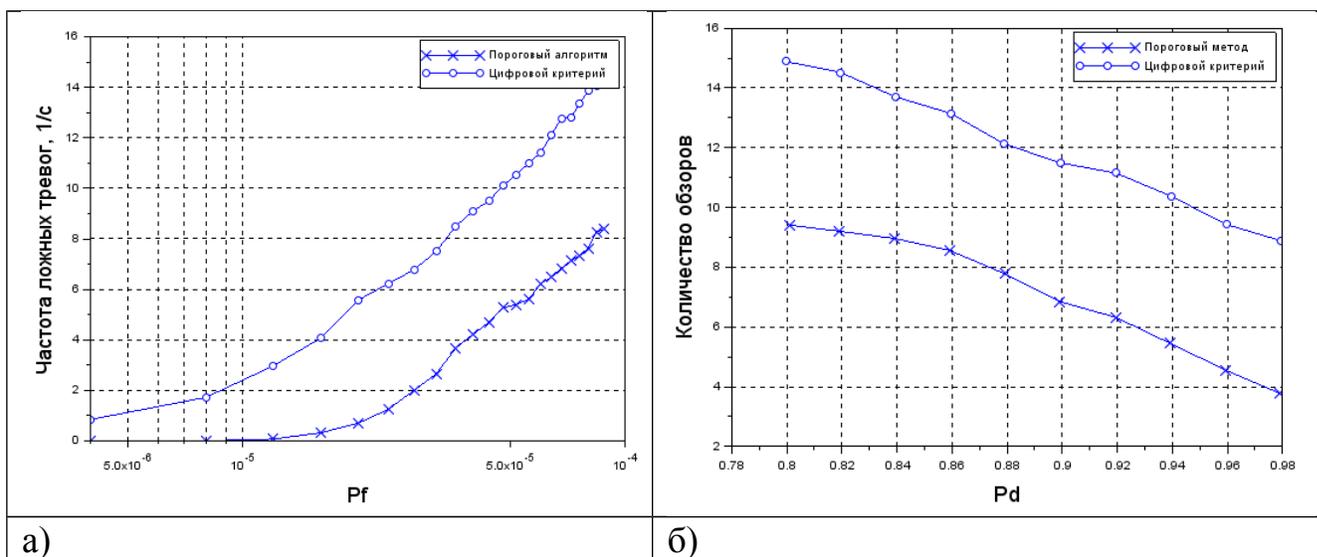


Рис. 2. Сравнение порогового алгоритма и традиционного (основанного на «цифровом критерии»): а) средняя частота ложных тревог в зависимости от вероятности ложного обнаружения; б) среднее время ожидания в зависимости от вероятности истинного обнаружения

Также в 4-ой главе разработана схема эксперимента с использованием ВЧ-части с замыканием выхода передатчика на вход приемника, а также без ВЧ-части на основе проигрывания записей в реальном времени в разных контрольных точках (прибор ЦОС, выход предварительной координатной обработки). Результаты аналогичны численному моделированию.

**В заключении** подведены итоги диссертации.

## Основные результаты работы и выводы

В рамках диссертации:

1. Разработана математическая модель входных данных вторичной обработки информации для одноточечных, распределенных и помеховых объектов в обзорной РЛС;
2. Разработан алгоритм вторичной обработки с адаптивным автозахватом траекторий и разделением малоподвижных и скоростных целей;
3. Приведен синтез многоканального фильтра Калмана для сопровождения маневрирующих и малоподвижных целей в условиях воздействия помех;
4. Разработан алгоритм оптимизации многопоточного процесса вторичной обработки данных о целях в реальном времени при наличии временных ограничений;

5. Разработан алгоритмы моделирования вторичной обработки информации в обзорной РЛС с учетом помеховой обстановки и сложной кинематики обзора пространства;
6. Получены результаты вторичной обработки экспериментальных данных, полученных обзорной РЛС в реальной фоноцелевой обстановке.
7. Показано превосходство предлагаемого алгоритма вторичной обработки над традиционным;
8. Результаты внедрены в системы 5П-10, 5П-10М, 5П-27М, а также используются в учебном процессе кафедры СМ-5 МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Результаты диссертации могут быть использованы в обзорных РЛС подобного класса. Алгоритм вторичной обработки, основанный на наиболее современном математическом подходе к многоцелевой обработке, демонстрирует превосходство над традиционным при заданной функции штрафов. Учет маневрирования и пассивных помех делает его весьма полезным на практике, особенно в рамках приведенной реализации в условиях реального времени и многопоточной обработки вторичной информации. Улучшения, связанные с использованием более сложных моделей помех (в том числе активных) и маневрирования, могут быть положены в основу дальнейших исследований.

### **Список научных работ**

1. Кондрашов К. С. Алгоритм автономного обзора в системе управления оружием // Материалы VI Всероссийской Конференции молодых ученых «Будущее машиностроения». М. 2013. С. 120 – 121 (0.1 п.л./0.1п. л.).
2. Жураковский В. Н., Кондрашов К. С. Автозахват траекторий в режиме автономного обзора в условиях низкой точности входных данных [электронный ресурс] // Электронный научно-технический журнал «Наука и образование», Издатель ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н. Э. Баумана». Эл No ФС77-48211. ISSN 1994-0408. 2013. №12.Режим доступа: DOI: 10.7463/1113.0638017 (дата обращения 01.09.2016)
3. Принципы и особенности разработки программного обеспечения космических аппаратов и его отладки в реальном времени / Кондрашов К. С. [и др.] // Сборник трудов XLVIII Научных чтений памяти К.Э.Циолковского. Калуга. 2013. С.230 – 245 (0.4 п. л. / 0.3 п. л.)
4. Кондрашов К. С., Жураковский В. Н. Алгоритм обнаружения наземных объектов в условиях низкой точности входных данных // Электронный научно-технический журнал «Наука и образование», Издатель ФГБОУ ВПО «МГТУ им.

- Н. Э. Баумана». Эл No ФС77-48211. ISSN 1994-0408.2013.№12.Режим доступа: DOI: 10.7463/1213.0659353 (дата обращения 01.09.2016)
5. Кондрашов К. С. Повышение качества работы малогабаритной обзорной РЛС в условиях сложной фоноцелевой обстановки // Материалы VII Всероссийской Конференции молодых ученых «Будущее машиностроения». М. 2014. С. 90 – 91 (0.1 п. л.)
6. Алгоритм защиты от активных помех в РЛС на подвижном основании / Кондрашов К. С. [и др.] // Электронный научно-технический журнал «Инженерный вестник», Издатель ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н. Э. Баумана». Эл No ФС77-51036. ISSN 2307-0595.2014. №11.Режим доступа: <http://engsi.ru/doc/737934.html> (дата обращения 01.09.2016)
7. Принципы проектирования встраиваемых систем на основе программных средств // Кондрашов К. С. [и др.] Электронный научно-технический журнал «Инженерный вестник», Издатель ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н. Э. Баумана». Эл No ФС77-51036. ISSN 2307-0595. 2014. №11. Режим доступа: <http://engsi.ru/doc/738746.html> (дата обращения 01.09.2016)
8. Кондрашов К. С., Жураковский В. Н., Алгоритм разделения подвижных и малоподвижных целей в автономной обзорной РЛС // Спецтехника и связь . М., 2015, № 2, С. 54 – 61 (0.5 п. л. / 0.4 п. л.)
9. Кондрашов К. С., Жураковский В. Н. Автономный обзор в радиолокационной системе управления артиллерийским комплексом морского базирования // Комплексные проблемы развития науки, образования и экономики региона. Коломна, Научно-практический журнал Коломенского института (филиала) Университета машиностроения. 2015. 1(5) С. 133-146 (0.8 п. л. / 0.7 п. л.)
10. Определение положения наземных объектов на борту космического аппарата / К С Кондрашов [и др.] // Сборник трудов L Научных чтений памяти К.Э.Циолковского. Калуга. 2015.С.130 – 144 (0.4 п. л. / 0.4 п. л.)
11. Рекуррентный алгоритм сопровождения неопределенного количества целей / К. С. Кондрашов [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. – М.: «Радиотехника», 2016, № 6, С. 44-51 (1.2 п. л. /1.2 п. л.)