

# Управление в технических системах

© 2025 г. В.С. ВЕРБА, чл.-корр. РАН (vvs.msk@gmail.com),  
В.И. МЕРКУЛОВ, д-р техн. наук (mvipost41@gmail.com)  
(АО «Концерн «Вега», Москва),  
В.П. ХАРЬКОВ, д-р техн. наук (charkovvp@ Rambler.ru)  
(ООО «НПО НаукаСофт», Москва)

## ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ МЕТОДОВ НАВЕДЕНИЯ НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ИНТЕНСИВНО МАНЕВРИРУЮЩИЕ ЦЕЛИ. ЧАСТЬ 2. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ОПТИМИЗАЦИИ

На основе требований к методам оптимизации систем перехвата высокоскоростных летательных аппаратов, сформулированных в первой части статьи, проведен анализ возможностей различных способов оптимизации по решению этой задачи. На качественном уровне рассмотрены возможные варианты классической теории оптимального управления, ее вариантов с локальной оптимизацией, вариантов с локальной оптимизацией по минимуму квадратично-биквадратных функционалов качества, на базе концепции обратных задач динамики с оценкой вариантов оптимизации информационного обеспечения всех подходов.

*Ключевые слова:* статистическая теория оптимального управления, локальная оптимизация, квадратично-биквадратный функционал качества, обратная задача динамики, адаптивная аналого-дискретная фильтрация.

DOI: 10.31857/S0005231025010033, EDN: JQVOGZ

### 1. Введение

Военно-техническое совершенство систем наведения во многом определяется способами оптимизации законов управления и их информационного обеспечения, положенными в основу их разработки. К настоящему времени известно большое число способов оптимизации, в различной степени учитывающих требования точности и экономичности функционирования [1]. Среди них необходимо выделить варианты статистической теории оптимального управления (СТОУ), позволяющие синтезировать системы наведения, совместно наилучшие по точности и экономичности затрат на управление. В основу оптимизации этих вариантов положен принцип минимизации квадратичных функционалов качества, учитывающих и ошибки управления, и затраты энергии на его реализацию.

Среди этих вариантов необходимо выделить достаточно сложные классические варианты СТОУ, обеспечивающие оптимальность систем наведения

за все время перехвата [2–9], и более простые варианты, обеспечивающие их локальную оптимальность на каждый текущий момент времени [2–4, 10–12].

В практике разработки сложных технических систем различного назначения используются также варианты синтеза, основанные на концепции обратных задач динамики [13–18], особенностью которых является возможность достаточно простого учета при синтезе законов управления различного рода нелинейностей.

Среди способов синтеза, не учитывающих расход энергии управляющих сигналов, наиболее распространенными являются градиентные методы [1, 19], обеспечивающие оптимизацию управления по различного рода функционалам, имеющим экстремум на интервале работы системы.

При оптимизации информационных систем широкое распространение получили различные модификации фильтров Калмана [3, 4, 20–23].

В последнее время все большее распространение при синтезе систем, функционирующих в условиях априорной неопределенности, находят так называемые интеллектуальные способы оптимизации, основанные на использовании нейросетевых подходов [24, 25].

Анализ требований к используемым методам оптимизации, выполненный в [26], позволяет выделить прежде всего возможность формирования нестационарных методов самонаведения, возможность функционирования в заданном поле условий применения и ограничений и возможность реализации по динамическим свойствам носителя и способности формировать оценки координат, используемых в методе наведения. Необходимо отметить, что последнюю возможность можно оценить только по результатам синтеза конкретных методов наведения.

Практические способы реализации нестационарности методов наведения, обеспечивающие возможность изменения управленческих и информационных приоритетов в полете, основанные на использовании нестационарных моделей состояния и коэффициентов матриц штрафов за точность и экономичность функционирования как функций дальности и скорости, детально рассмотрены в [4].

Кроме того, в [4] подробно рассмотрены методики синтеза законов наведения на высокоскоростные летательные аппараты (ВСЛА) на основе классического подхода статистической теории оптимального управления в постановке Летова–Калмана и на основе ее локального варианта, позволяющего в качестве возмущений учесть несоответствие динамических свойств цели и перехватчика.

Далее на качественном уровне будет проведена оценка различных способов оптимизации методов наведения на ВСЛА, в той или иной степени учитывающих требования, рассмотренные в [26].

При этом будет использоваться двойная нумерация разделов и формул, в рамках которой первая цифра соответствует номеру части статьи, а вторая определяет конкретный раздел или формулу.

## 2. Анализ возможностей классической теории оптимального управления в постановке Летова–Калмана

В приложении к решаемой задаче математический аппарат традиционной статистической теории оптимального управления [3–9] в наиболее простом варианте позволяет для перехватчика

$$(2.1) \quad \dot{\mathbf{x}}_y(t) = \mathbf{F}_y \mathbf{x}_y(t) + \mathbf{B}_y \mathbf{u}(t) + \boldsymbol{\xi}_y(t), \quad \mathbf{x}_y(0) = \mathbf{x}_{y0},$$

предназначенного для наведения на цель, движущуюся по траектории

$$(2.2) \quad \dot{\mathbf{x}}_T(t) = \mathbf{F}_T \mathbf{x}_T(t) + \boldsymbol{\xi}_T(t), \quad \mathbf{x}_T(0) = \mathbf{x}_{T0},$$

при наличии измерений

$$(2.3) \quad \mathbf{z}(t) = \mathbf{H}\mathbf{x}(t) + \boldsymbol{\xi}_z(t), \quad \mathbf{x}(t) = [\mathbf{x}_T^T(t) \quad \mathbf{x}_y^T(t)]^T$$

сформировать закон управления

$$(2.4) \quad \mathbf{u}(t) = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{B}_y^T \mathbf{P}(t) [\hat{\mathbf{x}}_T(t) - \hat{\mathbf{x}}_y(t)],$$

$$(2.5) \quad \dot{\mathbf{P}}(t) = -\mathbf{L} - \mathbf{F}_y^T \mathbf{P}(t) - \mathbf{P}(t) \mathbf{F}_y + \mathbf{P}(t)^T \mathbf{B}_y \mathbf{K}^{-1} \mathbf{B}_y^T \mathbf{P}(t), \quad \mathbf{P}(t_k) = \mathbf{Q},$$

оптимальный по минимуму квадратичного функционала Летова–Калмана

$$(2.6) \quad I = M \left\{ [\mathbf{x}_T(t_k) - \mathbf{x}_y(t_k)]^T \mathbf{Q} [\mathbf{x}_T(t_k) - \mathbf{x}_y(t_k)] + \int_0^{t_k} [\mathbf{x}_T(t) - \mathbf{x}_y(t)]^T \mathbf{L} [\mathbf{x}_T(t) - \mathbf{x}_y(t)] dt + \int_0^{t_k} \mathbf{u}^T(t) \mathbf{K} \mathbf{u}(t) dt \right\}.$$

Здесь  $\mathbf{x}_y$  и  $\mathbf{x}_T$  –  $n$ -мерные векторы состояний перехватчика и цели;  $\mathbf{F}_y$  и  $\mathbf{F}_T$  – матрицы внутренних связей процессов (2.1) и (2.2);  $\mathbf{u}$  –  $r$ -мерный ( $r \leq n$ ) вектор управления;  $\mathbf{B}_y$  – матрица эффективности управления;  $\mathbf{z}$  –  $m$ -мерный ( $m \leq 2n$ ) вектор измерений;  $\mathbf{H}$  – матрица связи (2.1) и (2.2) с (2.3);  $\mathbf{P}$  – симметричная матрица, определяющая текущий вес ошибок управления;  $t$  и  $t_k$  – текущее и конечное время управления;  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{L}$  – неотрицательно определенные матрицы штрафов за конечную и текущую точность управления;  $\mathbf{K}$  – положительно определенная матрица штрафов за величину сигналов управления;  $\boldsymbol{\xi}_y$ ,  $\boldsymbol{\xi}_T$  и  $\boldsymbol{\xi}_z$  – векторы центрированных гауссовских шумов состояния и измерений;  $\hat{\mathbf{x}}_y$  и  $\hat{\mathbf{x}}_T$  – векторы оптимальных оценок процессов (2.1) и (2.2).

Необходимо отметить, что в состав минимизируемого функционала (2.6) входят три слагаемых. Первое – терминальное, определяет точность системы в конце управления, второе определяет интегральную точность за все время управления, а третье – расход энергии управляющих сигналов. По совокупности управление (2.4), (2.5), минимизирующее функционал (2.6), является

совместно наилучшим по точности и экономичности, что является несомненным достоинством.

Анализ (2.1)–(2.5) позволяет сделать ряд общих выводов.

1. Формируемый сигнал управления (2.4), (2.5) зависит от состояния системы  $\hat{\mathbf{x}}_y$  и  $\hat{\mathbf{x}}_T$ , ее способности воспринимать сигналы управления (которая определяется матрицей  $\mathbf{V}_y$ ), штрафов  $\mathbf{K}$  за сигналы управления и весовой матрицы  $\mathbf{P}$ . Чем больше штраф за управление, тем меньше сигналы  $\mathbf{u}$  и тем экономичней система, но тем менее она точна. Последнее предопределяется тем, что малые значения  $\mathbf{u}$  вызывают в (2.1) малые значения  $\dot{\mathbf{x}}_y$ , а соответственно и малые целенаправленные изменения  $\mathbf{x}_y$ . Если система (2.1) хорошо воспринимает сигналы управления  $\mathbf{u}$  (матрица  $\mathbf{V}_y$  имеет большие коэффициенты), то имеет смысл делать их большими, так как в такой ситуации будут иметь место большие значения  $\dot{\mathbf{x}}_y$  и система будет быстро изменять свое состояние  $\mathbf{x}_y$ . Если же коэффициенты матрицы  $\mathbf{V}_y$  малы, то не следует использовать большие сигналы управления, поскольку это приведет к неоправданно большим расходам энергии при очень малом выигрыше в точности.

2. Коэффициенты матрицы  $\mathbf{P}$  совокупным образом учитывают в (2.4) штрафы за текущую точность и экономичность, определяемые матрицами  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{K}$ , детерминированные связи и эффективность сигналов управления, обусловленные матрицами  $\mathbf{F}_y$  и  $\mathbf{V}_y$ . Влияние детерминированных связей проявляется в том, что изменение штрафа  $l_{ii}$  за точность функционирования по какой-либо координате  $x_i$  приводит к изменению точности и по другим, функционально связанным с  $x_i$  координатам. Происходящие при этом изменения матрицы  $\mathbf{P}$  приводят к изменению сигналов управления, а соответственно и экономичности системы.

3. Спецификой использования (2.4), (2.5) является то обстоятельство, что коэффициенты матрицы (2.5) вычисляются в обратном времени от  $t_k$  к  $t$  в процессе решения уравнения Риккати, в то время как в (2.4) они используются уже в прямом времени. Необходимо отметить, что сложность формирования управления, обусловленная в основном числом уравнений (2.5), которые нужно решить для определения матрицы  $\mathbf{P}$ , существенно превышает сложность самой оптимизируемой системы (2.1). Причем даже незначительное увеличение размерности (2.1) приводит к существенно неадекватному увеличению числа уравнений, которые нужно решать в процессе вычисления матрицы  $\mathbf{P}$  (число уравнений равно  $n^2$ ). Это явление, называемое «проклятием размерности» и характерное для многих видов оптимальных систем, сдерживает применение алгоритмов оптимального управления для сложных систем высокой размерности. Необходимо, однако, отметить, что для стационарных систем матрицу  $\mathbf{P}$ , определяемую только априорными сведениями, можно вычислить заранее. Соответственно, заранее могут быть вычислены для (2.4) и коэффициенты  $\mathbf{K}^{-1}\mathbf{V}_y^T\mathbf{P}(t)$ , число которых обусловлено размерностью  $r \times n$ . Последнее обстоятельство позволяет несколько упростить процедуру использования (2.4), (2.5) на практике.

4. Назначение различных штрафов  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{Q}$  на текущую и конечную точность позволяет реализовать различные ошибки на разных этапах работы системы перехвата и тем самым обеспечить требуемую точность в конце управления при весьма малых текущих затратах энергии.

В приложении к задаче синтеза метода наведения на ВСЛА в отношении аппарата (2.1)–(2.6) можно сделать следующие заключения:

- манипулируя видом матриц  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{K}$ , используя представление их элементов в виде функции координат состояния, можно сформировать нестационарный закон наведения [4] с перераспределением управленческих функций в зависимости от значения координат состояния при существенном усложнении процедуры вычисления (2.5);
- линейная зависимость (2.4) от ошибок управления ( $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}_T - \mathbf{x}_y$ ) не обеспечивает усиления роли управления для увода от границ потери устойчивости;
- для реализации (2.4), (2.5) необходимо знать время наведения, что практически невозможно;
- при использовании линейных (линеаризованных) моделей состояния формирование управления (2.4), (2.5) обеспечивает приемлемую универсальность метода наведения, реализуя устойчивое функционирование в широком поле условий применения [3];
- необходимость решения высокоразмерной двухточечной краевой задачи, обусловленной необходимостью решения уравнения (2.5) в обратном времени от  $t_k$  к  $t$ , в то время как управление (2.4) формируется в прямом времени от  $t$  к  $t_k$ , существенно усложняет процедуру формирования управления;
- в законе (2.4) зависимость сигнала управления от динамических свойств перехватчика ( $\mathbf{F}_y$ ) учитывается при решении (2.5) сложным образом, затрудняящим предсказание его значимости при решении задач перехвата;
- способность формировать все оптимальные оценки  $\hat{\mathbf{x}}_y$  и  $\hat{\mathbf{x}}_T$ , необходимые для реализации (2.4), определяется условием наблюдаемости (см. раздел 6) [3], выполнение которого зависит от вида внутренних связей (2.1), (2.2) и набора измерителей в составе (2.3).

В заключение необходимо отметить, что по своим возможностям классическая теория оптимального управления в постановке Летова–Калмана не удовлетворяет всем требованиям по реализации метода наведения на ВСЛА.

При этом наиболее сложными препятствиями для использования этого способа для оптимизации методов перехвата является необходимость знания времени наведения и сложность решения двухточечной краевой задачи.

### **3. Анализ возможностей вариантов локальной оптимизации по минимуму квадратичных функционалов**

Более перспективным является использование вариантов локальной оптимизации, обеспечивающей минимизацию функционалов качества на каждый текущий момент времени, не требуя знания времени наведения. При этом

можно сформировать управление без решения сложной двухточечной краевой задачи, что существенно упрощает процедуру его получения. Кроме того, в рамках этого подхода достаточно просто без расширения вектора состояния учесть в законе управления различные возмущения, воздействующие на перехватчик. В этом случае вариант локальной оптимизации позволяет [3] для перехватчика

$$(3.1) \quad \dot{\mathbf{x}}_y(t) = \mathbf{F}_y \mathbf{x}_y(t) + \mathbf{B}_y \mathbf{u}(t) + \mathbf{s}_y(t) + \boldsymbol{\xi}_y(t), \quad \mathbf{x}_y(0) = \mathbf{x}_{y0},$$

предназначенного для перехвата ВСЛА, движущегося по траектории (2.2), при наличии измерений (2.3) сформировать управление

$$(3.2) \quad \mathbf{u}(t) = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{B}_y^T [\mathbf{Q}(\hat{\mathbf{x}}_T(t) - \hat{\mathbf{x}}_y(t)) - \mathbf{G}\hat{\mathbf{s}}_y(t)],$$

оптимальное по минимуму функционала

$$(3.3) \quad I = M \left\{ [\mathbf{x}_T(t) - \mathbf{x}_y(t)]^T \mathbf{Q} [\mathbf{x}_T(t) - \mathbf{x}_y(t)] + \right. \\ \left. + 2[\mathbf{x}_T(t) - \mathbf{x}_y(t)]^T \mathbf{G} \mathbf{s}_y(t) + \mathbf{s}_y^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{s}_y(t) + \int_0^t \mathbf{u}^T(t) \mathbf{K} \mathbf{u}(t) dt \right\}.$$

Здесь:  $\mathbf{s}_y$  и  $\hat{\mathbf{s}}_y$  –  $n$ -мерные векторы измеряемых возмущений, воздействующих на перехватчик, и их оптимальных оценок;  $\mathbf{G}$  – неотрицательно определенная матрица, определяющая вес возмущений в законе управления (3.2). Анализ (3.1)–(3.3) в приложении к задаче синтеза метода наведения на ВСЛА [26] позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Используя коэффициенты матриц  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{G}$  в виде функций координат состояния (обычно дальности и скорости сближения), можно сформировать законы управления [4] с достаточно просто назначаемыми моментами изменения управляющих приоритетов как в процессе наведения на цель, так и в рамках траекторного управления наблюдением [4] и регулировки влияния возмущений на различных участках траектории перехвата.

2. Способ обладает высокой реализуемостью, обусловленной следующими особенностями:

- способностью оптимизировать систему наведения под конкретный вид носителя за счет формирования дополнительных корректирующих сигналов, компенсирующих его инерционность;
- способностью учитывать широкий спектр как естественных, так и виртуальных возмущений [3] в виде несоответствия динамических свойств цели и перехватчика, результатов прогноза пространственного положения цели, компенсирующего инерционность носителя, приближения координат состояния к допустимым границам потери устойчивости и т.д.;
- простотой формирования сигналов управления на каждый текущий момент времени, не требующей знания времени наведения и решения сложной двухточечной краевой задачи.

Возможность формирования оценок всех координат состояния, используемых в методе наведения, может быть определена только по результатам синтеза конкретных законов управления.

3. Способ обладает широкой универсальностью, характеризуемой способностью синтезировать методы наведения, устойчиво функционирующие в широком поле условий применения, в том числе и в условиях, не соответствующих моделям, положенным в основу синтеза [4].

4. Ввиду линейной зависимости (3.2) от ошибок управления способ не обеспечивает уверенного увода от границ потери устойчивости.

#### **4. Анализ возможностей вариантов локальной оптимизации по минимуму квадратично-биквадратных функционалов**

Анализ возможностей вариантов синтеза методов наведения с локальной оптимизацией по минимуму традиционных квадратичных функционалов [4] свидетельствует, что по-прежнему остаются проблемными задачи увода носителя от границ потери устойчивости и использования в законе управления производных угловой скорости линии визирования (УСЛВ), что существенно усложняет процедуру их информационного обеспечения.

Решение обеих задач может быть обеспечено использованием методов наведения с нелинейной (кубической) зависимостью от ошибок управления, сформированных в процессе локальной минимизации квадратично-биквадратных функционалов [3, 27].

В простейшем случае такой подход позволяет для перехватчика (2.1), предназначенного для наведения на цель, движущуюся по траектории (2.2) при наличии измерений (2.3), сформировать закон управления

$$(4.1) \quad \mathbf{u}(t) = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{B}_y^T \{ \mathbf{Q} + 2 [\Delta \hat{\mathbf{x}}(t) \Delta \hat{\mathbf{x}}(t)^T \mathbf{R}] \} \Delta \hat{\mathbf{x}}(t), \quad \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) = \hat{\mathbf{x}}_T(t) - \hat{\mathbf{x}}_y(t),$$

оптимальный по минимуму функционала

$$(4.2) \quad I = M \left\{ \Delta \mathbf{x}(t)^T \mathbf{Q} \Delta \mathbf{x}(t) + \mathbf{x}(t)^T [\Delta \mathbf{x}(t) \Delta \mathbf{x}(t)^T \mathbf{R}] \Delta \mathbf{x}(t) + \int_0^t \mathbf{u}^T(t) \mathbf{K} \mathbf{u}(t) dt \right\}.$$

Анализ (4.1) позволяет сделать следующие выводы.

1. Сигнал управления содержит два слагаемых: одно из них

$$(4.3) \quad \mathbf{K}^{-1} \mathbf{B}_y^T \mathbf{Q} \Delta \hat{\mathbf{x}}(t)$$

– определяет его линейную составляющую, а второе

$$(4.4) \quad 2\mathbf{K}^{-1} \mathbf{B}_y^T [\Delta \hat{\mathbf{x}}(t) \Delta \hat{\mathbf{x}}(t)^T \mathbf{R}] \Delta \hat{\mathbf{x}}(t)$$

– кубическую составляющую. При этом в (4.4) наряду со слагаемыми, пропорциональными  $\Delta x_i^3$  ( $i = \overline{1, n}$ ) содержатся и комбинированные составляющие  $\Delta x_i^2 \Delta x_j$  и  $\Delta x_i \Delta x_j^2$  ( $i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}, i \neq j$ ).

2. Соотношения между (4.3) и (4.4) зависят не только от коэффициентов матриц  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{R}$ , но и от соотношения ошибок управления  $\Delta x_i$  и  $\Delta x_j$ .

При малых ошибках  $\Delta x_i \rightarrow 0$  кубическая составляющая практически не влияет на сигнал управления и точность наведения, обеспечивая высокую чувствительность (4.1) к малым ошибкам.

При больших  $\Delta x_i$  превалирующей становится кубическая составляющая, обеспечивая ускоренную обработку опасных ошибок управления.

При этом в синтезированных законах [4, 27] не требуется знание оценок производных УСЛВ, роль которых в определенной степени играют слагаемые  $\Delta x_i^2 \Delta x_j$  и  $\Delta x_i \Delta x_j^2$ .

3. Манипулируя конкретным составом коэффициентов в матрицах  $[\Delta \mathbf{x}(t) \Delta \mathbf{x}(t)^T]$  и  $\mathbf{R}$ , можно получить различные варианты законов управления с разным составом комбинационных составляющих.

4. Использование варианта локальной оптимизации по функционалу (4.2) позволяет сохранить все ее преимущества, рассмотренные в разделе 3.

Проведенный анализ [3–9] показал, что по возможностям удовлетворения совокупности перечисленных в [26] требований более предпочтительным является использование математического аппарата локального варианта статистической теории оптимального управления с минимизацией квадратично-биквадратных функционалов, позволяющего реализовать широкий спектр законов управления, совместно наилучших по точности и экономичности.

## 5. Обратные задачи динамики

Существует целый класс задач управления, когда процесс синтеза не может быть сведен к минимизации некоторого строго заданного функционала. В частности, это возникает тогда, когда задача управления имеет естественный глобальный критерий качества, правильно и полно отражающий содержание задачи. Здесь цель управления часто заключается в поддержании определенных соотношений между отдельными компонентами вектора состояния объектов. Эти соотношения обычно описывают условия нормального функционирования объекта управления либо характер переходного процесса.

В последнее время для решения таких задач наиболее часто стали применяться методы синтеза управления на основе концепции обратных задач динамики [13, 14]. Одной из первых работ, послужившей основой для развития метода обратных задач динамики, является задача о реализации некоторой назначенной в виде модели траектории движения управляемой системы [15]. Известен ряд различных приемов и методов решения задач, связанных с определением управления на основе этого метода [16–18]. В [18] показано, что

структурные свойства алгоритмов управления для линейных систем полностью идентичны алгоритмам, синтезированным по классической теории аналитического конструирования с квадратичными функционалами качества.

Рассмотрим основные положения метода обратных задач динамики (ОЗД) с целью определения соответствия требованиям [26], предъявляемым к методам синтеза управления в задачах наведения.

Пусть дана управляемая и наблюдаемая динамическая система, математическая модель которой представляется дифференциальным оператором

$$(5.1) \quad \dot{\mathbf{x}}_y(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_y(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{a}(t), \mathbf{s}_y(t), t),$$

где  $\mathbf{x}_y(t) = [x_{y1}(t), \dots, x_{yn}(t)]^T$  –  $n$ -мерный вектор состояния системы;

$\mathbf{a}(t) = [a_1(t), \dots, a_p(t)]^T$  –  $p$ -мерный вектор параметров;

$\mathbf{u}(t) = [u_1(t), \dots, u_r(t)]^T$  –  $r$ -мерный вектор управляющих функций;

$\mathbf{s}_y(t) = [s_{y1}(t), \dots, s_{yn}(t)]^T$  –  $n$ -мерный вектор контролируемых внешних возмущающих воздействий, являющихся заданной функцией времени, принадлежащей пространству  $L_2$ ;

вектор-функция  $\mathbf{f}(\mathbf{x}_y(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{a}(t), \mathbf{s}_y(t), t)$  предполагается непрерывной и дифференцируемой по совокупности переменных  $\mathbf{x}_y, \mathbf{u}, \mathbf{a}, \mathbf{s}_y$ .

Требуется найти такое управление  $\mathbf{u}(t)$ , которое обеспечивает экстремальное значение функционалу качества вида

$$(5.2) \quad I = \int_{t_0}^t L(\mathbf{x}_y(t), \mathbf{x}_T(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{s}_y(t), t) dt,$$

в котором  $L(\mathbf{x}_y(t), \mathbf{x}_T(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{s}_y(t), t)$  – скалярная неотрицательная функция. Время  $t$  окончания управления может быть заданным или быть свободным. На соотношение координат  $\mathbf{x}_y(t), \mathbf{x}_T(t)$  накладываются ограничения в виде некоторой гиперповерхности [16]

$$(5.3) \quad \mathbf{C}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T) = 0.$$

Если под действием возмущений или при ненулевых начальных условиях соотношение (5.3) не выполняется, то управляемый объект в силу наличия его инерционности будет стремиться к этой гиперповерхности согласно выражению

$$(5.4) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{C}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T) = 0.$$

В выражениях (5.3) и (5.4) функция  $\mathbf{C}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T)$  –  $r$ -мерная векторная функция, непрерывно дифференцируемая по своим аргументам, а символ  $\infty$  означает время завершения переходных процессов объекта управления.

В общем случае можно считать, что закон стремления к нулю функции  $\mathbf{C}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T)$  в (5.4) удовлетворяет решению уравнения

$$(5.5) \quad \begin{aligned} \psi_1 \left[ \lambda_i, \dot{\mathbf{C}}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T), \ddot{\mathbf{C}}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T), \dots, \mathbf{C}^{(k)}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T) \right] = \\ = \psi_2 \left[ \beta, \dot{\mathbf{C}}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T) \right], \quad i = \overline{1, k}, \end{aligned}$$

где  $\lambda_i, \beta$  – произвольные постоянные числа, обеспечивающие устойчивость решения (5.5);  $i$  – номер постоянного коэффициента, учитывающего вес  $k$ -й производной ограничения (5.3) или (5.4);  $\psi_1[\bullet]$  и  $\psi_2[\bullet]$  –  $r$ -мерные в общем случае нелинейные векторные функции, однако во многих технических приложениях функции  $\psi_1[\bullet]$  и  $\psi_2[\bullet]$  в уравнении (5.5) можно описать следующими соотношениями:

$$(5.6) \quad \begin{aligned} \psi_1[\bullet] &= \mathbf{C}^{(k)}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T) + \lambda_{k-1} \mathbf{C}^{(k-1)}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T) + \dots + \lambda_1 \dot{\mathbf{C}}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T); \\ \psi_2[\bullet] &= \beta_0 \mathbf{C}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T) \quad \text{либо} \quad \psi_2[\bullet] = \beta_0 \mathbf{C}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T) + \beta_2 \mathbf{C}^3(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T). \end{aligned}$$

Координаты  $n$ -мерного вектора  $\mathbf{x}_T(t)$  по своей физической природе либо совпадают с вектором  $\mathbf{x}_y(t)$ , либо представляют некоторую комбинацию его компонент.

Управление  $\mathbf{u}(t)$  необходимо определить в виде функции координат состояния системы (5.1) и координат требуемой траектории. Если учесть, что задачу перехвата можно представить в виде совокупности двух движений в горизонтальной и вертикальной плоскостях, то применение метода синтеза управления рассмотрим на примере управления в одной плоскости под действием одного управляющего сигнала.

### *Скалярное управляющее воздействие*

Внешнее возмущающее воздействие  $\mathbf{s}_y(t)$  в (5.1) является заданной функцией времени, причем все его компоненты контролируемы.

Рассмотрим случай, когда система (5.1) может быть записана в виде системы линейных уравнений:

$$(5.7) \quad \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{s}_y(t),$$

где  $\mathbf{F} = \|f_{ij}\|$  – квадратная матрица размерности  $n \times n$  с известными элементами;  $\mathbf{B}$  – вектор-столбец, определяющий коэффициенты, с которыми управление входит в каждое уравнение системы; внешнее возмущающее воздействие  $\mathbf{s}_y(t)$  является заданной функцией времени, причем все его компоненты контролируемы;  $u(t)$  – скалярное управление.

Заметим, что число управляемых координат вектора  $\mathbf{x}(t)$  в установившемся режиме, а следовательно и размерность вектора  $\mathbf{C}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T)$ , определяется размерностью вектора управления. Тогда без ограничения общности можно считать, что система (5.7) эквивалентна скалярному дифференциальному

уравнению

$$(5.8) \quad \dot{x}_{y1}^{(n)}(t) + \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i x_{y1}^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^r b_j u^{(j)}(t) + \sum_{l=0}^n k_l s_{yl}(t),$$

где  $x_1(t)$  – выходная координата системы (5.7);  $k_l$  – весовой коэффициент возмущений  $s_{yl}$ .

Для определенности полагаем, что функция  $\mathbf{C}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T)$  имеет вид

$$(5.9) \quad \mathbf{C}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T) = x_{y1}(t) - x_{T1}(t).$$

Решение этой задачи будем определять из условия, что  $\mathbf{C}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T)$  стремится к нулю по некоторому закону

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{C}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T) = 0.$$

Причем закон изменения  $\mathbf{C}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T)$  может быть задан любым дифференциальным оператором, например (5.6):

$$(5.10) \quad \mathbf{C}^{(n)}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T) + \lambda_{n-1} \cdot \mathbf{C}^{(n-1)}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T) + \dots + \lambda_0 \cdot \mathbf{C}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T) = 0,$$

где  $\lambda_j$ ,  $j = 0, 1, \dots, n-1$  – любые положительные числа, обеспечивающие устойчивость системы (5.6).

Подставляя (5.8) в (5.10), получаем дифференциальное уравнение  $r$ -го порядка относительно  $u(t)$ :

$$(5.11) \quad b_r u^{(r)}(t) + b_{r-1} u^{(r-1)}(t) + \dots + b_0 u(t) = z(t),$$

$$\text{где } z(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i x_{y1}^{(i)}(t) - \sum_{j=0}^{n-1} \lambda_j (x_{y1} - x_{T1}) + x_{T1}^{(n)}(t) - \sum_{l=0}^n k_l s_{yl}(t).$$

Наибольший интерес представляет случай, когда в уравнении (5.7) компоненты вектора  $\mathbf{B}$ , за исключением последнего, равны нулю. Тогда управление, удовлетворяющее (5.11), определяется выражением

$$(5.12) \quad u(t) = b_0^{-1} \left[ - \sum_{j=0}^{n-1} \lambda_j x_{y1}^{(j)}(t) + \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i x_{y1}^{(i)}(t) + \sum_{j=0}^{n-1} \lambda_j x_{T1}^{(j)}(t) \right] - b_0^{-1} \left[ \sum_{l=0}^n k_l s_{yl}(t) - x_{T1}^{(n)}(t) \right].$$

Здесь принято, что  $\lambda_n = 1$ .

Рассмотрим более подробно особенности управляемого процесса в случае, если управление определяется уравнением (5.11) или (5.12). Пусть параметры системы (5.7)  $\alpha_j$ ,  $j = 0, 1, \dots, n-1$ , и  $b_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, r$ , известны точно, тогда уравнение управляемого процесса имеет вид

$$(5.13) \quad x_{y1}^{(n)}(t) + \sum_{j=0}^{n-1} \lambda_j x_{y1}^{(j)}(t) = \lambda_0 x_{y1}(t) + \sum_{j=0}^{n-1} \lambda_j x_{T1}^{(j)}(t),$$

или в матричной форме

$$(5.14) \quad \dot{\mathbf{x}}_y(t) = \mathbf{A}_\lambda \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_\lambda \mathbf{x}_T(t).$$

Из (5.13) и (5.14) следует, что вне зависимости от свойств исходной системы свойства управляемого процесса однозначно определяются коэффициентами  $\lambda_j$ . Это обусловлено тем, что  $\mathbf{A}_\lambda$  – матрица Фробениуса, последняя строка которой определяется коэффициентами  $\lambda_j$ ,  $j = 0, 1, \dots, n - 1$ .

Неизвестные коэффициенты  $\lambda_j$ ,  $j = 0, 1, \dots, n - 1$ , определяются из необходимых условий экстремума функционала (5.2).

В заключение отметим, что управление  $u(t)$ , синтезированное согласно предложенному методу, является функцией координат состояния  $\mathbf{x}_y$ ,  $\mathbf{x}_T$  и параметров  $\lambda_j$ ,  $j = 0, 1, \dots, n - 1$ . Кроме того, и для нелинейной системы математическая модель управляемого процесса также определяется уравнением вида (5.14), т.е. уравнением желаемого процесса.

Анализ условий применения изложенного метода синтеза управления в задачах перехвата целей типа ВСЛА показывает:

- во-первых, он позволяет оценить возможность формирования законов управления как для фиксированного, так и для текущего времени наведения;
- во-вторых, применение метода ОЗД позволят синтезировать как линейные, так и нелинейные законы за счет применения различных функций  $\psi_2[\bullet] = \beta_0 \mathbf{C}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T)$  – линейное управление,  $\psi_2[\bullet] = \beta_0 \mathbf{C}(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T) + \beta_2 \mathbf{C}^3(\mathbf{x}_y, \mathbf{x}_T)$ , – линейно-кубическое управление, что дает возможность реализовать увод от границ потери устойчивости;
- в-третьих, законы управления могут быть как стационарными, так и нестационарными, что определяется видом представления математических моделей (5.1)–(5.7) и видом маневрирования цели, проистекающими из вида законов управления (5.11) и (5.12);
- в-четвертых, вне зависимости от вида закона управления замкнутая система управления, как следует из системы (5.14), обладает требуемыми свойствами, поскольку она определяется линейным дифференциальным уравнением и обеспечивает достигаемые требования по устойчивости, перерегулированию и робастности по отношению к априорным ошибкам в пределах не более 30%.

Метод позволяет осуществить перехват цели за заданное фиксированное время в случае представления траектории перехвата в виде полета по прямой и дуге с известным радиусом.

Кроме того, законы управления, синтезированные по методу ОЗД, не требуют больших вычислительных ресурсов для их реализации в реальном масштабе времени.

## 6. Анализ возможностей оптимизации информационного обеспечения методов наведения

Информационное обеспечение, которое сводится к формированию оценок координат относительного и абсолютного движения цели и перехватчика, используемым в методах наведения, является необходимым условием их реализации [26]. Обзор методов наведения, выполненный в [2, 4, 27], свидетельствует, что для их реализации, в общем случае, в каждой плоскости управления должны формироваться оценки дальности, скорости сближения, бортового пеленга цели, угловой скорости линии визирования (УСЛВ) цели и ее производных.

Необходимые условия, определяющие возможность формирования этих оценок, определяются критерием наблюдаемости [2, 3] на основе взаимосвязей между исходными моделями состояния (2.1), (2.2) и (2.3). В приложении к линейным системам этот критерий определяется соотношением

$$(6.1) \quad \text{rank} \left[ \mathbf{H}^T \mid \mathbf{F}^T \mathbf{H}^T \mid (\mathbf{F}^T)^2 \mathbf{H}^T \mid \dots \mid (\mathbf{F}^T)^{N-1} \mathbf{H}^T \right] = N = 2n,$$

где  $\mathbf{F}$  – динамическая матрица обобщенного вектора состояния, используемого в (2.3).

Физический смысл (6.1) состоит в том, что при их выполнении на основе (2.1), (2.2) и (2.3) можно получить  $N$  независимых уравнений с  $N$  неизвестными, однозначно связывающих измерения с оценками.

В прикладном плане, наряду с выяснением самой возможности синтеза алгоритмов фильтрации, (6.1) позволяет определить набор измерителей, при котором будет обеспечиваться оценивание требуемого вектора состояния. Кроме того, из (6.1) следует, что для решения этой задачи должны как минимум измеряться нулевые производные вектора состояния [4]. В приложении к задаче синтеза методов наведения должны как минимум измеряться дальность и бортовой пеленг цели.

Следует отметить, что различные координаты состояния вносят различный вклад в ошибки наведения. Проведенные исследования [2, 28] показали, что ошибки оценивания угловых координат влияют на точность самонаведения, на порядок и более сильно, чем ошибки оценивания дальности и ее производных.

В зависимости от типа антенной системы возможны различные подходы к выбору процедуры оптимизации информационного обеспечения.

Первый основан на использовании алгоритмов адаптивной аналого-дискретной фильтрации.

Второй подход основан на использовании многоступенчатой фильтрации.

Третий подход базируется на трансформации входных сигналов, обеспечивающей оптимальность использования заданного привода антенны с механическим управлением.

Четвертый основан на использовании следящих систем с нелинейной зависимостью от ошибок сопровождения, обеспечивающей их оптимальность по минимуму локального квадратично-биквадратного функционала качества (см. раздел 4).

Теоретические основы, лежащие в основе этих подходов, конкретные алгоритмы оценивания и результаты исследования их эффективности подробно рассмотрены в [3, 4, 28].

Использование аналого-дискретной фильтрации обусловлено тремя причинами:

- необходимостью непрерывного формирования сигнала траекторного управления перехватчиком;
- дискретным и разновременным поступлением в алгоритм оценивания измерений, формируемых датчиками различной физической природы (например, РЛС и системы воздушных сигналов);
- невозможностью использования моделей состояния, адекватно отражающих сложные пространственные маневры ВСЛА, что предопределяет расходимость традиционных фильтров Калмана и необходимость использования различных вариантов адаптации.

Суть аналого-дискретной фильтрации состоит в том, что экстраполяция осуществляется с малым шагом  $\tau$ , приближаясь по своей точности к аналоговому прогнозу и обеспечивая непрерывный режим формирования сигнала управления носителем, а коррекция осуществляется с достаточно большим интервалом  $T \gg \tau$  в моменты поступления измерений.

В общем случае алгоритмы адаптивной аналого-дискретной фильтрации позволяют для процессов [3]

$$(6.2) \quad \mathbf{x}(k) = \Phi(k, k-1)\mathbf{x}(k-1) + \xi_x(k-1)$$

при наличии наблюдений

$$(6.3) \quad \mathbf{z}(k) = \mathbf{Q}_z [\mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \xi_z(k)],$$

$$\mathbf{Q}_z(k) = \begin{cases} \mathbf{E} & \text{при } k = nT/\tau, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \\ 0 & \text{при } k \neq nT/\tau \end{cases}$$

сформировать оценки

$$(6.4) \quad \hat{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{x}_3(k) + \mathbf{K}_{\text{фа}}(k)\Delta\mathbf{z}(k), \quad \hat{\mathbf{x}}(0) = \mathbf{x}_0,$$

$$(6.5) \quad \Delta\mathbf{z}(k) = \mathbf{z}(k) - \mathbf{Q}_z(k)\mathbf{H}(k)\mathbf{x}_3(k),$$

$$(6.6) \quad \mathbf{x}_3(k) = \Phi(k, k-1)\hat{\mathbf{x}}(k-1) + \mathbf{u}_k(k),$$

$$(6.7) \quad \mathbf{u}_k(k) = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{f}_n(\Delta\mathbf{z}(k)) \text{ при } k = nT/\tau, \text{ если используется} \\ \text{адаптивная коррекция результатов прогноза,} \\ 0 \text{ при } k \neq nT/\tau, \end{array} \right. \\ 0, \text{ если коррекция результатов прогноза не используется,} \end{cases}$$

$$(6.8) \quad \mathbf{K}_{\text{фа}}(k) = \mathbf{Q}_y(k)\mathbf{D}(k)\mathbf{H}^T(k)\mathbf{D}_z^{-1}(k),$$

$$(6.9) \quad \mathbf{Q}_y(k) = \begin{cases} \begin{cases} \mathbf{f}_y(\Delta\mathbf{z}(k)) & \text{при } k = nT/\tau, \text{ если используется адаптивная} \\ & \text{коррекция коэффициентов усиления невязки,} \\ \mathbf{E} & \text{при } k \neq nT/\tau, \end{cases} \\ \mathbf{E}, & \text{если коррекция коэффициентов усиления невязки не} \\ & \text{используется,} \end{cases}$$

$$(6.10) \quad \mathbf{D}(k) = \begin{cases} [\mathbf{E} - \mathbf{K}_{\text{фа}}(k)\mathbf{H}(k)]\mathbf{D}_s(k) & \text{при } k = nT/\tau, \\ \mathbf{D}_s(k) & \text{при } k \neq nT/\tau, \end{cases} \quad \mathbf{D}(0) = \mathbf{D}_0.$$

$$(6.11) \quad \mathbf{D}_s(k) = \mathbf{\Phi}(k, k-1)\mathbf{D}(k-1)\mathbf{\Phi}^T(k, k-1) + \mathbf{D}_x(k-1).$$

Здесь:  $\mathbf{\Phi}$  – матрица внутренних связей (6.2);  $\mathbf{Q}_z(k)$  – матрица признаков прихода измерений;  $\mathbf{D}_x$  – матрица дисперсий шумов  $\xi_x$  состояний (6.2);  $\mathbf{D}_z$  – матрица дисперсий шумов  $\xi_z$  измерений (6.3);  $\mathbf{D}$  – матрица ошибок оценивания;  $\mathbf{u}_k$  – поправка прогноза, величина которого определяется по результатам анализа невязки  $\mathbf{f}_n(\Delta\mathbf{z}(k))$ ;  $\mathbf{Q}_y$  – матрица весовых множителей, используемых при автоматической коррекции коэффициента усиления невязки по результатам  $\mathbf{f}_y(\Delta\mathbf{z}(k))$  ее анализа;  $\mathbf{E}$  – единичная матрица.

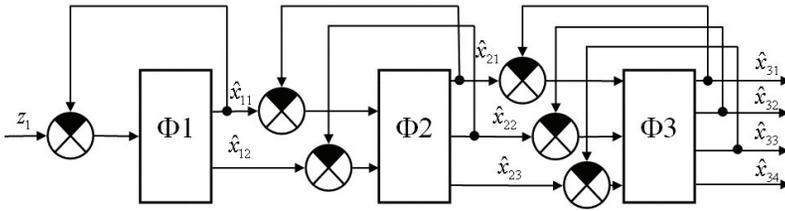
Отличие (6.3)–(6.11) от типового алгоритма Калмана заключается в двух особенностях. Первая состоит в том, что экстраполяция состояния (6.6) и вычисление ковариационной матрицы ошибок прогноза (6.11) выполняются с малым интервалом  $\tau$ , а измерение (6.3) и коррекция оценок  $\hat{\mathbf{x}}$  (6.4) – с большим интервалом  $T \gg \tau$ . Причем вторая особенность предопределяет возможность использовать самые разнообразные приемы адаптации и одновременно поступающие измерения.

В (6.2)–(6.11) приведены два наиболее эффективных способа предотвращения расходимости алгоритма фильтрации (6.3), (6.4) при интенсивном маневрировании ВСЛА. Один из них основан на формировании адаптивной поправки (6.7) прогноза, другой – на коррекции (6.9) коэффициента (6.8) усиления невязки. Предпочтительность выбора того или иного способа адаптации зависит от размерности модели движения цели и состава измерителей.

Процедуры расчета поправок (6.7) и (6.9), в том числе и при использовании одновременно приходящих измерений, подробно рассмотрены в [3].

Следует отметить, что в промежутках между приходом измерений (6.3) сигнал управления перехватчиком формируется по результатам прогноза (6.6) при  $\mathbf{u}_k = 0$ . За это время накапливается ошибка прогноза, обусловленная несоответствием реального полета ВСЛА используемой модели (6.2). С приходом измерений (6.3) от какого-либо из датчиков в моменты времени, соответствующие  $n = 1, 2, 3, \dots$ , выполняются две операции.

В соответствии с первой по правилам, изложенным в [3, 28], вычисляются адаптивные поправки (6.7) прогноза (6.6) с изменением величины невязки (6.5) либо поправки (6.9), изменяющей ее вес.



Функциональная схема трехступенчатого фильтра четвертого порядка.

В рамках второй операции осуществляется формирование оценки по правилу (6.4) с учетом выбранного способа адаптации. При этом реальная точность оценивания по сравнению с потенциальной, определяемой (6.10), (6.11), несколько ухудшается, однако обеспечивается устойчивость оценивания при выполнении ВСЛА сложных маневров.

Наряду с адаптивной коррекцией прогноза (6.7) или коррекцией коэффициентов усиления невязки (6.9), рассмотренных в [4], весьма эффективным является способ фильтрации с идентификацией параметров  $\Phi(k, k - 1)$  (6.2) исходной модели состояния. Необходимо, однако, подчеркнуть, что обеспечивая эффективную адаптацию модели к условиям применения, этот способ требует существенно больших вычислительных затрат [28].

Оценивание дальности, скорости сближения и ее производных по результатам независимых измерений дальности (времени запаздывания отраженных сигналов) и скорости (доплеровской частоты) не представляет особых трудностей. В то же время оценивание бортовых пеленгов, УСЛВ и ее производных по измерениям лишь углов является достаточно сложной задачей.

Одним из наиболее простых способов ее решения является использование многоступенчатой фильтрации [4]. Поставленная задача достигается тем, что измерения подаются на вход многоступенчатого фильтра, представляющего собой набор последовательно соединенных фильтров нарастающей размерности ( $n \geq 2$ ), каждый из которых формирует оценки, используемые в следующем фильтре в качестве измерений, что определяет возрастание в них числа обратных связей и соответственно повышение устойчивости и точности оцениваемых производных.

Принципы функционирования предложенного способа поясняются на примере трехступенчатого фильтра четвертого порядка при условии, что используется один измеритель. Его функциональная схема приведена на рисунке, где  $\Phi 1$  – первая ступень многоступенчатого фильтра, формирующая по измерению  $z_1$  оценки  $\hat{x}_{11}, \hat{x}_{12}$  и передающая их на вторую ступень в качестве измерений;  $\Phi 2$  – вторая ступень многоступенчатого фильтра, формирующая оценки  $\hat{x}_{21}, \hat{x}_{22}, \hat{x}_{23}$  и передающая их на третью ступень в качестве измерений;  $\Phi 3$  – третья ступень многоступенчатого фильтра, формирующая оценки  $\hat{x}_{31}, \hat{x}_{32}, \hat{x}_{33}, \hat{x}_{34}$  и передающая их потребителю.

Эффективность предложенного способа многоступенчатой фильтрации была проверена в [4] на примере устойчивого формирования оценок угла и его производных вплоть до четвертого порядка при наличии одного измерителя.

## 7. Заключение

Материал, рассмотренный в статье, позволяет сделать следующие выводы.

На основе требований к способам оптимизации методов наведения на ВСЛА [26], включая необходимость формирования нестационарных законов управления в заданной области условий применения в рамках действующих ограничений и выполнения условий реализуемости и на основе предварительных исследований была проведена оценка возможностей различных способов оптимизации по синтезу законов управления перехватчиком.

В частности была проведена оценка возможностей:

- классической теории оптимального управления в постановке Летова–Калмана;
- вариантов локальной оптимизации, в том числе и с учетом реальных и виртуальных возмущений;
- локальной оптимизации по квадратично-биквадратным функционалам качества;
- концепции обратных задач динамики;
- вариантов информационного обеспечения синтезируемых методов наведения.

Сравнительный анализ показал, что по совокупности требований наилучшими возможностями обладают метод локальной оптимизации по минимуму квадратично-биквадратных функционалов качества и метод на основе концепции обратных задач динамики.

В последующих статьях будет проведена оценка возможностей градиентного способа оптимизации и вариантов так называемого интеллектуального управления.

Кроме того, будут рассмотрены примеры синтеза конкретных методов наведения, проведенного в рамках наиболее приемлемых способов оптимизации.

В заключение необходимо отметить, что при использовании нескольких вариантов оптимизации возникает задача квалифицированного выбора наилучшего результата. В простейшем случае этот выбор осуществляется по результатам сравнения показателей эффективности и живучести. Более обоснованный выбор можно осуществить, используя так называемую форсайт-концепцию [29], которая позволяет автоматизировать задачу выбора альтернативы по существенному числу разнородных тактических, экономических и технологических признаков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Верба В.С., Меркулов В.И., Капустян С.Г., Харьков В.П.* Оптимизация радиоэлектронных систем управления. Методы и алгоритмы синтеза оптимального управления. Части 1–3 // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. № 2; 2013. № 3; 2013. № 11.

2. Авиационные системы радиуправления. Учебник для военных и гражданских ВУЗов / Под ред. В.И. Меркулова. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 422 с.
3. Меркулов В.И., Верба В.С. Синтез и анализ авиационных радиоэлектронных систем управления. Книга 1. М.: Радиотехника, 2023. 404 с.
4. Меркулов В.И., Верба В.С. Синтез и анализ авиационных радиоэлектронных систем управления. Книга 2. М.: Радиотехника, 2023. 364 с.
5. Ройтенберг Я.Н. Автоматическое управление. М.: Наука, 1992.
6. Сейдж Э.П., Уайт Ч.С., III. Оптимальное управление системами. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1982. 392 с.
7. Черноушко Ф.А., Колмановский В.Б. Оптимальное управление при случайных возмущениях. М.: Наука, 1978.
8. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. М.: Высшая школа, 1998. 574 с.
9. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. М.: Наука, 1973. 560 с.
10. Galyaev A.A., Lysenko P.V., Rubinovitch E.Y. Optimal Stochastic Control in the Interception Problem of a Randomly Tacking Vehicle // Mathematics. 2021. No. 9. P. 2386.
11. An Ji-Yeon. A Collision Geometry-Based Guidance Law for Course-Correction-Projectile / Ji-Yeon An, Chang-Hun Lee, Min-Jea Tahk // Int. J. Aeronaut. Spac. Sci. 2019. V. 20. No. 2. P. 442–458.
12. Su Wenshan. Coverage-based cooperative guidance strategy against highly maneuvering target / Wenshan Su, Kebo Li, Lei Chen // Aerospace Science and Technology. 2017. V. 71. P. 147–155.
13. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Линейные модели. М.: Наука, 1987.
14. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. М.: Наука, 1988.
15. Петров Б.Н., Крутько П.Д., Попов Е.П. Построение алгоритмов управления как обратная задача динамики // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247. № 5. С. 1078–1081.
16. Харьков В.П. Структурно-параметрический синтез управления динамическими системами // Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика. 1991. № 2.
17. Харьков В.П. Адаптивное управление динамическими системами на основе обратных задач динамики // Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика. 1994. № 4.
18. Меркулов В.И., Харьков В.П. Синтез закона управления системы перехвата высокоскоростных высокоманевренных целей // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 10. С. 3–8.
19. Угломерные двухпозиционные пассивные системы радиомониторинга воздушного базирования / Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2022. 232 с.
20. Меркулов В.И., Верба В.С., Ильчук А.Р. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Том 1. / Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2018. 360 с.

21. An Improved Kalman Filter Based on Long Short-Memory Recurrent Neural Network for Nonlinear Radar Target Tracking / F. Song, Y. Li, W. Cheng et al. // *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2022. No. 7. P. 1–10.
22. *Prokhorov, M.B.* The Kalman-Bucy method of optimal filtering and its generalizations / M.B. Prokhorov, V.K. Saul'ev // *Journal of Soviet Mathematics*. 1979. V. 12. No. 3. P. 354–380.
23. *Кузовков Н.Т., Карабанов С.В., Салычев О.С.* Непрерывные и дискретные системы управления и методы идентификации. М.: Машиностроение, 1978. 222 с.
24. *Федунов Б.Е.* Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня для антропоцентрических объектов. М.: ДеЛибри, 2018. 246 с.
25. *Васильев В.И., Ильясов Б.Г.* Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие. М.: Радиотехника, 2009. 392 с.
26. *Верба В.С., Меркулов В.И.* Подходы к оптимизации методов наведения на высокоскоростные интенсивно маневрирующие цели. Часть 1 // *АиТ*. 2024. № 11. С. 73–80.
27. *Меркулов В.И.* Нестационарные методы самонаведения // *Вестник ВКО*. 2020. № 1. С. 25–39.
28. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Том 2 / Под ред. *В.С. Вербы*. М.: Радиотехника, 2018. 486 с.
29. *Анцев Г.В., Гаенко В.П., Сарычев В.А.* Форсайт как методология концептуального предисследовательского прогнозирования и оценки направлений (вариантов) развития технически сложных объектов // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2022. Т. 76. № 11. С. 25–39.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Галяевым.*

Поступила в редакцию 20.03.2024

После доработки 08.07.2024

Принята к публикации 02.09.2024