

АВИАЦИОННЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ

© 2024 г. В. И. Меркулов

АО «Концерн «Вега»,
Кутузовский просп., 34, Москва, 121170 Российская Федерация
E-mail: mvipost41@gmail.com

Поступила в редакцию 18.06.2024 г.

После доработки 18.06.2024 г.

Принята к публикации 23.06.2024 г.

На основе анализа особенностей военно-технического противоборства сформулированы требования к способам оптимизации законов управления и их информационного обеспечения в приложении к радиоэлектронным системам перехвата летательных аппаратов. По результатам анализа особенностей функционирования радиоэлектронных систем управления этого типа даны рекомендации по выбору математического аппарата синтеза законов траекторного управления, оптимальных по минимуму квадратично-биквадратного функционала качества с использованием для информационного обеспечения варианта адаптивной аналого-дискретной фильтрации.

Ключевые слова: авиационные радиоэлектронные системы управления, законы траекторного управления, информационное обеспечение, квадратично-биквадратный функционал качества, адаптивная аналого-дискретная фильтрация

DOI: 10.31857/S0033849424080053, **EDN:** HOPSKQ

ВВЕДЕНИЕ

Радиоэлектронные системы управления (РЭСУ) представляют собой совокупность функционально связанных систем (подсистем), обеспечивающих дистанционное управление различными объектами и информационными потоками между ними на основе информации, извлекаемой из радиосигналов [1].

Анализ особенностей военно-технического противоборства (ВТП), выполненный по имеющимся публикациям [1–12], позволяет выделить ряд его направлений, усиливающих значимость и востребованность авиационных радиоэлектронных систем управления. К этим направлениям прежде всего относятся [2]:

- увеличение пространственного размаха ВТП с усилением значимости дистанционного управления как летательными аппаратами (ЛА), так и информационными потоками;
- возрастание скорости летательных аппаратов;
- преобладание групповых действий, как средств нападения, так и защиты;
- возрастание роли беспилотных летательных аппаратов (БПЛА);
- новые способы ведения противоборства (рои, переход от кинетического поражения к информационно-энергетическому) с использованием техники с качественно

новыми свойствами: высокоскоростные ЛА, электромагнитное и групповое оружие, многопозиционные системы (МПС) наведения, высокоточное оружие, ударные платформы и т.д.

Для реализации этих направлений РЭСУ должны обеспечивать [1–3]:

- ситуационную осведомленность экипажа и систем управления;
- выбор приоритетных источников информации и управление режимами их работы;
- формирование и реализацию требуемых законов траекторного управления;
- радиомониторинг окружающего пространства;
- оценку ресурсной возможности решения задач наведения;
- целераспределение при групповых действиях;
- управление электромагнитной совместимостью;
- траекторное управление летательными аппаратами различного назначения.

В общем случае РЭСУ по-прежнему остаются единственным всепогодным источником получения информации об удаленных объектах и единственным средством дистанционного управления ЛА. Однако их существующие разновидности не

способны решить весь комплекс предъявляемых к ним новых требований.

В связи с этим необходима разработка РЭСУ нового поколения, которые будут обладать более совершенными показателями.

Создание такой РЭСУ включает необходимость решения нескольких проблем теоретического и прикладного характера. К теоретическим проблемам относится прежде всего выбор стратегии разработки, наилучшим образом учитывающей взаимозависимость различных частей и этапов функционирования РЭСУ, а также выбор и обоснование способов их оптимизации. К прикладным проблемам относятся синтез алгоритмов управления и их информационного обеспечения, реализующих заданные требования.

Следует подчеркнуть, что авиационные РЭСУ представляют собой разновидность сложных технических систем (СТС), характерными признаками которых являются:

- способность решать конкретную тактическую задачу несколькими способами, используя разные законы управления, различные датчики информации и режимы их работы;
- многоэтапность решения задачи;
- структурная иерархичность;
- возможность декомпозиции при решении частных задач;
- циркуляция больших информационных потоков;
- оптимизация управления ресурсами.

Найти единый аппарат оптимизации, учитывающий эти особенности РЭСУ как СТС, практически невозможно. В связи с этим проблема оптимизации решается как совокупность оптимизационных задач обеспечения требуемых показателей совершенства РЭСУ на различных этапах. В наиболее простом варианте к этим этапам относятся: обзор зоны ответственности, первичная и вторичная обработка сигналов, траекторное управление.

Наилучшей стратегией разработки РЭСУ как сложной технической системы, позволяющей обеспечить взаимные интересы ее функционирования на различных этапах, является стратегия «сверху–вниз». В рамках этой стратегии на первом этапе, исходя из необходимости достижения конечного результата, выполняется синтез законов управления с учетом возможностей их реализации по динамическим свойствам носителя и информационного обеспечения.

Сформированный закон управления позволяет определить перечень необходимых оценок координат относительного и абсолютного движения цели и перехватчика и сформулировать требования к их точности [4].

На основе этих требований на следующем этапе в рамках вторичной обработки сигналов в радиолокационной системе (РЛС) оптимизируются алгоритмы сопровождения, формирующие все требуемые оценки, предопределяющие, в свою очередь, требования к составу первичных измерений, формируемых в РЛС на этапе первичной обработки сигнала. В простейшем случае эта задача решается по выполнению условий наблюдаемости [2].

Исследования, выполняемые по проверке эффективности второго этапа, позволяют сформировать требования к точности первичных измерений и, соответственно, вероятностям правильного обнаружения и ложной тревоги, характеризующим процедуру обнаружения. При этом требования к этим показателям предопределяют процедуру обзора (сопровождения) пространства.

В свою очередь, задачи управления, решаемые на первом этапе, включают:

- синтез реализуемых на практике законов управления при работе по различным типам ЛА;
- алгоритмы траекторного управления наблюдением [2, 3];
- управление пространственным положением позиций в составе МПС наведения;
- групповое управление БПЛА, вплоть до роя;
- интеллектуальное управление с обучением;
- управление ресурсами.

В общем случае математический аппарат оптимизации, используемый для решения всех этих задач, должен обеспечивать:

- возможность расширения поля условий применения, основанную на получении широкого спектра законов управления как частных случаев общего решения;
- возможность получения универсальных законов управления, инвариантных к условиям применения;
- возможность решения многокритериальных задач с учетом противоречивых требований обеспечения желаемых показателей эффективности, живучести и информативности [2];
- учет ограничений на координаты состояния, величину сигналов управления и возможность информационного обеспечения полученных законов управления;
- возможность изменения приоритетов управления в процессе полета.

Цель статьи — на примере систем перехвата высокоскоростных ЛА (ВСЛА), маневрирующих по сложным законам, рассмотреть процедуру выбора методов оптимизации, отвечающих перечисленным выше требованиям. Выбор в качестве объекта перехвата ВСЛА обусловлен рядом их

тактико-экономических преимуществ перед другими ЛА [5].

В основе выбора конкретного способа оптимизации лежат модели относительного движения цели и перехватчика, формируемые по результатам анализа их динамических (траекторных) характеристик, набор ограничений на перехватчик по величине сигналов управления и возможностей его информационных систем, показатели совершенства и критерии эффективности.

Анализ траекторных возможностей ВСЛА, выполненный в [6] по материалам зарубежных публикаций, позволяет прийти к следующим заключениям.

Летательные аппараты этого класса имеют высокие скорости полета ($V_{\text{ЛА}} \geq 5M$), дальности полета не менее нескольких сотен километров и способны совершать сложные маневры в вертикальной плоскости на высотах от 100 до 20 км со сменой знака производных скорости и угловых координат.

Эти особенности предопределяют необходимость использования моделей их движения с учетом производных угловой скорости и наличия ограничений на ракурсы перехвата в условиях, когда скорость перехватчика меньше скорости цели, а также использования в качестве основного показателя системы перехвата текущего и конечного промахов, а в качестве критерия эффективности минимум квадратичных (биквадратных) функционалов качества.

1. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЭСУ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВЫБОР МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ

Особенности функционирования РЭСУ в рамках системы перехвата ВСЛА определяются совокупностью свойств управленческой части, определяющей траекторию полета, и информационной части, определяющей перечень и точность оценок координат состояния, используемых для реализации закона управления.

К этим особенностям прежде всего относятся:

- случайный и заранее неизвестный временной интервал работы, предопределяющий необходимость использования вариантов локальной оптимизации [2];
- минимизация времени, затрачиваемого на формирование сигналов управления, и используемых оценок координат состояния;
- требования повышения экономичности процедур перехвата, предопределяющие широкий спектр перехватываемых

ЛА и сокращение числа используемых измерителей;

- высокая степень неопределенности условий применения и широкий спектр возможных маневров, которые априори предопределяют несовершенство моделей состояния, используемых при синтезе. Эта особенность вызывает, с одной стороны, использование локальных вариантов статистической теории оптимального управления (СТОУ), а с другой стороны, использование в законах управления не оценок, а непосредственно результатов измерений [7, 8] с точностью до ошибок измерений, отражающих реальное состояние системы «цель — РЭСУ».

Широкий набор различных типов ЛА-целей, принимающих участие в противоборстве, заведомо обуславливает несоответствие динамических свойств ЛА-носителя и его бортовой информационно-вычислительной системы динамическим свойствам противоборствующих ЛА. Отсюда следует целесообразность автоматического учета этого несоответствия в законах управления носителем и его системах автоматического сопровождения.

Сложный характер пространственных перемещений ВСЛА требует учета в законах наведения высоких производных угловых координат, что для следящих угломеров является достаточно сложной задачей.

Высокие скорости противоборствующих ЛА предопределяют необходимость увеличения запаса времени на подготовку противодействия, что, в свою очередь, обуславливает необходимость увеличения дальности действия средств их наблюдения. Однако с увеличением дальности наблюдения ВСЛА качественно уменьшаются значения угловой скорости линии их визирования, основного информативного параметра практически всех законов управления, делая их неэффективными [3, 8]. Эта особенность предопределяет необходимость использования нестационарных законов траекторного управления, в которых на больших дальностях основным информативным параметром являются ошибки управления по угловым координатам, а с уменьшением дальности до цели — угловая скорость линии визирования, минимизация которой обеспечивает минимизацию промахов [4].

Использование в качестве основного источника информации РЛС [12, 14] обуславливает необходимость учета ряда ее особенностей.

Первая связана с использованием открытого радиоканала, по которому могут поступать радиопомехи, нарушающие работу РЛС и, соответственно, системы наведения в целом. Эта особенность требует оптимизации алгоритмов помехозащиты [9].

Вторая связана с зависимостью точности и достоверности формируемых оценок от геометрии

взаимного расположения носителя РЛС и сопровождаемых объектов, что дает возможность в рамках траекторного управления наблюдением [3] решать не только конечные задачи, но и обеспечивать наилучшие условия для радиолокационного наблюдения.

Третья связана со сложностью устойчивого формирования оценок производных угловой скорости линии визирования по результатам измерения бортовых пеленгов целей [16].

Одной из особенностей РЭСУ перехвата интенсивно маневрирующих ЛА является необходимость функционирования на границе зон потери устойчивости как систем управления, так и систем автоматического сопровождения по дальности, скорости и угловым координатам. Отсюда следует необходимость принятия специальных мер по предотвращению перехода этих границ. Наиболее рациональным способом решения этой задачи является использование законов управления с нелинейной (кубической) зависимостью от ошибок функционирования [2, 10].

Необходимо отметить, что использование в процессе наведения координат состояния и сигналов управления разных знаков предопределяет использование при оптимизации квадратичных (биквадратных) функционалов качества.

2. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПЕРЕХВАТА ВСЛА

Математический аппарат оптимизации радиоэлектронных систем перехвата ВСЛА должен решать совокупность взаимосвязанных задач формирования закона траекторного управления при работе по ЛА, совершающим сложные маневры со сменой знака производных скорости и угловых координат, и его устойчивого информационного обеспечения на основе алгоритмов автоматического радиолокационного сопровождения.

Решить эту задачу в рамках единого математического аппарата невозможно. Более целесообразно, опираясь на выводы теоремы разделения [4], оптимизировать управленческие и информационные задачи отдельно.

Учитывая особенности функционирования РЭСУ в приложении к решению задач перехвата ВСЛА, математический аппарат оптимизации управления должен обеспечивать:

- эффективный уход носителя и систем сопровождения от границ потери устойчивости с формированием законов управления с нелинейной (кубической) зависимостью от ошибок функционирования;

- формирование нестационарных законов управления с перераспределением управленческих приоритетов в процессе перехвата;
- учет измеряемых возмущений без расширения вектора состояния;
- формирование закона управления при неизвестном времени перехвата;
- универсальность, характеризующую способность системы перехвата функционировать в широком поле условий применения, в том числе и в условиях их несоответствия моделям, положенным в основу синтеза;
- реализуемость, основанную на использовании носителей с достижимой на практике маневренностью и способности устойчивого формирования всех оценок координат состояния, используемых в законе управления в рамках ограничений, накладываемых на диапазон обслуживаемых координат, величину управляющих сигналов и быстродействие вычислителей.

К настоящему времени для оптимизации систем управления различного назначения наиболее часто используются варианты математического аппарата классической СТОУ с минимизацией квадратичных функционалов качества за все время их работы. Среди этих вариантов необходимо прежде всего выделить метод динамического программирования Беллмана, метод максимума Понтрягина и метод критерия обобщенной работы А.А. Красовского. Общим недостатком этих вариантов является необходимость знания времени работы оптимизируемой системы и необходимость решения высокоразмерной двухточечной краевой задачи по вычислению коэффициентов передачи ошибок управления, что для РЭСУ является неприемлемым.

В связи с этим в приложении к РЭСУ более приемлемыми являются варианты СТОУ с локальной оптимизацией квадратичных функционалов на каждый текущий момент времени [2, 4], что предопределяет возможность функционирования в условиях неизвестного заранее времени работы. При этом не требуется решения двухточечной краевой задачи, что существенно упрощает процедуру формирования управления. Кроме того, при его формировании не требуется знания модели состояния, достаточно знать только оценки используемых координат относительного и абсолютного движения цели и перехватчика. Эта особенность позволяет значительно расширить поле условий применения сформированных законов управления, в том числе и в условиях нелинейных связей координат относительного движения летательных аппаратов.

Несомненным преимуществом локальной оптимизации является возможность учесть в законе

управления большое число различных возмущений, не прибегая к расширению вектора состояния [2].

В качестве таких возмущений могут быть использованы различные внешние воздействия на перехватчик, его динамические свойства, результаты прогноза положения цели, несоответствие динамических свойств цели и перехватчика и т.д., которые позволяют существенно улучшить точность и устойчивость наведения за счет использования различных модификаций законов управления, формируемых как частные случаи общего решения.

Весьма перспективным вариантом локальной оптимизации является прием, основанный на трансформации входных сигналов, как способ улучшения совершенства системы наведения с недостаточными динамическими свойствами ЛА-перехватчика [3] за счет более сложного информационного обеспечения, обеспечивающего поступление в закон управления большего числа корректирующих сигналов.

Однако системы наведения, синтезированные по аппарату локальной оптимизации на основе квадратичных функционалов [3], по-прежнему требуют оценивания высоких производных угловых координат и не обеспечивают эффективного увода носителя и систем сопровождения от границ потери устойчивости. Последнее обусловлено линейной зависимостью управляющих сигналов от ошибок управления, обеспечивающей их

одинаковую чувствительность как к малым, так и к большим ошибкам управления.

Более рациональным является использование варианта локальной оптимизации на основе минимизации квадратично-биквадратных функционалов качества, позволяющего учесть оба этих недостатка [2, 10].

3. ОПТИМИЗАЦИЯ РЭСУ ПО МИНИМУМУ КВАДРАТИЧНО-БИКВАДРАТНОГО ФУНКЦИОНАЛА КАЧЕСТВА

Рассматриваемый аппарат оптимизации позволяет [2] для перехватчика

$$\dot{\mathbf{x}}_{\Pi}(t) = \mathbf{F}_{\Pi} \mathbf{x}_{\Pi}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t) + \xi_{\Pi}(t), \quad \mathbf{x}_{\Pi}(0) = \mathbf{x}_{\Pi 0}, \quad (1)$$

предназначенного для перехвата ЛА, движущегося по траектории

$$\dot{\mathbf{x}}_{Ц}(t) = \mathbf{F}_{Ц} \mathbf{x}_{Ц}(t) + \xi_{Ц}(t), \quad \mathbf{x}_{Ц}(0) = \mathbf{x}_{Ц 0}, \quad (2)$$

при наличии измерений

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\Pi}^T(t) & \mathbf{x}_{Ц}^T(t) \end{bmatrix}^T + \xi_z(t), \quad (3)$$

сформировать закон управления

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{B}^T \left\{ \mathbf{Q} + 2 \left[\Delta \hat{\mathbf{x}}(t) \Delta \hat{\mathbf{x}}^T(t) \right] \mathbf{P} \right\} \Delta \hat{\mathbf{x}}(t), \quad (4)$$

оптимальный по минимуму функционала

$$I = M \left\{ \Delta \mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \Delta \mathbf{x}(t) + \Delta \mathbf{x}^T(t) \left[\Delta \mathbf{x}(t) \Delta \mathbf{x}^T(t) \mathbf{P} \right] \Delta \mathbf{x}(t) + \int_0^t \mathbf{u}^T(t) \mathbf{K} \mathbf{u}(t) dt \right\}. \quad (5)$$

В соотношениях (1)–(5) $\mathbf{x}_{\Pi}$ и $\mathbf{x}_{Ц}$ – n -мерные векторы; $\mathbf{F}_{\Pi}$ и $\mathbf{F}_{Ц}$ – динамические матрицы внутренних связей процессов (1) и (2); $\mathbf{B}$ – матрица эффективности r -мерного ($r \leq n$) вектора управления; $\mathbf{z}$ – m -мерный ($m \leq 2n$) вектор; ξ_{Π} , $\xi_{Ц}$ и ξ_z – центрированные гауссовские шумы возмущений; $\mathbf{H}$ – матрица связи измерений и состояния; $\mathbf{Q}$ – матрица штрафов за величину ошибок управления;

$$\Delta \mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_{Ц}(t) - \mathbf{x}_{\Pi}(t), \quad \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) = \hat{\mathbf{x}}_{Ц}(t) - \hat{\mathbf{x}}_{\Pi}(t); \quad (6)$$

$\hat{\mathbf{x}}_{\Pi}$, $\hat{\mathbf{x}}_{Ц}$ – оптимальные оценки процессов (1) и (2); $\mathbf{P}$ – весовая матрица биквадратной составляющей функционала; $\mathbf{K}$ – матрица штрафов за величину сигналов управления; $M\{\cdot\}$ – знак операции математического ожидания при условии, что есть измерения; T – знак транспонирования.

Далее для упрощения записей будет опущена зависимость векторов и матриц от времени t .

Анализ (4) позволяет сделать следующие выводы:

1. Для формирования закона управления не требуется знания времени наведения и решения двухточечной краевой задачи, необходимого при использовании классических вариантов СТОУ;

2. Сигнал управления содержит два слагаемых: первое –

$$\mathbf{K}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Q} \Delta \hat{\mathbf{x}}(t), \quad (7)$$

его линейная часть, которая предопределяет высокую чувствительность (4) к малым ошибкам; второе –

$$2 \mathbf{K}^{-1} \mathbf{B}^T \left[\Delta \hat{\mathbf{x}}(t) \Delta \hat{\mathbf{x}}^T(t) \right] \mathbf{P} \Delta \hat{\mathbf{x}}(t), \quad (8)$$

определяет кубическую часть, которая характеризует способность (4) обеспечивать увод от опасных границ при больших ошибках.

При этом в (8) наряду со слагаемыми, пропорциональными Δx_i^3 , содержатся и комбинационные составляющие, пропорциональные мультипликативным составляющим $\Delta x_i^2 \Delta x_j$ ($j \neq i$).

3. Закон формирования управления (4) сам по себе обеспечивает широкое поле условий применения, поскольку инвариантен к моделям (1) и (2). Поле условий применения (4) ограничивается только возможностями систем сопровождения по формированию оценок $\hat{x}_п$ и $\hat{x}_ц$.

4. Использование нестационарных вариантов матриц $\mathbf{Q}$, $\mathbf{B}$ и $\mathbf{K}$ как функций дальности и скорости обеспечивает формирование нестационарного закона наведения (4) с перераспределением приоритетов управления на заданных удалениях от цели [3].

5. Учет в моделях (1), (2) различного рода реальных и виртуальных возмущений в виде дополнительных слагаемых [2] позволяет получить большое число модификаций законов управления, компенсирующих их влияние, как частных случаев общего решения (4).

При этом, манипулируя в (5) составом матрицы $\mathbf{P}$, можно получить законы управления (4) различной сложности, в разной степени удовлетворяющие предъявленным требованиям.

Далее на конкретном примере будет рассмотрен вариант синтеза закона управления (4) при работе по летательному аппарату, маневрирующему по сложному закону со сменой знака производных скорости и угловых координат.

4. СИНТЕЗ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ, ОПТИМАЛЬНОГО ПО МИНИМУМУ КВАДРАТИЧНО-БИКВАДРАТНОГО ФУНКЦИОНАЛА КАЧЕСТВА

Ниже в качестве иллюстрации возможностей способа оптимизации, приведенного в разд. 3, будет рассмотрен упрощенный вариант синтеза, использованного в [3].

В математическом плане постановка задачи формулируется следующим образом.

Для перехватчика, определяемого в одной плоскости упрощенной моделью [3]

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_п &= \omega_п, & \varphi_п(0) &= \varphi_{п0}; \\ \dot{\omega}_п &= -\frac{1}{T_п} \omega_п + \frac{b}{T_п} j_п + \xi_{\omega_п}, & \omega_п(0) &= \omega_{п0}, \end{aligned} \quad (9)$$

предназначенного для перехвата интенсивно маневрирующего ЛА, движущегося в соответствии с моделью

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_ц &= \omega_ц, & \varphi_ц(0) &= \varphi_{ц0}; \\ \dot{\omega}_ц &= -\frac{2\dot{D}}{D} \omega_ц + \frac{1}{D} (j_ц - j_п) + \xi_{\omega_ц}, & \omega_ц(0) &= \omega_{ц0}, \end{aligned} \quad (10)$$

необходимо сформировать сигнал управления $j_п$, оптимальный по минимуму функционала

$$I = M \left\{ \begin{bmatrix} \Delta\varphi \\ \Delta\omega \end{bmatrix}^T \left\{ \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12}/\dot{D} \\ q_{21}/\dot{D} & q_{22}/D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\varphi^2 & \Delta\varphi\Delta\omega \\ \Delta\varphi\Delta\omega & \Delta\omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \Delta\varphi \\ \Delta\omega \end{bmatrix} + \int_0^t j_п^2 K_п dt \right\}, \quad (11)$$

где $\varphi_п$ и $\varphi_ц$ — угол направления полета перехватчика и угол визирования перехватываемого ЛА; $\omega_п$ и $\omega_ц$ — угловые скорости изменения углов $\varphi_п$ и $\varphi_ц$; $T_п$ — постоянная времени перехватчика, характеризующая его инерционность; b — коэффициент передачи сигнала управления; D и $\dot{D}$ — дальность до цели и ее производная; $j_п$ и $j_ц$ — поперечные ускорения перехватчика и цели; $\xi_{\omega_п}$ и $\xi_{\omega_ц}$ — центрированные гауссовские шумы состояния.

Геометрия взаимного расположения цели $O_ц$ и перехватчика $O_п$ показана на рис. 1.

Поставив в соответствие (9), (10) с (1), (2), и (11) с (5), получим

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_п &= \begin{bmatrix} \varphi_п \\ \omega_п \end{bmatrix}, & \mathbf{x}_ц &= \begin{bmatrix} \varphi_ц \\ \omega_ц \end{bmatrix}, & \Delta\mathbf{x} &= \begin{bmatrix} \Delta\varphi \\ \Delta\omega \end{bmatrix}, \\ \mathbf{Q} &= \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12}/\dot{D} \\ q_{21}/\dot{D} & q_{22}/D \end{bmatrix}, & \mathbf{u} &= j_п, & \mathbf{K} &= K_п, & (12) \\ \Delta\mathbf{x}\Delta\mathbf{x}^T &= \begin{bmatrix} \Delta\varphi^2 & \Delta\varphi\Delta\omega \\ \Delta\varphi\Delta\omega & \Delta\omega^2 \end{bmatrix}, & \mathbf{P} &= \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

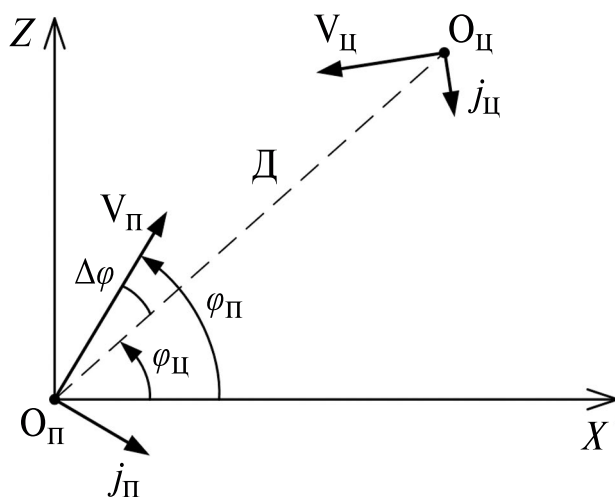


Рис. 1. Геометрия взаимного расположения цели $O_ц$ и перехватчика $O_п$; $\mathbf{V}_ц$ и $\mathbf{V}_п$ — векторы их скоростей.

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{ц}} - \varphi_{\text{п}}, \Delta\omega = \omega_{\text{ц}} - \omega_{\text{п}}. \quad (13)$$

Используя (12), (13) в (4), находим

$$j_{\text{п}} = \frac{bq_{21}}{K_{\text{п}}T_{\text{п}}\hat{D}}\Delta\hat{\varphi} + \frac{bq_{22}}{K_{\text{п}}T_{\text{п}}\hat{D}}\Delta\hat{\omega} + \frac{bp_{11}}{K_{\text{п}}T_{\text{п}}}\Delta\hat{\varphi}^2\Delta\hat{\omega} + \frac{2bp_{21}}{K_{\text{п}}T_{\text{п}}}\Delta\hat{\varphi}\Delta\hat{\omega}^2 + \frac{bp_{22}}{K_{\text{п}}T_{\text{п}}}\Delta\hat{\omega}^3. \quad (14)$$

Анализ (14) позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Закон управления характеризует многоконтурную систему с обратными связями только по углу и угловой скорости, что достаточно просто реализуется на практике.

2. Для информационного обеспечения (14) не требуются знания высоких производных угловых координат, достаточно иметь только оценки углов $\hat{\varphi}_{\text{п}}, \hat{\varphi}_{\text{ц}}$ (или $\Delta\hat{\varphi}$) и угловых скоростей $\hat{\omega}_{\text{п}}, \hat{\omega}_{\text{ц}}$, что достаточно просто обеспечивается на практике.

3. В состав сигнала управления входят линейная часть (7) (первые два слагаемых), которая и определяет в основном траекторию перехватчика, и нелинейная часть в виде совокупности третьего, четвертого и пятого слагаемых, которые являются сигналами коррекции, улучшающими динамические свойства носителя. При этом влияние этих корректирующих сигналов зависит от текущего соотношения ошибок управления $\Delta\hat{\varphi}^2\Delta\hat{\omega}, \Delta\hat{\varphi}\Delta\hat{\omega}^2, \Delta\hat{\omega}^3$.

При малых ошибках $\Delta\hat{\varphi}, \Delta\hat{\omega}$ эти слагаемые практически не влияют на точность наведения. Однако при увеличении ошибок они оказывают все возрастающее влияние на сигнал управления, а соответственно, и траекторию полета перехватчика, обеспечивая его ускоренный уход от опасных границ.

4. Нестационарный характер полученного закона определяется зависимостью коэффициентов передачи $\Delta\hat{\varphi}$ и $\Delta\hat{\omega}$ от дальности, скорости и квадратов ошибок сопровождения $\Delta\hat{\omega}^2$ и $\Delta\hat{\varphi}^2$. На больших расстояниях до цели, когда $\Delta\omega \rightarrow 0$, управляющий сигнал определяется ошибкой управления по углу, устраняя начальные ошибки управления по направлению. Затем, по мере уменьшения дальности и увеличения угловых скоростей возрастает роль слагаемых, содержащих $\Delta\hat{\omega}$, чем обеспечивается минимизация угловой скорости линии визирования $\omega_{\text{ц}}$ и, соответственно, текущего и конечного промахов [4]

$$h \approx \frac{D^2\omega_{\text{ц}}}{|\dot{D}|}. \quad (15)$$

5. Спецификой (14) является то обстоятельство, что наведение осуществляется не в упрежденную точку встречи, а непосредственно на сопровождаемый ЛА (13), что обеспечивает устойчивость траекторного управления, при его маневре со сменой знака угловых координат и их производных.

Результаты исследований аналога (14), приведенные в [3], свидетельствуют о его способности устойчиво устранять не только ошибки управления по углу, но и линейные промахи в допустимом диапазоне значений поперечных ускорений носителя.

Таким образом, полученный закон траекторного управления не накладывает ограничений на возможность его реализации ни по динамическим свойствам носителя, ни по информационному обеспечению, и удовлетворяет всем требованиям, изложенным в разд. 2.

5. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОПТИМАЛЬНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Результаты синтеза закона управления позволяют определить состав оценок координат относительного и абсолютного движения летательных аппаратов, необходимых для его реализации. При этом, используя аппарат оценки чувствительности закона управления к различным координатам состояния [4] на основе требований к конечному результату применения РЭСУ (например, промаху), можно обосновать требования к точности оценивания координат состояния во всем поле условий применения. Примеры использования методики оценки чувствительности для различных законов управления приведены в [11].

В общем случае практически во всех известных законах траекторного управления [4, 11] в качестве информационного обеспечения используется набор оценок дальности, углов и их производных. При этом проведенные исследования [11] показали, что ошибки формирования оценок угловых координат влияют на точность управления на порядок и более сильнее, чем ошибки дальномерного канала.

При выборе способа оптимизации информационного обеспечения необходимо учитывать следующие особенности функционирования РЭСУ.

1. В силу сложности и непредсказуемости маневров ВСЛА практически невозможно сформировать модели состояния, адекватно отражающие их траектории. Отсюда следуют два возможных способа оптимизации процедур оценивания.

Первый основан на использовании различных приемов адаптации алгоритмов фильтрации [13, 14]. Второй, основанный на использовании многоканальных структур на базе совокупности нескольких моделей состояния, в той или иной степени отражающих возможные маневры ВСЛА, характерен для систем управления со случайной скачкообразной структурой [15].

2. В наиболее эффективных комплексных системах автоматического сопровождения [16] для формирования требуемых оценок используются первичные измерители различной физической природы с разновременным поступлением измерений в алгоритмы фильтрации. Однако наиболее

известные алгоритмы калмановской фильтрации требуют одновременного прихода измерений [4, 14]. В связи с этим приходится применять специальные меры по обеспечению одновременности поступления измерений, которые связаны с потерей части измерений и необходимостью их численного прогноза на требуемые моменты времени, что приводит к значительному возрастанию ошибок оценивания.

Более целесообразным является использование варианта аналого-дискретной фильтрации по разновременным приходящим измерениям [3].

3. При использовании режимов многоцелевого сопровождения [17] измерения приходят с достаточно большим и изменяющимся во времени интервалом, соответственно, оценки формируются с таким же интервалом, в то время как сигналы управления должны формироваться непрерывно. Выходом из этого затруднения может служить использование варианта аналого-дискретной фильтрации [2, 14].

4. При использовании в комплексных системах оценивания в качестве первичных измерителей инерционных по своей природе систем автоматического сопровождения нарушается требование их безынерционности, постулированное алгоритмами калмановской фильтрации. В связи с этим необходимо использовать алгоритмы оценивания с компенсацией этой инерционности [14].

5. При использовании традиционных способов оптимизации законов управления удается сформировать законы управления, содержащие производные угловой скорости линии визирования [3]. Однако формирование нерасходящихся оценок этих производных по измерениям только углов является достаточно сложной задачей. Наиболее простой выход из этой ситуации — использовать многоступенчатую фильтрацию [14]. В рамках этого подхода по результатам измерений углов в первой ступени устойчиво формируются оценки углов и угловой скорости, которые в качестве измерений поступают в следующую ступень фильтрации, где устойчиво формируются оценки углов, угловой скорости и ее первой производной, которые в качестве измерений поступают в следующую ступень и т.д. [2], вплоть до получения оценок нужной производной.

Следует, однако, подчеркнуть, что, обеспечивая устойчивое формирование оценок производных угловой скорости линии визирования, этот прием приводит к увеличению инерционности фильтра в целом и, соответственно, к возрастанию динамических ошибок при сопровождении интенсивно маневрирующих целей.

6. Определенное значение для выбора способа оптимизации информационного обеспечения имеет тип используемой антенной системы: с механическим приводом или активной фазированной антенной решетки (АФАР). Каждый из этих типов имеет свои достоинства и недостатки. Однако необходимо

подчеркнуть, что использование АФАР на конечном участке наведения приводит к возрастанию уровня угловых шумов за счет наложения на блуждания фазового центра отражения, присущего любой цели, еще случайных ошибок формирования направлений излучения и приема за счет нестабильностей формирования амплитудно-фазового распределения в поле раскрытия антенны [18].

Обобщив рассмотренные выше особенности РЭСУ на этапе разработки средств информационного обеспечения систем перехвата ВСЛА, целесообразно рекомендовать использование в качестве основного аппарата оптимизации адаптивную аналого-дискретную фильтрацию [2, 14], в первую очередь уделяя внимание устойчивости и точности оценивания угловых координат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный выше материал позволяет сделать следующие выводы.

1. Анализ особенностей развития военно-технического противоборства предопределяет необходимость разработки РЭСУ нового поколения, более полно удовлетворяющих новым требованиям.

2. При создании РЭСУ нового поколения целесообразно использовать подход «сверху—вниз», предопределяющий на первом этапе разработку законов управления, определяющих состав и точность оценок необходимых координат состояния в рамках вторичной обработки сигналов в РЛС.

В свою очередь, перечень оценок используемых координат состояния предопределяет состав и точность первичных измерений и т.д.

3. Существенную роль в обеспечении необходимых показателей совершенства разрабатываемой РЭСУ играет аппарат оптимизации, который для упрощения его использования разбивается на несколько способов, обеспечивающих оптимизацию отдельных этапов.

4. Выбранная методика разработки РЭСУ «сверху—вниз» проиллюстрирована примером качественного анализа по выбору аппарата оптимизации в приложении к системам перехвата ВСЛА.

5. Проведенный анализ различных способов оптимизации законов траекторного управления показал, что в приложении к системам перехвата ВСЛА наиболее совершенной является оптимизация по минимуму квадратично-биквадратных функционалов качества.

6. Проведенный анализ показал, что наиболее широкими возможностями по разработке алгоритмов оценивания координат состояния, используемых в полученном законе управления, обладает аппарат адаптивной аналого-дискретной фильтрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные системы радиоуправления / Под ред. В.С. Вербы, В.И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2014.
2. Меркулов В.И., Верба В.С. Синтез и анализ авиационных радиоэлектронных систем управления. Кн. 1. Теоретические основы построения и разработки. М.: Радиотехника, 2023.
3. Меркулов В.И., Верба В.С. Синтез и анализ авиационных радиоэлектронных систем управления. Кн. 2. Оптимизация методов самонаведения и их информационного обеспечения. М.: Радиотехника, 2023.
4. Авиационные системы радиоуправления. Учебник для военных и гражданских вузов / Под ред. В.И. Меркулова. М.: изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008.
5. Верба В.С., Меркулов В.И., Закомолдин Д.В. // Успехи совр. радиоэлектроники. 2024. Т. 78. № 3. С. 5.
6. Верба В.С., Меркулов В.И., Закомолдин Д.В., Лихачев В.П. // Успехи совр. радиоэлектроники. 2024. Т. 78. № 4. С. 5.
7. Ярлыков М.С., Богачев А.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т. 1. Теоретические основы / Под ред. М.С. Ярлыкова. М.: Радиотехника, 2012.
8. Ярлыков М.С., Богачев А.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т. 2. Применение авиационных радиоэлектронных комплексов при решении боевых и навигационных задач / Под ред. М.С. Ярлыкова. М.: Радиотехника, 2012.
9. Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2003.
10. Верба В.С., Меркулов В.И., Руденко Е.А. // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 2021. № 1. С. 24.
11. Меркулов В.И., Дрогалин В.В., Канащенков А.И. и др. Авиационные системы радиоуправления. Т. 2. Радиоэлектронные системы самонаведения / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2003.
12. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / Под ред. Е.А. Федосова. М.: Дрова, 2005.
13. Меркулов В.И., Канащенков А.И., Перов А.И. и др. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч.1 / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2004.
14. Меркулов В.И., Верба В.С., Ильчук А.Р. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Т. 1. Теоретические основы. РЛС в составе интегрированного авиационного комплекса / Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2018.
15. Бухалев В.А. Распознавание, оценивание и управление в системах со случайной скачкообразной структурой. М.: Физматлит, 1996.
16. Меркулов В.И., Верба В.С., Ильчук А.Р., Колтышев Е.Е. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Т. 2. Сопровождение одиночных целей / Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2018.
17. Меркулов В.И., Верба В.С., Ильчук А.Р., Кирсанов А.П. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Т.3. Многоцелевое сопровождение / Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2018.
18. Меркулов В.И., Ильчук А.Р. // Вестник ВКО. 2022. Вып. 2. С. 62.

AVIATION RADIO-ELECTRONIC CONTROL SYSTEMS. A CONCEPTUAL APPROACH TO OPTIMIZATION

V. I. Merkulov

JSC Vega Radio Engineering Corporation,
Kutuzovsky avenue, 34, Moscow, 121170 Russia
E-mail: mvipost41@gmail.com

Received June 18, 2024, revised June 18, 2024, accepted June 23, 2024

Based on the analysis of the features of military-technical confrontation, the requirements for ways to optimize the control laws and their information support in the application to electronic interception systems of aircraft are formulated. Based on the results of the analysis of the features of the functioning of radio-electronic control systems of this type, recommendations are given on the choice of a mathematical apparatus for synthesizing the laws of trajectory control that are optimal for minimizing the quadratic-biquadrate quality functional using an adaptive analog-discrete filtering option for information support.

Keywords: aviation radio-electronic control systems, law of trajectory control, information support, quadratic-biquadrate quality functional, adaptive analog-discrete filtering