

1558490

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

ЧЕРНОВ
Максим Вадимович

УДК 629.7.058.53.

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО УГЛОМЕРА
БОРТОВОЙ РЛС С ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ
РЕШЕТКОЙ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ
ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ

05.12.04 -радиолокация и радионавигация

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва -1998

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете (МГТУ) имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель - кандидат технических наук, старший научный сотрудник Родзивилов В.А.

Научный консультант - доктор технических наук, член - корреспондент Международной академии информатизации Саблин В.Н.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Шахтарин Б.И.

- кандидат технических наук, старший научный сотрудник Курилкин В.В.

Ведущая организация - АО "Центральный научно-исследовательский институт радиоэлектронных систем" (г. Москва)

Защита состоится "24" июня 1998 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета ССД 053.02.06 в МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, г. Москва, Б-5, 2-я Бауманская ул., д.5

Собраться в библиотеке универси-

тета 1998 г.

Председатель
диссертационного совета
технических наук,

З. Кулагин

В 77 Объем 1,0 п.л. Тир.

И.Э. Баумана

1558490

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основным источником информации о воздушной обстановке на современных истребителях четвертого поколения являются бортовые импульсно-доплеровские РЛС, которые, вобрав в себя последние достижения радиоэлектроники и вычислительной техники, превратились в сложнейшие радиоэлектронные комплексы, оказывающие существенное влияние на исход воздушного боя. Обеспечение высокой эффективности бортовых РЛС (БРЛС) представляет собой важнейшую задачу, на реализацию которой направлены основные усилия разработчиков.

В связи с существенным улучшением в ближайшей перспективе летных характеристик самолетов, средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и дальнейшим совершенствованием тактики воздушного боя выполнение указанной выше задачи в будущем может оказаться весьма проблематичным. Данное утверждение объясняется следующими двумя обстоятельствами.

Первое следует из появления сверхманевренных самолетов, что приводит к значительному изменению динамики входных воздействий, отрабатываемых следящими радиолокационными измерителями, в частности, угломерами. Последние рассчитаны на обработку входных воздействий, изменение которых во времени описывается полиномом не выше второй степени, соответствующим движению цели с постоянной относительной поперечной скоростью по отношению к линии визирования. Для маневрирующей цели либо маневрирующего истребителя изменение углового положения линии визирования во времени аппроксимируется полиномом третьей и более высокой степени. В существующих угломерах, как показывает анализ, это приводит к недопустимому росту динамических ошибок и срыву слежения.

Второе обстоятельство обусловлено недостаточной помехоустойчивостью современных БРЛС при действии локальных (неизотропных по пространству) помех, т.е. преднамеренных активных помех, источники которых пространственно не совмещены с целью. Для борьбы с локальными помехами в БРЛС применяются некогерентные компенсаторы помех, осуществляющие угловое стробирование. Использование данного метода приводит к тому, что наряду с помеховыми подавляются и полезные сигналы, отраженные от цели. Кроме того, подавление помех возможно лишь при значительном угловом разное цели и постановщика помех (ПП). Устранение указанных недостатков может быть достигнуто внедрением в БРЛС адаптивных фазированных антенных решеток (ФАР), либо когерентных автокомпенсаторов помех. Однако процесс адаптации в подобных устройствах занимает некоторое время, зависящее от способа адаптации и конкретных характеристик

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1558490

Чернов М. В. Оптимизация а

3

М Г Т У
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

БРЛС и действующих помех, и не может быть меньше определенной величины. Поэтому при быстром изменении помеховой обстановки, когда средства помехозащиты не успевают адаптироваться к частым изменениям, эффективность БРЛС резко падает. В то же время нестационарность помеховой обстановки характерна для боевых действий истребительной авиации и вызывается случайным изменением числа, мощности и вида преднамеренных помех, перемещением в пространстве ПП с большими скоростями, а также специально разработанной тактикой применения средств РЭБ. Из изложенного вытекает актуальность проведения исследований, направленных на устранение указанных недостатков БРЛС.

Цель работы заключается в разработке предложений по повышению помехоустойчивости и точности следающего угломера БРЛС с ФАР, сопровождающей интенсивно маневрирующие воздушные цели в условиях нестационарной помеховой обстановки.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- синтезированные квазиоптимальные алгоритмы совместного оценивания угловых параметров относительного движения интенсивно маневрирующей одиночной цели и управления лучом ФАР и истребителем в режиме непрерывной пеленгации;

- синтезированный квазиоптимальный алгоритм совместного оценивания параметров относительного движения цели и управления лучом ФАР при дискретном поступлении информации;

- предложения по структуре (составу, содержанию и взаимодействию) алгоритмов функционирования БРЛС с элементами искусственного интеллекта;

- разработанный на основе метода Прони и процедуры Берлекэмп алгоритм совместного оценивания числа, мощности и угловых координат постановщиков помех;

- имитационная модель для нахождения параметров временной диаграммы БРЛС, обеспечивающих устойчивое и высокоточное полуактивное самонаведение ракет;

- результаты исследования точностных характеристик квазиоптимального угломера.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней:

- разработана структурная схема комплексного радиолокационного следающего угломера, функционирующего в условиях нестационарной сигнально-помеховой обстановки;

- получены оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы совместного оценивания угловых параметров относительного движения интенсивно маневрирующей одиночной цели и управления лучом ФАР и истребителем;

- разработан метод совместного оценивания числа, мощности и угловых координат постановщиков помех.

Практическая значимость работы определяется тем, что в ней:

- теоретически обоснованы методы пространственно-временной обработки сигналов в БРЛС, функционирующей в условиях нестационарной помеховой обстановки;

- на основе статистической теории оптимального управления разработаны алгоритмы оценивания угловых параметров относительного движения интенсивно маневрирующей цели и управления лучом ФАР и истребителем при непрерывном и дискретном поступлении радиолокационной информации;

- разработаны предложения по структуре алгоритмов функционирования интеллектуальной антенной решетки;

- дан анализ нелинейных методов спектрального оценивания угловых координат, мощности и числа источников излучения, разработан легко реализуемый на практике алгоритм определения числа, мощности сигналов и угловых координат постановщиков помех и проведено его экспериментальное исследование;

- обоснованы временные параметры функционирования дискретного угломера БРЛС, обеспечивающие устойчивость дискретного контура полуактивного самонаведения ракеты класса "воздух-воздух";

- разработана цифровая имитационная модель квазиоптимального угломера и исследованы его точностные характеристики.

Достоверность полученных результатов подтверждается численным моделированием предложенного алгоритма спектрального анализа, синтезированного комплексного угломера и дискретного контура полуактивного самонаведения ракеты класса "воздух-воздух", а также совпадением экспериментальных данных с установленными ранее общими закономерностями.

Внедрение результатов работы. Основные результаты диссертации реализованы в отчетах по научно-исследовательским работам "Экзотика", "Завертка", "Телеметрия-75" и "Экзотика-МО", выполненным в МГТУ им. Н.Э. Баумана и в ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. По результатам работы автором написаны три учебных пособия, а также поставлена одна лабораторная работа.

Математический аппарат и методы исследований. Для решения поставленных задач в работе использованы статистическая теория оптимального управления (СТОУ) и теория оптимальной фильтрации, теория ситуационного управления и теория искусственного интеллекта, теория адаптивных антенных решеток, теория разностных уравнений, нелинейные методы спектрального анализа, методы цифрового имитационного моделирования и статистической обработки результатов численного эксперимента.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертации докладывались автором на заседаниях кафедры радиоэлектронных систем и устройств МГТУ им. Н.Э. Баумана, реализо-

ваны в учебном процессе МГТУ им. Н.Э. Баумана и ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, а также изложены в материалах четырех отчетов по НИР.

По теме диссертации опубликовано 16 научных статей и три учебных пособия.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Объем работы составляет 203 страницы текста, в том числе 52 иллюстрации и пять таблиц. Список литературы состоит из 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цель работы и круг решаемых задач, указаны ее практическая значимость и научная новизна.

В первой главе приведены характеристики современных и перспективных воздушных целей, описаны средства РЭБ и тактика их применения, дан детальный анализ и показаны недостатки алгоритмов функционирования современных угломеров, рассмотрены возможности адаптивных антенных решеток по подавлению помех. Разработан радиолокационный комплексный следающий угломер (рис. 1), в котором контроль нестационарной помеховой обстановки

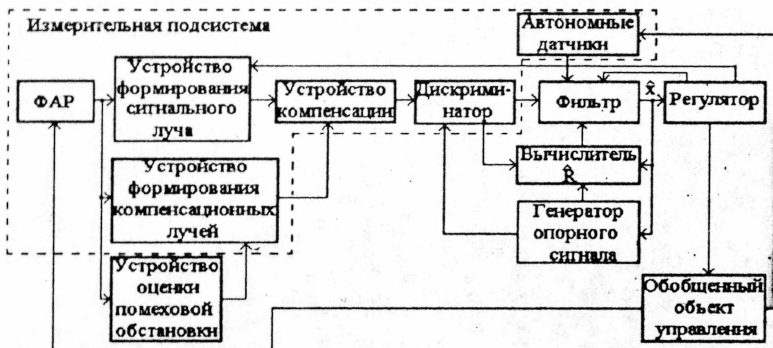


Рис. 1

и отслеживание интенсивно маневрирующей цели возлагаются на различные устройства. С помощью устройства формирования "сигнального" луча диаграмма направленности (ДН) устанавливается на цель. Устройство формирования компенсационных лучей образует вспомогательные лучи, каждый из которых направлен на свой ПП. Количество и угловые координаты ПП определяются в устройстве оценки помеховой обстановки. В результате получается

вторичная антенная решетка (АР), главной особенностью которой является сравнительно небольшое число приемных каналов, так как число M постановщиков помех ограничено (в типовой ситуации $M=3-5$). Подавление помеховых сигналов осуществляется до дискриминатора в устройстве компенсации, функционирующем на основе известных и достаточно отработанных адаптивных алгоритмов. Выходные сигналы устройства компенсации совместно с опорными сигналами используются в дискриминаторе для выработки напряжения, характеризующего отклонение цели относительно оси ДН сигнального луча. Подобное решение позволяет использовать в предлагаемом углемере стандартные дискриминаторы, хорошо зарекомендовавшие себя на практике, например, моноимпульсный амплитудный суммарно-разностный пеленгатор. Фильтр вместе с вычислителем корреляционной матрицы R ошибок фильтрации на основе сигналов, поступающих от дискриминатора и автономных датчиков параметров собственного движения истребителя, обеспечивает формирование оценок параметров относительного и абсолютного движения цели и самолета.

Во второй главе выполнен детальный синтез алгоритмов фильтрации и управления, осуществленный методами СТОУ. Согласно теореме разделения, эти алгоритмы синтезированы раздельно. При нахождении оценок параметров движения цели и самолетов в качестве базовых использованы алгоритмы оптимальной линейной фильтрации (калмановской фильтрации). Для режима непрерывной пеленгации получен квазиоптимальный фильтр при условии, что истребитель движется с постоянной поперечной скоростью либо с постоянным поперечным ускорением, а первичными измерительными устройствами для него являются пеленгатор, акселерометр, позиционный гироскоп и датчик углового положения луча. Для уменьшения размерности решаемой задачи использован принцип декомпозиции исходного вектора состояния на три подвектора. В результате получены алгоритмы оценивания для трех фильтров: отслеживаемого процесса, собственных параметров и управителя положением луча. Синтезированный углемер представляет многоконтурную нестационарную следящую систему, в которой точность и устойчивость обеспечиваются разными контурами.

В работе для метода наведения в наивыгоднейшую упрежденную точку встречи синтезированы оптимальные регулятор и фильтр. В качестве уравнений состояния обобщенного объекта управления использована следующая система скалярных дифференциальных уравнений:

$$\dot{\varepsilon}_r = \omega_r, \quad \varepsilon_r(0) = \varepsilon_{r0}; \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_r = -\frac{2\dot{D}}{D}\omega_r + \frac{1}{D}(j_{цб} - j_б), \quad \omega_r(0) = \omega_{r0}; \quad (2)$$

$$\dot{j}_{цб} = -\alpha_{jц} j_{цб} + \xi_{jц}, \quad j_{цб}(0) = j_{цб0}; \quad (3)$$

$$\dot{j}_б = -g\omega_x + \xi_{jб}, \quad j_б(0) = j_{б0}; \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_x = -K_{\omega x} \omega_x + K_{\delta\alpha} \delta_\alpha, \quad \omega_x(0) = \omega_{x0}; \quad (5)$$

$$\dot{\psi} = \frac{1}{V_c} j_б, \quad \psi(0) = \psi_0; \quad (6)$$

$$\dot{\phi}_y = \omega_y, \quad \phi_y(0) = \phi_{y0}; \quad (7)$$

$$\dot{\omega}_y = bu_\omega + \xi_{\omega y}, \quad \omega_y(0) = \omega_{y0}; \quad (8)$$

В соотношениях (1)-(8): ϵ_r и ω_r - угол визирования цели и угловая скорость линии визирования в горизонтальной плоскости; D и $\dot{D}$ - дальность до цели и скорость ее изменения; $j_{цб}$ и $j_б$ - боковые ускорения цели и истребителя; $\alpha_{jц}$ - коэффициент, учитывающий маневренные свойства цели; ω_x - угловая скорость вращения самолета вокруг продольной оси; g - ускорение силы тяжести; δ_α - угол отклонения элеронов; коэффициенты $K_{\omega x} = 1/T_\gamma$, $K_{\delta\alpha} = K_\gamma/T_\gamma$; T_γ - аэродинамическая постоянная времени для канала крена самолета; K_γ - коэффициент передачи самолета по каналу крена; ψ - угол рыскания; V_c - скорость истребителя; ϕ_y и ω_y - угол поворота луча антенны и скорость его вращения; u_ω - сигнал управления положением луча; b - коэффициент усиления; $\xi_{jц}$, $\xi_{jб}$ и $\xi_{\omega y}$ - центрированные белые шумы с известными односторонними спектральными плотностями $G_{jц}$, $G_{jб}$ и $G_{\omega y}$.

Модель наблюдений определяется соотношениями:

$$z_1 = K_\Delta (\epsilon_r - \psi - \phi_y) + \xi_{\Delta}; \quad (9)$$

$$z_2 = K_j j_б + \xi_{jб}; \quad (10)$$

$$z_3 = K_\psi \psi + \xi_{\psi}; \quad (11)$$

$$z_4 = K_\phi \phi_y + \xi_{\phi}; \quad (12)$$

где z_1 , z_2 , z_3 и z_4 - соответственно сигналы на выходах моноимпульсного пеленгатора, акселерометра, позиционного гироскопа и датчика углового положения антенны; K_Δ , K_j , K_ψ и K_ϕ - их коэффициенты передачи; ξ_Δ , $\xi_{jб}$, ξ_{ψ} и ξ_{ϕ} - центрированные белые шумы измерений с известными односторонними спектральными плотностями G_Δ , $G_{jб}$, G_ψ и G_ϕ . Выбранные первичные измерители гарантируют формирование оптимальных оценок всех фазовых координат вектора состояния (1)-(8).

Синтез фильтра осуществлен на основе моделей (1)-(8) обобщенного вектора состояния и вектора наблюдения (9)-(12) при условии, что D , $\dot{D}$ и V_c оцениваются в отдельных измерителях дальности, скорости сближения и скорости самолета. В результате по-

лучены оптимальные алгоритмы оценивания

$$\begin{aligned}
\hat{\varepsilon}_r &= \hat{\omega}_r + z_{кп1}, & \hat{\varepsilon}_r(0) &= \varepsilon_{r0}; \\
\hat{\omega}_r &= -\frac{2\hat{\Gamma}}{\hat{\Gamma}} \hat{\omega}_r + \frac{1}{\hat{\Gamma}} (\hat{j}_{цб} - \hat{j}_6) + z_{кп2}, & \hat{\omega}_r(0) &= \omega_{r0}; \\
\hat{j}_{цб} &= -\alpha_{j_{цб}} \hat{j}_{цб} + z_{кп3}, & \hat{j}_{цб}(0) &= 0; \\
\hat{j}_6 &= -g \hat{\omega}_x + z_{кп4}, & \hat{j}_6(0) &= j_{60}; \\
\hat{\omega}_x &= -K_{\omega x} \hat{\omega}_x + K_{\delta_9} \delta_9 + z_{кп5}, & \hat{\omega}_x(0) &= \omega_{x0}; \\
\hat{\psi} &= \frac{1}{\hat{V}_c} \hat{j}_6 + z_{кп6}, & \hat{\psi}(0) &= \psi_0; \\
\hat{\phi}_y &= \hat{\omega}_y + z_{кп7}, & \hat{\phi}_y(0) &= \phi_{y0}; \\
\hat{\omega}_y &= b u_{\omega} + z_{кп8}, & \hat{\omega}_y(0) &= \omega_{y0};
\end{aligned} \quad (13)$$

где оптимальные сигналы управления u_{ω} и δ_9 определяются выражением

$$u = \begin{bmatrix} u_{\omega} \\ \delta_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{bq_{21}}{K_{11}} (\hat{\varepsilon}_r - \hat{\psi} - \hat{\phi}_y) + \frac{bq_{22}}{K_{11}} (\hat{\omega}_r - \frac{\hat{j}_6}{\hat{V}_c} - \hat{\omega}_y) \\ \frac{K_{\delta_9} q_{43}}{K_{22}} (\frac{\hat{\Gamma}}{K_{\Delta V}} \hat{\omega}_r - \hat{\varepsilon}_r + \hat{\psi}) - \frac{K_{\delta_9} q_{44}}{K_{22}} \hat{\omega}_x \end{bmatrix}, \quad (14)$$

а вычисление корректирующих поправок $z_{кп1}$ - $z_{кп8}$ выполняется в соответствии с системой уравнений

$$\begin{aligned}
z_{кп1} &= \frac{2K_{\Delta}}{G_{\Delta 1}} d_{11} \Delta z_1 + \frac{2K_j}{G_{j6и}} d_{14} \Delta z_2 + \frac{2K_{\psi}}{G_{\psi и}} d_{16} \Delta z_3 + \frac{2K_{\phi}}{G_{\phi и}} d_{17} \Delta z_4; \\
z_{кп2} &= \frac{2K_{\Delta}}{G_{\Delta 1}} d_{21} \Delta z_1 + \frac{2K_j}{G_{j6и}} d_{24} \Delta z_2 + \frac{2K_{\psi}}{G_{\psi и}} d_{26} \Delta z_3 + \frac{2K_{\phi}}{G_{\phi и}} d_{27} \Delta z_4; \\
z_{кп3} &= \frac{2K_{\Delta}}{G_{\Delta 1}} d_{31} \Delta z_1 + \frac{2K_j}{G_{j6и}} d_{34} \Delta z_2 + \frac{2K_{\psi}}{G_{\psi и}} d_{36} \Delta z_3 + \frac{2K_{\phi}}{G_{\phi и}} d_{37} \Delta z_4; \\
z_{кп4} &= \frac{2K_{\Delta}}{G_{\Delta 1}} d_{41} \Delta z_1 + \frac{2K_j}{G_{j6и}} d_{44} \Delta z_2 + \frac{2K_{\psi}}{G_{\psi и}} d_{46} \Delta z_3 + \frac{2K_{\phi}}{G_{\phi и}} d_{47} \Delta z_4; \\
z_{кп5} &= \frac{2K_{\Delta}}{G_{\Delta 1}} d_{51} \Delta z_1 + \frac{2K_j}{G_{j6и}} d_{54} \Delta z_2 + \frac{2K_{\psi}}{G_{\psi и}} d_{56} \Delta z_3 + \frac{2K_{\phi}}{G_{\phi и}} d_{57} \Delta z_4; \\
z_{кп6} &= \frac{2K_{\Delta}}{G_{\Delta 1}} d_{61} \Delta z_1 + \frac{2K_j}{G_{j6и}} d_{64} \Delta z_2 + \frac{2K_{\psi}}{G_{\psi и}} d_{66} \Delta z_3 + \frac{2K_{\phi}}{G_{\phi и}} d_{67} \Delta z_4;
\end{aligned}$$

$$z_{\text{кп7}} = \frac{2\kappa_{\Delta}}{G_{\Delta 1}} d_{71} \Delta z_1 + \frac{2\kappa_j}{G_{j_{6и}}} d_{74} \Delta z_2 + \frac{2\kappa_{\psi}}{G_{\psi и}} d_{76} \Delta z_3 + \frac{2\kappa_{\phi}}{G_{\phi и}} d_{77} \Delta z_4;$$

$$z_{\text{кп8}} = \frac{2\kappa_{\Delta}}{G_{\Delta 1}} d_{81} \Delta z_1 + \frac{2\kappa_j}{G_{j_{6и}}} d_{84} \Delta z_2 + \frac{2\kappa_{\psi}}{G_{\psi и}} d_{86} \Delta z_3 + \frac{2\kappa_{\phi}}{G_{\phi и}} d_{87} \Delta z_4.$$

Здесь: q_{11} , $q_{12}=q_{21}$ и q_{22} - коэффициенты штрафов на точность слежения по углу и угловой скорости, задаваемые при оптимизации управления положением луча; q_{33} , $q_{34}=q_{43}$ и q_{44} - коэффициенты штрафов на точность слежения, задаваемые при оптимизации управления самолетом; k_{11} и k_{22} - коэффициенты штрафов на величину сигналов управления u_{ω} и δ_a ; d_{ij} (d_{ϵ} , d_{ω} , $d_{j_{\text{дб}}}$, d_{j_6} , d_{ω_x} , d_{ψ} , d_{ϕ_y} , d_{ϕ_y}) - дисперсии ошибок оценивания ϵ_r , ω_r , $j_{\text{дб}}$, j_6 , ω_x , ψ , ϕ_y , ω_y соответственно, а d_{ij} характеризуют взаимные дисперсии ошибок оценивания тех же параметров, вычисляемые в результате решения уравнений Риккати.

Невязки формируются согласно формулам

$$\Delta z_1 = z_1 - \kappa_{\Delta}(\hat{\epsilon}_r - \hat{\psi} - \hat{\phi}_y); \quad \Delta z_2 = z_2 - \kappa_{j_6} \hat{j}_6;$$

$$\Delta z_3 = z_3 - \kappa_{\psi} \hat{\psi}; \quad \Delta z_4 = z_4 - \kappa_{\phi} \hat{\phi}_y. \quad (15)$$

На основе уравнений (13)-(15) разработана структурная схема следящего угломера (рис. 2).

Схема содержит каналы измерения, фильтрации и управления. Корректирующие поправки поступают на входы соответствующих интеграторов.

Анализ структурной схемы показывает, что фильтр представляет собой многоконтурную нестационарную следящую систему, что дает возможность одновременно обеспечить высокую точность, быстроедействие и устойчивость угломера.

Регулятор содержит два канала: в одном из них вырабатывается оптимальный сигнал управления элеронами, а в другом - образуется оптимальный сигнал управления заданной частью устройства управления положением луча антенны.

Наряду с оптимальным фильтром в результате декомпозиции исходного вектора состояния синтезирован квазиоптимальный фильтр. Положительным свойством всех синтезированных угломеров является их робастность.

В диссертационной работе произведен синтез квазиоптимального дискретного угломера. Его особенностью является разбиение фильтра на два подфильтра: фильтр параметров собственного движения и фильтр автосопровождения и управителя положением сигнального луча. В последнем коррекция от пеленгатора производится с темпом, определяемым периодом T обзора БРЛС. Обычно величина T выбирается на основе соотношений, полученных при разработке алгоритмов автоматического сопровождения целей в режиме обзора. Но от величины T зависит не только эффективность

прямых, так и градиентных методов вычисления вектора весовых коэффициентов. Последние обладают большей устойчивостью к действию дестабилизирующих факторов и могут функционировать в условиях нестационарных во времени помех.

Предложенная схема с компенсацией сигналов на выходе вспомогательных каналов по сравнению с вариантом полностью адаптивной ФАР при использовании прямого метода нахождения вектора весовых коэффициентов позволяет сократить количество вычислений в $(N_{ар} / M + 1)^3$ раз, где $N_{ар}$ - число элементов АР, M - число ПП. Разработанный вариант по сравнению со схемой, в которой для установки нулей ДН антенны в направлениях на ПП применяются градиентные методы с корреляционными обратными связями и, в частности, когерентные автокомпенсаторы боковых лепестков, дает возможность получить выигрыш во времени адаптации, равный $(R_{пмакс} / R_{пмин})$ раз, где $R_{пмин}$ и $R_{пмакс}$ соответственно минимальная и максимальная мощности помех на входе АР.

Достоинством предложенной схемы угломера является возможность контроля складывающейся помеховой обстановки. Отличительной особенностью процедуры оценивания числа и угловых координат ПП являются большие отношения мощностей активных помех к мощности внутреннего шума, что создает благоприятные условия для пеленгации ПП с применением современных методов спектрального анализа.

При рассмотрении путей построения вспомогательных помеховых каналов в работе проанализированы возможности существующих методов и алгоритмов разделения сигналов ПП по различным приемным каналам. Сделан вывод о том, что решение этой задачи целесообразно выполнять последовательно: вначале оценивается число и угловые координаты ПП, затем формируются отдельные ДН, каждая из которых ориентирована на "свой" ПП. Исходя из этого в работе рассмотрены различные алгоритмы оценивания числа и угловых координат ПП. На основе обобщения многочисленных иностранных и отечественных источников дан анализ наиболее известных методов углового спектрального оценивания, таких как методы максимального правдоподобия, линейного предсказания, максимальной энтропии, минимальной нормы, MUSIC, ROOT-MUSIC, ESPRIT, который показал, что основной их недостаток связан с необходимостью определения корреляционной матрицы (КМ) входных сигналов и последующего нахождения собственных значений и собственных векторов, требующих значительных вычислительных затрат и времени.

С целью устранения указанного недостатка автором на основе метода Прони и процедуры Берлекэмпа разработан алгоритм оценивания числа, угловых координат и амплитуд сигналов источников излучения (ИИ). Суть его состоит в том, что с помощью процедуры Берлекэмпа по входной выборке, состоящей из отсчетов ком-

плексных амплитуд на антенных элементах решетки, находится полином, корни которого однозначно связаны с угловыми координатами ИИ. В результате отпадает необходимость в решении системы линейных алгебраических уравнений, число которых должно быть заранее известно и равно количеству ИИ.

По сравнению с алгоритмами, основанными на знании КМ помех, модифицированный алгоритм позволяет сократить время, отводимое на получение обучающей выборки, в $2N_{ар}$ раз при стандартной процедуре оценивания выборочной КМ помех, в $\sqrt{(N_{ар} + 1)M} - 1$ раз при процедуре Черемисина и в M раз при регуляризованной процедуре Абрамовича. Однако последние две процедуры предполагают заранее известным число ПП, что делает проблематичным их использование.

Проведено моделирование разработанного алгоритма, которое позволило проанализировать поведение оценок угловых координат и амплитуд сигналов ИИ во времени, найти зависимости точностных характеристик алгоритма от отношения сигнал-шум (ОСШ) и углового разноса ИИ, определить угловую разрешающую способность и выявить некоторые особенности функционирования предлагаемого алгоритма. Так, алгоритм обеспечивает одновременную целенаправленную селекцию ИИ в заданном угловом секторе и возможность оперировать с сигналами ИИ, имеющими в том числе и одинаковые амплитуды. В качестве примера на рис. 3 для пятиэлементной АР показано поведение в дискретные последовательные моменты времени оценок угловых координат двух ИИ, разнесенных на угол 25° . По отношению к ширине θ_0 ДН пятиэлементной антенной решетки, получаемой при обычной согласованной обработке радиосигналов, данный разнос составляет примерно 0,9 от значения θ_0 . На графике по оси ординат отложены значения углов, а по оси абсцисс - номера выборок комплексных амплитуд сигналов, принимаемых элементами АР. Алгоритм позволяет оценивать амплитуды сигналов, что подтверждается рис. 4. Наличие шума, как видно из рисунков, приводит к флуктуациям оценок. При моделировании сектор обзора выбирался равным $\pm 70^\circ$.

Разработанный алгоритм характеризуется повышенным угловым разрешением. Установлено, что, например, для пятиэлементной АР при ОСШ=22 дБ два ИИ разрешаются при угловом разносе, равном $0,2\theta_0$. С уменьшением ОСШ угловое разрешение ухудшается. Точность оценивания угловых координат с ростом углового расстояния между разрешаемыми ИИ вначале уменьшается, а затем стабилизируются примерно на одном уровне, равном приблизительно $(1/120)\theta_0$ при ОСШ=22 дБ. С увеличением ОСШ среднеквадратическая ошибка оценивания углов уменьшается. Аналогичные результаты получены и для АР с большим числом антенных элементов.

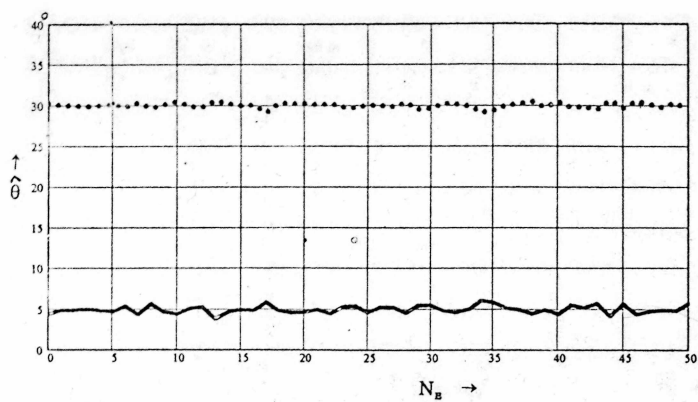


Рис. 3

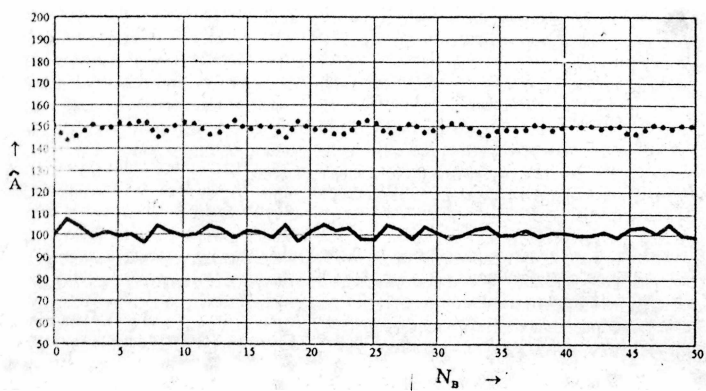


Рис. 4

В четвертой главе для более полного анализа влияния различных факторов, которые необходимо учитывать при оптимизации временной диаграммы работы бортовой системы в режиме полуактивного наведения, выполнено математическое моделирование реального контура самонаведения ракеты класса "воздух-воздух". Необходимость моделирования объясняется тем, что аналитические соотношения, полученные при теоретическом анализе условий устойчивости, справедливы для максимально упрощенного линейаризованного контура самонаведения, не учитывающего инерционность его элементов. В результате моделирования установлено, что устойчивость контура зависит от маневренных характеристик цели и ракеты и от условий их боевого применения. Так, например, при одинаковых высотах полета цели и ракеты, равных 7,5 км, и перегрузке $n_{ц}$, развиваемой целью, равной четырем единицам, период подсвета цели T и, следовательно, темп сопровождения цели углом не должен превышать 1,6 с. При $n_{ц}=7$ и при тех же высотах полета контур самонаведения устойчив, если период T не превышает 0,8 с. При разности начальных высот полета ракеты и цели в момент пуска в 3 км и $n_{ц}=4$ допустимое значение периода подсвета уменьшается до 0,4 с. Результаты моделирования показали целесообразность использования информации о тактических параметрах при оптимизации временной диаграммы БРЛС.

Экспериментально оценена точность квазиоптимального угламера, содержащего три фильтра и реализованного посредством цифрового моделирования. Исследованы реальные ошибки угламера (отклонение оценок от их истинных значений) при разном уровне шума на выходе пеленгатора, обусловленного внутренним шумом приемных каналов, угловым шумом цели и нескомпенсированными остатками локальных (неизотропных по пространству) помех. Выполнен сравнительный анализ квазиоптимального и стандартного угламеров, который показал, что по отношению к стандартному угламеру БРЛС самолета МиГ-29 квазиоптимальный угламер при угловом ускорении цели относительно истребителя $\dot{\omega}_{ц} = 10-15$ град/с² имеет в 6-9 раз большую точность. Квазиоптимальный угламер в отличие от стандартного адаптивен к изменениям дальности и скорости сближения. Длительность переходных процессов в квазиоптимальном угламере не менее чем в 4,4 раза меньше аналогичного показателя стандартного угламера. Время памяти в квазиоптимальном угламере составляет 4,5-7,2 секунд, а в стандартном - менее 3-4 секунд.

В приложениях выполнен синтез квазиоптимального дискретного угламера и найдены соотношения для выбора периода его работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе сформулирована и решена научная задача, заключающаяся в разработке принципов построения и алгоритмов функционирования помехоустойчивого комплексного следающего угломера БРЛС с ФАР, обеспечивающих сопровождение интенсивно маневрирующих воздушных целей в условиях нестационарной помеховой обстановки. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Показано, что практическое решение задачи радиолокационного наблюдения воздушных целей в условиях нестационарной помеховой обстановки может быть осуществлено при использовании методов искусственного интеллекта. При этом подсистему оптимальной обработки сигналов при действии нестационарных локальных помех следует строить по схеме с компенсацией помех на выходах сформированных пространственных каналов, обеспечивающих оптимальное выделение локальных помех на фоне внутренних шумов и имеющих такие же диаграммы направленности, как и "сигнальный" канал. Такая схема позволяет сократить количество вычислений в 64 раза по сравнению с вариантом типовой модульной АР с числом модулей, равным 16, и ожидаемом стандартном числе ПП, равном трем.

2. Для адаптации бортовых РЛС с ФАР к условиям нестационарной помеховой обстановки в составе угломера необходимо иметь специальное устройство оценивания числа и параметров сигналов постановщиков помех. Разработан алгоритм совместного оценивания угловых координат, мощности и числа ИИ, который не требует знания КМ входных сигналов и отличается простотой вычислительных операций, обеспечивая дополнительный выигрыш во времени получения обучающей выборки для типового (расчетного) случая в 32 раза по сравнению со стандартной процедурой оценивания КМ помех, в 6,1-8,2 раза по сравнению с процедурой Черемисина и в 3-5 раз по сравнению с регуляризованной процедурой Абрамовича. При действии непрерывных шумовых помех время получения обучающей выборки имеет тот же порядок, что и длительность зондирующего сигнала.

3. Выполнены экспериментальные исследования разработанного алгоритма спектрального оценивания, подтвердившие его способность выполнять одновременную пеленгацию нескольких ИИ в заданной зоне обзора и возможность получения углового сверхразрешения ИИ. Установлено, что величина углового разрешения зависит от ОСЦ, а СКО углового оценивания определяется ОСЦ и угловым разносом ИИ.

4. Осуществлен синтез квазиоптимального комплексного радиолокационного многоконтурного следающего угломера для режимов непрерывной и дискретной пеленгации при различных вариан-

тах декомпозиции обобщенного вектора состояния, позволяющих существенно снизить размерность решаемой задачи по сравнению с оптимальным случаем. Выполнен совместный синтез алгоритмов функционирования оптимального и квазиоптимального следящих угломеров и регулятора траекторного управления при неведении истребителя в наиболее выгодную упрежденную точку встречи в режиме непрерывной пеленгации.

5. Разработаны структурные схемы комплексных многоконтурных следящих угломеров, в которых можно одновременно добиться повышения точности, быстродействия и устойчивости сопровождения высокоманевренных целей.

6. Теоретически и экспериментально найдены зависимости периода работы дискретного угломера и связанного с ним периода подсвета цели от параметров контура полуактивного самонаведения ракеты класса "воздух-воздух". Установлено, что при выборе рационального значения периода подсвета цели необходимо учитывать не только маневренные свойства цели и ракеты, но и высоты их полета в момент пуска.

7. Проведено моделирование синтезированного угломера, позволяющее судить о его высокой точности, быстродействии и устойчивости во всем возможном диапазоне угловых ускорений линии визирования, боковых ускорений цели, ошибок захвата при любом их сочетании по знаку и в широком интервале изменения интенсивностей всех видов возмущений. По сравнению со стандартными отечественными угломерами квазиоптимальный угломер при угловом ускорении линии визирования $\dot{\omega}_{го} = 10-15$ град/с² имеет в 6-9 раз большую точность. Квазиоптимальный угломер адаптирован к изменениям дальности и скорости сближения. Длительность переходных процессов в квазиоптимальном угломере не менее чем в 4 раза меньше аналогичного показателя стандартного угломера. Время памяти в квазиоптимальном угломере составляет 4,35...7,2 с, а в стандартном - менее 3-4 секунд.

Внедрение результатов исследований позволило получить существенный эффект, подтвержденный соответствующими актами.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Алгоритмы оценивания угловых координат источников излучения, основанные на методах спектрального анализа / В.А. Родивилов, И.В. Федоров, М.В. Чернов и др. // Зарубежная радиоэлектроника. - 1998. - № 2. - С. 8-17.

2. Головинский А.Н., Чернов М.В. Устойчивость дискретного контура самонаведения ракеты класса "воздух-воздух" с полуактивной РГС // Многофункциональные радиоэлектронные комплексы: Научно-методические материалы / Под ред. Г.С. Кондратенкова. - М: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1996. - С. 161-168.

3. Дрогалин В.В., Меркулов В.И., Чернов М.В. Оптимизация

алгоритмов функционирования следающего угломера бортовой РЛС, обеспечивающей перехват интенсивно маневрирующих воздушных целей в условиях локальных помех: Учебное пособие / Под ред. В.Н. Антипова. - М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1996. - 94 с.

4. Дрогалин В.В., Меркулов В.И., Чернов М.В. Синтез квазиоптимального угломера, сопровождающего интенсивно маневрирующую цель в режиме дискретного поступления радиолокационной информации // Многофункциональные радиоэлектронные комплексы: Научно-методические материалы / Под ред. Г.С. Кондратенкова. - М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1997. - С. 3-18.

5. Дрогалин В.В., Меркулов В.И., Чернов М.В. Совместный синтез угломера и регулятора траекторного управления при наведении истребителя в наивыгоднейшую упрежденную точку встречи // Многофункциональные радиоэлектронные комплексы: Научно-методические материалы / Под ред. Г.С. Кондратенкова. - М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1997. - С. 148-161.

6. Дрогалин В.В., Меркулов В.И., Чернов М.В. Сравнительная характеристика квазиоптимального и стандартного угломеров // Многофункциональные радиоэлектронные комплексы: Научно-методические материалы / Под ред. Г.С. Кондратенкова. - М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1997. - С. 19-31.

7. Дрогалин В.В., Татарский Б.Г., Чернов М.В. Алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов при одновременной пеленгации неизвестного изменяющегося во времени числа постановщиков помех: Учебное пособие. - М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1997. - 88 с.

8. Попов Е.В., Чернов М.В. К вопросу об использовании алгоритма Берлекэмпа при реализации метода Прони // Многофункциональные радиоэлектронные комплексы: Научно-методические материалы / Под ред. Г.С. Кондратенкова. - М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1996. - С. 97-99.

9. Татарский Б.Г., Чернов М.В. Структура алгоритмов функционирования интеллектуальной антенной решетки // Многофункциональные радиоэлектронные комплексы: Научно-методические материалы / Под ред. Г.С. Кондратенкова. - М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1996. - С. 145-150.

10. Федосеев В.С., Чернов М.В. Подавление пространственно не совмещенных с целью активных помех в РЛС с антенными решетками // Научно-методические материалы адъюнктов и преподавателей специального факультета / Под ред. В.С. Федосеева. - М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1996. - С. 3-12.

11. Чернов М.В. Адаптивные антенные решетки // Интеллектуальные радиоэлектронные системы управления ЛА и оружием: Научно-методические материалы / Под ред. Г.С. Кондратенкова, Б.Г. Татарского. - М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1994. - С. 107-112.