УДК 621.396.967.7

На правах рукописи

АНТИПОВА Анна Андреевна

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2012

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

Научный руководитель – Шахтарин Борис Ильич,
доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки и технике РФ,
Лауреат Государственной премии СССР.

Официальные оппоненты:

- профессор, доктор технических наук, старший научный сотрудник Колтышев Евгений Евгеньевич (ВУНЦ «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е.Жуковского и Ю.А. Гагарина»);

- кандидат технических наук, начальник отдела Разин Анатолий Анатольевич (НИИП им. В.В.Тихомирова)

Ведущая организация – ОАО «Корпорация « Фазотрон - НИИР»

Защита состоится «12» февраля 2013г. в 14 час. 30 мин.
на заседании диссертационного совета ДС 212.141.02 при Московском государственном университете им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана) по адресу: 105005, Москва, Госпитальный переулок, д.10, МГТУ.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке при М государственном университете им. Н.Э. Баумана

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
2015659
Антипова А.А. Синтез систем
- 660

Автореферат разослан «28» декабря 2012г.

Ученый секретарь диссертационного совета кандидат технических наук, доцент Муратов И.В

2670

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Предметом исследования диссертационной работы являются робототехнические средства пожаротушения, наведения которых летом 2010г. было недостаточно эффективным вследствие ограниченных возможностей оптических средств прицельного сброса огнегасящего состава в условиях плохой видимости.

Тушение пожаров при помощи авиационных средств, проводится путем многократных сбросов воды на очаги пожара. Для этой цели противопожарный вариант пилотируемого или беспилотного самолета, вертолета, аэростата и других аппаратов оборудуется водяными баками и может заправляться водой, как на аэродроме, так и самостоятельно в режиме глиссирования на водной поверхности. Использование авиационных бомб типа АСП-500 обеспечивает стопроцентную доставку массы огнегасящего состава в зону пожара, а взрывной способ диспергирования состава создает дополнительный фактор пожаротушения - воздушную ударную волну. Современные средства пожаротушения на основе использования технологии азотного пожаротушения имеют высокую эффективность по накрытию зон горения, разрушения вертикального теплового потока - «тепловой трубы», засасывающей воздух в зону горения.

Значительные проблемы возникают при пожаротушении лесных массивов. В этом случае очаг пожара характеризуется большой пространственной протяженностью и сильной задымленностью, что затрудняет прицельное использование оптических средств пожаротушения.

В этом случае использование РЛС может помочь в решении данной проблемы. Так как дым не препятствует распространению радиолокационного сигнала, а эффективная площадь отражения (ЭПО) горящих деревьев отличается от ЭПО зеленого лесного массива, то на индикаторе РЛС будет хорошо видна граница очага пожара, по которой можно выполнить прицельный сброс воды и других средств. С течением времени ЭПР горящих объектов может упасть до минимальных значений, однако, использование радиолокационных ориентиров в окрестности зоны возгорания позволяет прицельно применять средства пожаротушения.

Анализ разрешающей способности различных видов систем обзора и наблюдения показывает, что для эффективного наведения средств пожаротушения необходимо создание визирной системы на основе оптической системы и РЛС с синтезированной апертурой (РСА). Поэтому объектом исследования является средство пожаротушения с радиолокационной системой, работающей в режиме синтезирования апертуры.

Однако РСА обеспечивают обнаружение объектов не по курсу носителя, а в переднебоковом секторе. Поэтому наведение средств пожаротушения требует наведения специальных и сложных приемов. В этом случае обнаружение наземных объектов производится в переднебоковом секторе с последующим разворотом носителя или управляемого средства пожаротушения (УСПТ) и наведением средств пожаротушения при прицеливании по расчетной точке или

МГТУ
им. Н Э. Баумана
Библиотека

вынесенному ориентиру, т.е. без наблюдения объекта возгорания, практически «вслепую».

Цель диссертационной работы заключается в повышении эффективности применения средств пожаротушения в любых метеорологических условиях на основе РЛС в режиме синтезированнния апертуры антенны.

Границы исследования. В диссертационной работе рассматриваются способы применения радиолокационных систем и алгоритмы обработки принимаемых сигналов.

Для достижения указанной цели в работе решается актуальная **научная задача,** заключающаяся в разработке траектории и метода наведения УСПТ на очаг возгорания и алгоритмов измерения координат точки применения УСПТ (сброса огнегасящего состава) путем сопровождения малоразмерного наземного объекта и ориентира в РСА, позволяющие обеспечивать высокую точность в условиях плохой визуальной видимости.

Для решения поставленной научной задачи в диссертационной работе решены следующие частные задачи:

1.Проведен анализ природной и климатической обстановки в зоне пожара и рассмотрены особенности применения авиационных средств пожаротушения;

2.Обоснованы пути повышения эффективности радиоэлектронного комплекса на основе РЛС с синтезированной апертурой.

3.Обоснованы требования, предъявляемые к системам и методам наведения УСПТ в точку сброса огнегасящего состава;

4.Предложены траектории носителя УСПТ с СА в горизонтальной плоскости в зависимости от требований по разрешающей способности;

5.Получено уравнения промаха при движении по траектории, обеспечивающей требуемую линейную разрешающую способность синтезированного РЛИ;

6.Синтезирован алгоритм траекторного управления наблюдением для обеспечения заданной разрешающей способности в УСПТ с СА;

7.Синтезированы алгоритмы автоматического сопровождения малоразмерного наземного объекта с использованием дополнительной информации от ориентиров;

8.Для получения количественных характеристик показателей эффективности синтезированной системы разработана цифровая имитационная модель наведения УСПТ и системы автоматического сопровождения малоразмерного наземного объекта;

9.Сформированы предложения по техническим характеристикам и структуре УСПТ с РСА.

Методы исследования. Задачи, представляющие научный интерес решены на базе статистической теории оптимального управления и приема сигналов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в:

— обосновании методики применения летательного аппарата со средствами мониторинга и пожаротушения на основе радиолокационных систем;

— оптимизации алгоритма управления боковой перегрузкой УСПТ для движения по траектории, обеспечивающей требуемое линейное азимутальное разрешение.

— оценке ошибок наведения (промаха) УСПТ при движении по траектории с постоянной боковой перегрузкой.

— оптимизации алгоритмов сопровождения координат точки прицеливания с использованием дополнительной информации от ориентиров.

— разработке математической модели наведения УСПТ на очаг возгорания и системы автоматического сопровождения малоразмерного наземного объекта

Практическая ценность работы:

1.Обоснована целесообразность применения РЛС с синтезированной апертурой, предназначенной для обеспечения высокоэффективного мониторинга и пожаротушения в условиях плохой визуальной видимости и на больших дальностях.

2. Разработаны требования к техническим характеристикам и алгоритмы функционирования высокоточной системы наведения УСПТ.

3. Разработана модель движения УСПТ на очаг возгорания и программы обработки принимаемого сигнала.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Методика применения летательного аппарата для мониторинга местности и применения средств пожаротушения на основе РЛС с синтезированной апертурой.

2. Алгоритмы траекторного управления средством пожаротушения, оснащенного РЛС с синтезированной апертурой, в горизонтальной плоскости.

2. Точностные характеристики (промах) управляемого средства пожаротушения при движении по траектории, обеспечивающей требуемую линейную разрешающую способность.

3. Алгоритм автоматического сопровождения точки применения огнегасящего состав с использованием дополнительной информации от ориентиров.

4. Технические требования и выбор области нахождения ориентира для применения УСПТ на основе РЛС с синтезированной апертурой.

Достоверность результатов, выводов и рекомендаций подтверждается:

- корректностью использования известного математического аппарата;

- достаточной обоснованностью принятых допущений и предположений, а также отсутствием противоречий между новыми

теоретическими положениями, разработанными в диссертации, и известными частными результатами других исследований;

- результатами цифро-натурного моделирования системы высокоточного наведения УСПТ с синтезированной апертурой.

Внедрение результатов исследований

Реализация и внедрение результатов данной работы проводилась в рамках заданных НИЭР и ОКР при проектировании новых и модернизации существующих образцов техники. Основные положения работы используются при обосновании технических требований к РЛС с СА. Материалы диссертации реализованы также при выполнении НИР и ОКР промышленности и в учебном процессе МГТУ им. Н.Э.Баумана на кафедре СМ5. Результаты исследований, проведенных в рамках диссертационной работы, были также использованы при формировании требований к модернизируемым и перспективным авиационным радиолокационным системам.

Апробация результатов работы

Результаты диссертационной работы докладывались автором на научно-технических конференциях в период 2008-2012 гг., в заказывающих и научно-исследовательских организациях МЧС

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 2 отчетах по НИР, в 3 статьях, одно учебное пособие и докладывались на 3 научно-технических конференциях, а также на заседаниях кафедры СМ5 МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Объем работы составляет 177 страниц, включая список литературы из 42 наименований на 4 страницах, 88 рисунков, схем и графиков, а также титульного листа.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и решаемые задачи, определены предмет, объект и рамки исследований. Приведены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна работы и её практическая значимость, реализация и апробация работы, изложено краткое содержание разделов.

В первой главе проведен анализ особенностей наведения авиационных средств (самолетов, вертолетов, аэростатов и т.п.) при тушении пожаров, обоснованы требования к перспективным средствам и рассмотрены варианты их создания.

Важнейшую роль в своевременном выявлении (предупреждении) и ликвидации пожаров, экологических и техногенных катастроф играют летательные аппараты, оснащенные системами наблюдения и средствами пожаротушения. Тушение пожаров при помощи летательных аппаратов производится путем многократных сбросов воды на очаги пожара. Для этой цели противопожарный вариант управляемого средства пожаротушения (УСПТ), к которым относятся пилотируемые и беспилотные самолеты,

вертолеты, аэростаты и другие аппараты, оборудуются водяными баками с возможностью заправляться водой, как на аэродроме, так и самостоятельно в режиме глиссирования на водной поверхности. Максимально эффективно задача пожаротушения решается при наличии водоема недалеко от места пожара. В этом случае пожаротушение ведется по кольцевой схеме: самолет производит забор воды, направляется к очагу пожара, делает сброс и вновь возвращается на водоем для нового забора воды.

Анализ угловой разрешающей способности различных видов визирных систем (табл.1) показывает, что для эффективного наведения средств пожаротушения необходимо создание прицельной системы на основе комплексирования РЛС с синтезированной апертурой (РСА)

Таблица 1

Системы	панорамные РЛС	РЛС бокового обзора	глаз человека	РСА	оптические системы
Угловое разрешение	$1^0...3^0$	$0{,}2^0...0{,}3^0$	$5\cdot10^{-3}$	$10^{-3}...10^{-5}$	$10^{-4}...10^{-6}$

Бортовая РЛС предназначена для мониторинга земной поверхности и определения района наведения средств, ведения доразведки в заданном районе, обнаружения точки прицеливания и наведения на неё средств пожаротушения в сложных метеоусловиях и на больших дальностях.

Хорошее качество изображения местности может быть получено при высокой разрешающей способности РЛС по дальности и азимуту. Эти требования выполняются, если величина площади элемента разрешения δS, реально разрешаемой РЛС, в 5...10 и более раз меньше площади объекта наблюдения: остров, поле, лес, аэродром, река и другие крупные площадные объекты. Радиолокационное изображение должно быть сформировано с разрешением, обеспечивающем раздельное наблюдение объектов. Кроме того, от разрешающей способности РЛС зависит контраст точечного объекта на фоне местности. Данные требования удовлетворяются при разрешающей способности РЛС, равной 5...10 м по азимуту и дальности.

Дальность действия и сектор обзора РСА должны обеспечивать обнаружение района наведения средств пожаротушения и крупных ориентиров (для навигации). Учитывая сравнительно низкие точности навигационных систем и быстрое старение разведывательных данных для обнаружения района пожара необходимо иметь изображение местности размером не менее 30х30 км^2 в секторе ±60° относительно вектора скорости самолета на дальности до 300 км. На этапе ведения доразведки и обнаружения точки прицеливания дальность действия РЛС сокращается до величины безопасности нахождения носителя в зоне огня или радиоактивного заражения, т.е. до 10...30 км. Для обеспечения целеуказания в районе пожара необходимо иметь радиолокационное изображение местности, обеспечивающее идентификацию типовых наземных объектов. В этом случае размер зоны обзора должен быть соизмерим с размером района водозабора, аэродрома посадки, района наведения средств пожаротушения и т.п. Этим требованиям удовлетворяет сектор (3...5)×(3...5) км^2.

Таким образом, современные бортовые РЛС с синтезированной апертурой обеспечивают селекцию целей на фоне земной поверхности в любое время суток и при любой погоде без захода носителя в опасную зону. Обнаружение малоразмерных целей на больших дальностях независимо от метеоусловий успешно решается в настоящее время только с помощью РСА. Однако РСА обеспечивают обнаружение объектов не по курсу носителя, а в переднебоковом секторе. В связи с этим необходимо разработать требуемую траекторию движения УСПТ и оптимизировать закон управления летательным аппаратом.

Вторая глава диссертации посвящена вопросам, связанным с оптимизацией траектории движения летательного аппарата для обеспечения синтезирования с постоянным линейным азимутальным разрешением δx=const:

$$\delta x = \frac{\lambda Д}{2X_C} = \frac{\lambda Д}{2V_C T_C \sin\beta}, \qquad (1)$$

где λ-длина волны РЛС; R-дальность картографирования; V_C-скорость движения робототехнического средства; T_C-время синтезирования; $X_C=V_C T_C$– интервал синтезирования; β-угол визирования.

Для сохранения постоянства δx и сближения с точкой наведения УСПТ (Рис.1) движение носителя описывается системой дифференциальных ускорений, с начальными условиями в точке А:

$$\begin{aligned} \dot{Д}(t) &= -V\cos\beta(t), & Д(0) &= Д_0; \\ \dot{\theta}(t) &= \frac{\theta_{PCA}(t)}{T} = \frac{V\sin\beta(t)}{Д(t)}, & \theta(0) &= \theta_0; \\ \dot{\beta}(t) &= -\frac{\theta_{PCA}(t)}{T} = -\frac{V\sin\beta(t)}{Д(t)}, & \beta(0) &= \beta_0. \end{aligned} \qquad (2)$$

Дальность, угол пеленга и курсовой угол, в произвольный момент времени t (точка В), обозначены как Д(t), β(t) и θ(t) соответственно, $\theta_{PCA}=\lambda/X_C$ – ширина луча синтезированной антенны.

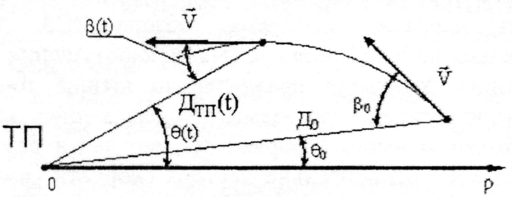


Рисунок 1. А

Решение системы (2) описывает уравнение окружности, дуга которой проходит через центр картографирования (точку применения - ТП). На рис.2 изображены траектории движения УСПТ с целью получения разрешающей способности 10,20 и 30м на дальности $Д_0$=15км и угле визирования β_0=60°. Анализ кривых свидетельствует о том, что радиус кривизны траектории движения УСПТ находится в обратной зависимости от величины требуемого разрешения.

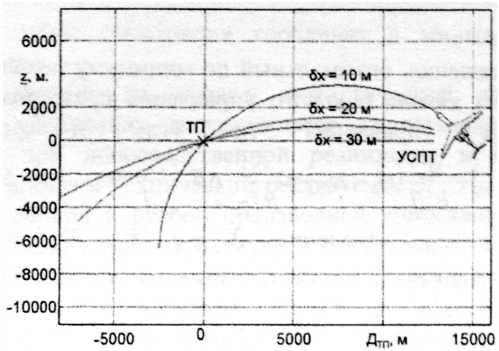


Рисунок 2.

Движение по окружности характеризуется постоянной перегрузкой. Величина боковой перегрузки определяется радиусом разворота r и с учетом зависимости радиуса от разрешающей способности, получим выражение для требуемой перегрузки УСПТ и радиуса виража r:

$$n_{TP} = J_{БТР} / g = \frac{V_C}{T_C}(\alpha_0 - \arcsin(\frac{\lambda R_0}{2V_C T_C \delta x}) + \frac{\lambda}{\delta x}); \qquad r = V^2 / n_{TP}, \qquad (3)$$

где g=9.8м/с^2 – ускорение свободного падения.

Точность наведения УСПТ характеризуется кратчайшим расстоянием между точкой ТП и траекторией его полета. Считая движение УСПТ с постоянной перегрузкой, в работе получена величина промаха: $h = \frac{Д^2}{V_C}(\omega - \omega_{TP})$, где ω и ω_{TP} – истинная и требуемая величина угловой скорости линии визирования.

Таким образом, оптимальная траектория наведения УСПТ является окружность, радиус которой обратно пропорционален линейной разрешающей способности, а величина перегрузки не превышает 1,5g.

В третьей главе на основе статистической теории оптимального управления синтезируется алгоритм траекторного управления УСПТ и проводятся исследования системы обработки отраженного сигнала, которая обеспечивает высокоточное измерение азимута и дальности и бессрывное сопровождение наземных объектов.

В качестве критерия оптимальности выбран один из наиболее простых локальных функционалов качества, который имеет вид:

$$I = M\left\{\left[\mathbf{X}_{TP}(t) - \mathbf{X}_y(t)\right]^T \mathbf{Q}\left[\mathbf{x}_{TP}(t) - \mathbf{X}_y(t)\right] + \int_0^t \mathbf{u}^T(t)\mathbf{K}\mathbf{u}(t)\mathbf{dt}\right\} \qquad (4)$$

где **Q** - неотрицательно определенная матрица штрафов за текущую точность $[\mathbf{x}_{TP}(t) - \mathbf{x}_y(t)]$; **K** - положительно определенная матрица штрафов за величину сигналов управления **u** =**BJ**; **J** – вектор перегрузок, **B** – матрица эффективности

управления.

Сигнал управления, оптимальный по минимуму локального функционала качества (4), для канала бокового управления представляет собой весовую сумму ошибок управления по углу и угловой скорости: $j_{тр} = \frac{q_\beta}{k_j V_{сбл}}(\beta_у - \beta_{тр}) + \frac{q_\omega}{k_j Д}(\omega_у - \omega_{тр}) = \frac{X_\beta}{R V_{сбл}}\Delta\beta + \frac{X_\omega}{Д}\Delta\omega$, где $\beta_{тр}$ и $\omega_{тр}$ зависят от требований к системе наведения. $X_\beta = q_\beta / k_j$, $X_\omega = q_\omega / k_j$ - отношения коэффициентов штрафов за точность слежения по углу и угловой скорости к коэффициенту штрафа за сигнал управления (соотношения штрафов на точность и экономичность). Вес ошибок по углу и угловой скорости, определяющий перераспределение приоритетов в законе управления, зависит от соотношения штрафов $X_\beta = q_\beta / k_j$ и $X_\omega = q_\omega / k_j$. Отношения X_β и X_ω должны быть такими, чтобы при максимально возможных значениях ошибок управления $\Delta\beta$ и $\Delta\omega$, для минимальных значений дальности Д и скорости сближения $V_{сб}$ требуемые поперечные перегрузки не превышали допустимые значения.

Для решения задачи измерения времени задержки и доплеровской частоты (азимута) сигналов точечных отражателей была проведен синтез оптимального и разработка двумерного дискриминатора дальности и доплеровской частоты. Модель сигнала, отраженного от точечного объекта, представляет собой последовательность радиоимпульсов с амплитудой, распределенной по закону Рэлея и равномерно распределенной начальной фазой. Параметры радиоимпульса и частота повторения импульсов обеспечивает однозначную дальность и требуемую разрешающую способность по дальности.

Структурная схема обработки принимаемого сигнала (рис.3) состоит из антенно-фидерной системы для реализации приемо-передающей антенны с суммарно-разностной ДНА, многоканального приемника с АЦП и процессора обработки сигналов (ПОС), а также из автономных датчиков параметров полета с системой пересчета координат и блока управления антенной.



Рисунок 3.

В многомерном дискриминаторе ПОС производится синтезирование апертуры в каждом канале дальности и вычисление отклонений истинных координат от

оценочных, а затем фильтрация координат в многомерном комплексном следящем фильтре

Синтезированный на основе статистической теории оптимального управления и оценивания дискриминатор представляет собой нелинейное устройство, и при непосредственной реализации в бортовой аппаратуре возникает ряд проблем технической реализуемости. Это вызвано сложностью формирования первой и второй производной корреляционного интеграла по параметру. Принцип работы практически реализуемого частотно - временного дискриминатора заключается в вычислении невязок но дальности ΔД и частоте Δf исходя из положения на РЛИ двумерного строба дальности и доплеровской частоты (рис.4) по формулам:

$$\Delta_{Д} = N_{Д}\delta_{Д}/2 = \frac{\sum\limits_{ij} Y_{ij}\cdot i}{\sum\limits_{ij} Y_{ij}} \cdot \frac{\delta_{Д}}{2};\ \Delta_{f} = N_{f}\delta_{f}/2 = \frac{\sum\limits_{ij} Y_{ij}\cdot j}{\sum\limits_{ij} Y_{ij}} \cdot \frac{\delta_{f}}{2};\ i,j = \overline{\lfloor M_{Д}, M_{f} \rfloor} \qquad (5)$$

где Y_{ij} значения амплитуды принимаемого колебания в соответствующих стробах дальности и фильтрах доплеровских частот полученного РЛИ, $N_{Д}$- относительное рассогласование по дальности, N_{f}- относительная расстройка по частоте, $\delta_{Д}$, δ_{f} - ширина строба дальности и фильтра доплеровских частот, соответственно. $M_{Д}$ и M_{f} – размер «окна обнаружения» по задержке и частоте.

На рисунках 4, 5 изображены дискриминационная и флуктуационная характеристики канала доплеровской частоты разработанного дискриминатора при весовой обработке окном Хемминга для различных соотношений сигнал/шум. На основе их анализа были получены коэффициенты наклона $K_{Д}$, K_{f} линейной части дискриминационной характеристики и СКО шумов измерений соответствующих параметров

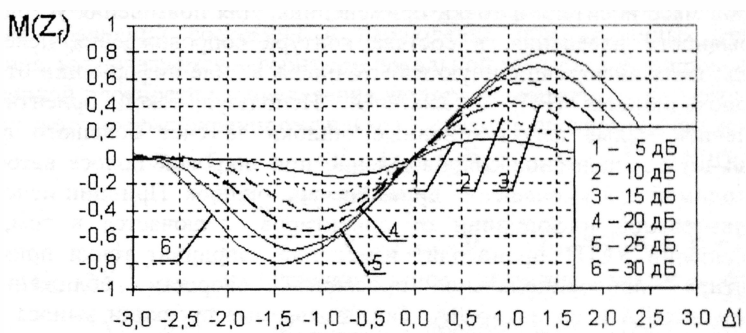


Рисунок 4.

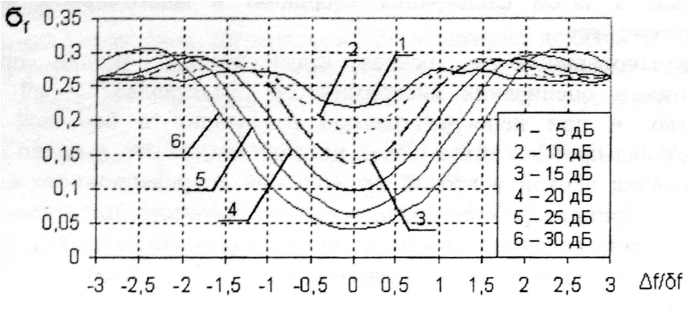


Рисунок 5.

Таким образом, эквивалентную линейную статистическую модель нелинейного дискриминатора можно представить в виде:

$$\begin{aligned} Z_Д &= \frac{\delta_д}{2}\cdot\Delta N_д + \sigma_Д K_Д^{-1}\frac{\delta_д}{2}n_0 = \Delta Д + \sigma_Д K_Д^{-1}\frac{\delta_Д}{2}n_0 \\ Z_f &= \frac{\delta_f}{2}\cdot\Delta N_f + \sigma_f K_f^{-1}\frac{\delta_f}{2}n_0 = \Delta f + \sigma_f K_f^{-1}\frac{\delta_f}{2}n_0 \end{aligned}, \qquad (6)$$

где $K_д$, K_f - крутизны дискриминаторов; $\sigma_д$, σ_f - нормированные СКО шумов измерений, n_0 - белый гауссовский шум с единичной спектральной плотностью и нулевым математическим ожиданием.

Для осуществления эффективного наведения УСПТ необходимо с требуемой точностью оценивать параметры относительного перемещения центров масс носителя и точки примененния. Для повышения устойчивости и бессрывности наведения, в составе контура сопровождения целесообразно использовать информационную избыточность в виде информации от точечных радиолокационных (РЛ) отражателей. Используя такой ориентир, можно обеспечить малые флуктуационные ошибки за счет большого отношения сигнал–шум и надежное сопровождение при широкой полосе автоселектора, необходимой для уменьшения динамических ошибок. Принцип использования дополнительной информации от ориентиров заключается в том, что при перемещении УСПТ происходит изменение координат точки применения и ориентира пропорционально проекциям скорости сближения точка применения-ЛА и ориентир-ЛА. Так называемые проекции выноса ориентира относительно точки применения на оси декартовой системы координат, являются функциями, которые пропорциональны разности координат ориентира и точки применения:

$x_{op}(t) = x_T(t) + \Delta_x$; $y_{op}(t) = y_T(t) + \Delta_y$; $z_{op}(t) = z_T(t) + \Delta_z$.

Координаты точки применения считались подвижными со скоростями V_x, V_y, V_z. Исходя из этого, предложена модель состояния (при использовании информации от одного ориентира), описываемая системой

разностных уравнений для одной координаты (для других координат идентичные):

$$x_T(k) = x_T(k-1) + T \cdot V_x(k-1)\,, \qquad x_T(0) = x_{T0}; \tag{7}$$

$$V_x(k) = V_x(k-1) + \xi_{Vx}(k)\,, \qquad V_x(0) = V_{x0}; \tag{8}$$

$$\Delta x(k) = \Delta x(k-1), \qquad \Delta x(0) = \Delta_{x0}; \tag{9}$$

При условии наблюдений дальностей до точки применения и ориентира $Д_T$ и $Д_{ор}$, углов визирования ψ_T, γ_T, $\psi_{ор}$, $\gamma_{ор}$ и доплеровских частот $f_{дт}$, $f_{дор}$ на фоне белых шумов $n_i(k)$:

$$Z_1(k) = Д_T(k) + n_1(k) = \sqrt{x_T^2 + y_T^2 + z_T^2} + n_1(k);$$

$$Z_2(k) = \psi_T(k) + n_2(k) = arctg(z_T / x_T) = n_2(k);$$

$$Z_3(k) = \gamma_T(k) + n(k) = arctg(y_T / \sqrt{x_T^2 + z_T^2}) + n_4(k);$$

$$Z_4(k) = f_{Дц}(k) + n_4(k) = \frac{2(V_x x_T + V_y y_T + V_z z_T)}{\lambda \cdot \sqrt{x_T^2 + y_T^2 + z_T^2}} + n_4(k):$$

$$Z_5(k) = Д_{OP}(k) + n_5(k) = \sqrt{(x_T + \Delta x)^2 + (y_T + \Delta y)^2 + (z_T + \Delta z)} + n_5(k);$$

$$Z_6(k) = \psi_{OP}(k) + n_6(k) = arctg\left[(z_T + \Delta z)/(x_T + \Delta x) + n_6(k)\right];$$

$$Z_7(k) = \gamma_{op} + n_7(k) = \text{arctg}\left(\frac{y_T + \Delta_y}{\sqrt{(x_T + \Delta_x)^2 + (z_T + \Delta_z)^2}}\right) + n_7(k);$$

$$Z_8(k) = f_{Дор}(k) + n_8(k) = \frac{2\left[V_x(x_T + \Delta_x) - V_y(y_T + \Delta_y) + V_z(z_T + \Delta_z)\right]}{\lambda \cdot \sqrt{(x_T + \Delta_x)^2 + (y_T + \Delta_y)^2 + (z_T + \Delta_z)^2}} + n_8(k),$$

с учетом измеренных значений параметров собственного движения, необходимо оценить вектор координат $\mathbf{X}^T = \left[x_T \;\; V_x \;\; \Delta_x \;\; y_T \;\; V_y \;\; \Delta_y \;\; z_T \;\; V_z \;\; \Delta_z\right]$.

Для построения комплексного многомерного следящего фильтра (КМСФ) на основе уравнений состояния и наблюдения при указанных условиях наблюдения, воспользуемся алгоритмом локальной гауссовской аппроксимации апостериорной плотности распределения вектора оцениваемых параметров $\mathbf{X}$, а именно алгоритмом расширенного фильтра Калмана в дискретном времени:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \mathbf{F}_{k,k-1} \cdot \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \mathbf{K}_{F_k} \cdot \left(\mathbf{Z}_k - \mathbf{S}_k\left\{\hat{\mathbf{X}}_k\right\}\right), \qquad \hat{\mathbf{X}}_0 = \mathbf{X}(0);$$

$$\mathbf{K}_{F_k} = \mathbf{P}_k \cdot \mathbf{H}_k^T \cdot \mathbf{\Psi}_k^{-1};$$

$$\mathbf{P}_k^{-1} = \left(\mathbf{F}_{k,k-1} \cdot \mathbf{P}_{k-1} \cdot \mathbf{F}_{k,k-1}^T + \mathbf{D}_k\right)^{-1} + \mathbf{H}_k^T \cdot \mathbf{\Psi}_k^{-1} \cdot \mathbf{H}_k\,; \quad \mathbf{P}_0 = \mathbf{P}(0)$$

где $\mathbf{X}_k = \mathbf{F}_{k,k-1} \cdot \mathbf{X}_{k-1}$ – экстраполированное значение вектора фазовых координат. Матрица $\mathbf{H}_k = \left.\frac{\partial \mathbf{S}(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}^T}\right|_{\mathbf{X}=\hat{\mathbf{X}}_k}$ представляет собой крутизны дискриминационных характеристик в точке оценки координат на k–том шаге.

Применение этого метода в данном случае оправдано тем, что измерение параметров осуществляется после обнаружения и предварительного измерение координат цели в БРЛС, при достаточно высоком выходном отношении сигнал/помеха тракта обработки радиосигнала, когда ошибки целеуказания не превышают диапазона устойчивых измерений многомерного дискриминатора.

Полученные выражения для оценки одной координаты (для других идентичные)

$$x_T(k) = Z_1(k)\cdot\cos Z_2(k)\cdot\cos Z_3(k); \qquad (10)$$

$$\Delta_x(k) = Z_4(k)\cdot\cos Z_5(k)\cdot\cos Z_6(k) - Z_1(k)\cdot\cos Z_2(k)\cdot\cos Z_3(k);$$

определяют однозначное решение уравнений измерений относительно нулевых производных фазовых координат, что говорит о наблюдаемости системы.

Исследование особенностей функционирования алгоритмов сопровождения точки применения УСПТ с использованием дополнительной информации от ориентиров проводились путем моделирования алгоритмов сопровождения при наведении УСПТ в заданную точку. Для обеспечения постоянства траектории от эксперимента к эксперименту и исключения зависимости СКО ошибок фильтрации от разброса траекторий, при вычисления параметра рассогласования использовались истинные значения фазовых координат.

На рисунке 9 представлены зависимости точностных характеристик алгоритма сопровождения точки встречи и 1-го ориентира от дальности при различной ориентации системы координат. В качестве точностного показателя использовалась сумма взвешенных текущих дисперсий ошибок фильтрации координат объекта и их производных, при соотношении сигнал-фон в канале объекта 15 дБ и 30 дБ в канале ориентира:

$$D_\Sigma = M\left\{\left[\mathbf{X}(k) - \hat{X}(k)\right]^T \mathbf{Q}\left[\mathbf{X}(k) - \hat{\mathbf{X}}(k)\right]\right\}, \qquad (11)$$

Коэффициенты q_{ii} диагональной матрицы штрафов **Q**, выбирались равными единице для координат объекта и 0,1 – для скорости.

Исследование влияния локальной гауссовской аппроксимации на точность оценивания параметров показало, что наименьшие ошибки имеют место при ориентации оси Ox на точку применения (ψ=0). Проведенные исследования показали наличие значительной корреляционной связи составляющих фазовых координат, что делает нецелесообразной декомпозицию вектора состояния по координатным осям. На рисунке 10 представлены зависимости СКО ошибок алгоритма сопровождения от дальности при различных методах применения УСПТ (кривая 1 – использование синтезированного алгоритма применения, кривая 2 -использование прямого метода применения). Из анализа графиков следует, что выбор алгоритма наведения, существенно влияет на точностные характеристики алгоритма сопровождения. Так при наведении по закону,

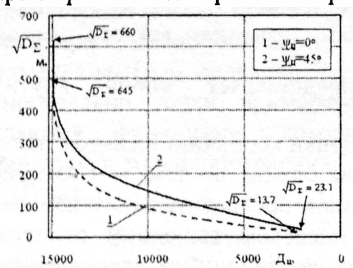


Рисунок 9.

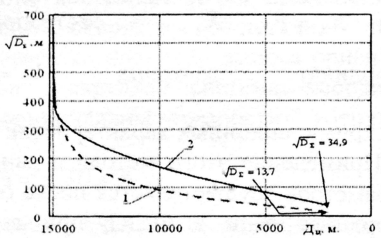


Рисунок 10.

обеспечивающему постоянное линейное разрешение, суммарные взвешенные ошибки меньше в 2 раза по сравнению с прямым наведением, а в плоскости синтезирования имеют практически постоянное значение, тогда как ошибки при прямом методе применения уменьшаются пропорционально дальности до объекта пожаротушения.

На рисунке 11 представлены результаты исследований точностных характеристик алгоритмов при сопровождении от нуля до 5 ориентиров.

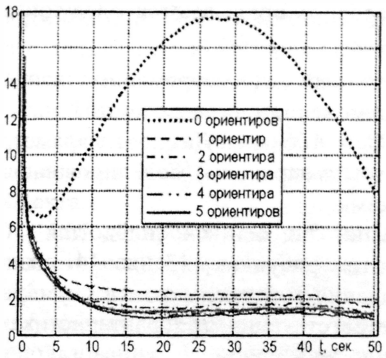


Рис. 11.

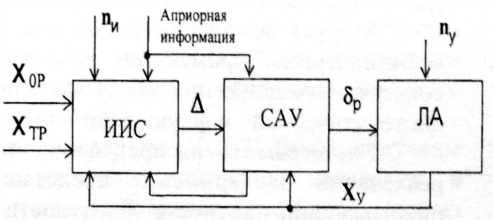


Рис.12

Анализ зависимостей, изображенных на рисунке 11 показывает, что существенное уменьшение СКО ошибок фильтрации координат наблюдается при включении в контур сопровождения одного ориентира. В дальнейшем, при сопровождении других ориентиров, происходит лишь незначительное уменьшение СКО ошибок фильтрации фазовых координат.

Таким образом, для обеспечения высокоточного бессрывного сопровождения координат точки применения УСПТ рекомендуется применять в контуре сопровождения информации от одного мощного ориентира и при этом можно ориентировать ось Ох системы координат УСПТ на точку применения.

В четвертой главе разработана математическая модель системы применения УСПТ и проведено имитационное моделирование для решения задач, связанных со сложным многофакторным анализом и определением показателей эффективности разработанных алгоритмов, а также для обеспечения наглядности получаемых результатов. Обобщенная структурная схема математической модели системы применения УСПТ изображена на рис.12.

В состав контура входят информационно-измерительная система (ИИС), система автоматического управления самолетом (САУ) и сам летательный аппарат (ЛА) или УСПТ. Координаты точки применения УСПТ характеризуются вектором фазовых координат $\mathbf{X}_{ТР}$, а состояние ЛА - вектором $\mathbf{X}_{У}$.. На основе сравнения $\mathbf{X}_{т}$ и $\mathbf{X}_{у}$ формируется параметр рассогласования Δ, преобразуемый управляющей системой в вектор управляющих воздействий

отклонения рулей $\delta_р$. На входе ИИС присутствуют координаты ориентира $X_{ОР}$ и вектор шумов измерений $n_и$, а летательный аппарат находится в турбулентной атмосфере, характеризуемой случайным вектором $n_у$.

Траектория, по которой осуществляется наведение УСПТ в горизонтальной плоскости на выбранную точку, представляет собой дугу окружности, Параметры рассогласования для управления траекторией применения вычислялись на основе оцененных координат точки применения и ориентиров, т.е. контур применения был замкнут. УСПТ описывался инерционным звеном, характеристики которого описываются следующими выражениями: $n(k) = n_{тр}(k) - \alpha(n(k) - n_{тр}(k))$, $\alpha = 1/3c$, $|n| \le 3$,

где n - боковое ускорения носителя, k - дискретный момент времени.

Модуль вектора скорости объекта применения считался постоянным на всем интервале применения и составлял V = 100 м/с. Датчики параметров собственного движения УСПТ (акселерометры и гирскопы) моделировались с систематической и флуктуационной ошибками.

Гистограммы распределения попаданий по оси 0x и 0z для 1000 реализаций эксперимента представлены на рисунках 13 и 14. Закон, описывающий плотность вероятности попадания аппроксимирован двумерной гауссовской плотностью вероятности с соответствующими характеристиками. Круговое вероятностное отклонение составило 5м.

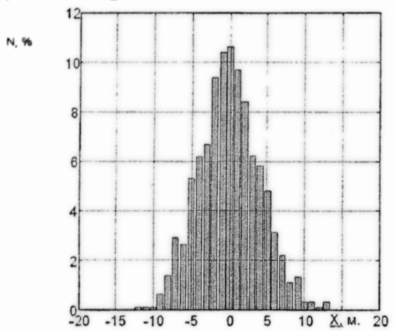


Рисунок 13

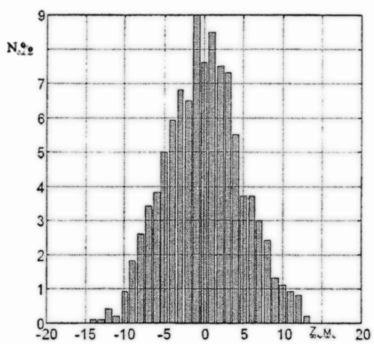


Рисунок 14

3.ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате выполнения диссертационной работы осуществлен комплексный анализ средств пожаротушения, показаны направления повышения их эффективности на основе РЛС с синтезированной апертурой, разработаны алгоритмы обработки сигналов в РЛС и оптимизированы методы применения УСПТ. Основные результаты исследований сводятся к следующему:

1.Одним из основных требований к прицельно-навигационным системам комплекса пожаротушения является всепогодность и круглосуточность. Решение этой задачи, прежде всего, связано с обеспечением обнаружения слабоконрастных протяженных объектов, а также малоразмерных объектов в

сложных метеоусловиях и ночью с помощью РЛС с синтезированной апертурой.

2. Для уменьшения вероятности срыва и перенацеливания на более сильные отражения в составе контура применения радиолокационной системы управляемого средства доставки целесообразно использовать информационную избыточность в виде информации от точечных радиолокационных отражателей - ориентиров.

3. На основе анализа траекторий носителя в горизонтальной плоскости для формирования требуемого линейного азимутального разрешения установлено, что требуемая траектория имеет вид окружности с радиусом кривизны, зависящим от параметров линейного разрешения.

4.На основе математического аппарата статистической теории оптимального управления и оценивания был осуществлен синтез системы управления УСПТ и автоматического сопровождения координат наземного объекта.

5.Моделированием работы контура наведения УСПТ были получены статистические характеристики оцениваемых координат точки наведения в зависимости от условий пуска и количества выбранных ориентиров. Анализ полученных характеристик позволил сделать вывод о целесообразности использования 1 ориентира и закона наведения с постоянной угловой скоростью линии визирования. При этом вероятность бессрывного сопровождения возрастает с 75% до 97%. Анализ реального линейного разрешения в горизонтальной плоскости показало, что на всей траектории применения оно ухудшается не более, чем на 10%.

6.Предложен вариант реализации разработанных алгоритмов в РЛС с СА, который обеспечивает применение УСПТ с круговым вероятностным отклонением около 5м. Вычислительные затраты, необходимые для реализации разработанных алгоритмов, составляют порядка 10^5 операций/с и могут быть обеспечены с помощью современных БЦВМ.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНО ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.

1.Антипова А.А., Дорофеев В.О. Требования к РЛС с синтезированной апертурой при мониторинге и тушении пожаров. //Вопросы радиоэлектроники, Серия РЛТ. 2012. №2. С.3-12

2. Антипова А.А., Чезганов Н.Ф., Шахтарин Б.И. Дальномерно-доплеровский метод измерения параметров полета и положения воздушного судна при снижении по глиссаде.// Наука и образование: Электронное научно-техническое издание, – 2012. №9. С.70–84.

3. Антипова А.А., Шуклин А.И. Обнаружение сигнала с неизвестной частотой. //Труды ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина/ Под ред. О.В. Васильева. М., 2011.С.17-24.

4. Отчет по НИР Синхронизация в радиосвязи и навигации. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, Руководитель темы Борзов А.Б. Исп. Антипова А.А. и др., ГР№01200710182, инв.№ 3672 – М., 2007г. – 246 с.

5. Исследование алгоритмов синхронизации в системах связи. Раздел 2.4: Научно-технический отчет по НИР Фундаментальные проблемы создания АУИС. Шифр «КЕДР-5» / НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Рук. Темы Борзов А.Б. Исп. Антипова А.А. и др.: ГР№: 012-009-648-25. инв.№ 3679 – М., 2010г. – 246 с.

6. Синтезаторы частот: Учебное пособие / Б.И. Шахтарин, [и др.] – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 128 с.

Антипова А.А.