

Управление в технических системах

© 2026 г. В.С. ВЕРБА, чл.-корр. РАН (vvs.msk@gmail.com),
В.И. МЕРКУЛОВ, д-р техн. наук (ilya-zagrebnyi@mail.ru)
(АО Концерн «Вега», Москва),
Д.В. ЗАКОМОЛДИН, д-р техн. наук (denjuga68@yandex.ru)
(Военная академия воздушно-космической обороны
им. Маршала Советского Союза Г.К. Жукова, Тверь)

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕХВАТА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО МАНЕВРЕННОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ИНЕРЦИОННЫМ ПЕРЕХВАТЧИКОМ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ЗАКОНЕ УПРАВЛЕНИЯ

Представлены результаты синтеза нестационарного закона управления перехватчиком при его наведении на высокоманевренную воздушную цель, учитывающего несоответствие динамических свойств перехватчика и цели. Приведены результаты моделирования, свидетельствующие о потенциальной возможности перехвата воздушной цели и повышении точности наведения.

Ключевые слова: закон управления перехватчиком, маневрирующая воздушная цель, несоответствие динамических свойств, промах.

DOI: 10.7868/S2413977726060036

1. Введение

Необходимость эффективного решения задачи перехвата средств воздушно-космического нападения (СВКН) определяется требованием защиты важных объектов обороняющейся стороны от их потенциального уничтожения.

С учетом тенденции постоянного совершенствования СВКН в направлении увеличения их скоростных и маневренных характеристик [1–7] инерционность средств перехвата может оказать существенную роль в снижении их потенциально возможной эффективности при решении задачи наведения на высокоманевренные высокоскоростные летательные аппараты (ВСЛА) [8].

В [8] рассмотрено два возможных варианта учета инерционности перехватчика. Первый подход основан на формировании сигнала управления не по текущим, а по прогнозным значениям координат состояния ВСЛА. Второй подход базируется на трансформации входных воздействий, что позволяет за счет использования в сигнале управления корректирующих поправок, учитывающих высокие производные координат состояния, скомпенсировать инерционность перехватчика. Однако предложенные подходы предопределяют усложнение системы информационного обеспечения за счет необходимости оценивания высоких производных угловой скорости линии визирования [8].

Вышеизложенное определяет необходимость поиска альтернативных вариантов синтеза сигналов управления перехватчиком при решении задачи наведения на ВСЛА. При этом предпочтительно, чтобы данный сигнал управления перехватчиком удовлетворял следующим требованиям [9]:

- учитывал несоответствия динамических свойств перехватчика и ВСЛА;
- был нестационарным, обеспечивая возможность перераспределения приоритетов управления от устранения ошибок наведения по углу на начальном этапе наведения к устранению ошибок по угловой скорости линии визирования по мере приближения к ВСЛА.

Цель статьи – синтез нестационарного сигнала управления инерционным перехватчиком, обеспечивающего потенциальную возможность перехвата ВСЛА.

2. Постановка задачи и синтез сигнала управления

Синтез выполнен на основе локального варианта оптимизации статистической теории оптимального управления. Этот аппарат позволяет в рамках решения линейно-квадратично-гауссовской задачи для системы с заданной частью [9]

$$(1) \quad \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \xi(t),$$

в состав которой входит подсистема (воздушная цель)

$$(2) \quad \dot{\mathbf{x}}_T(t) = \mathbf{F}_T(t)\mathbf{x}_T(t) + \xi_T(t),$$

формирующая входные воздействия для подсистемы (перехватчика)

$$(3) \quad \dot{\mathbf{x}}_y(t) = \mathbf{F}_y\mathbf{x}_y(t) + \mathbf{B}_y\mathbf{u}(t) + \xi_y(t),$$

при наличии измерений

$$(4) \quad \mathbf{z}(t) = \mathbf{H}\mathbf{x}(t) + \xi_z(t),$$

найти управление

$$(5) \quad \mathbf{u}(t) = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{B}_y^T [\mathbf{Q}\Delta\hat{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{G}\hat{\mathbf{s}}_y(t)],$$

оптимальное по минимуму функционала

$$(6) \quad I = M \left\{ (\mathbf{x}_T(t) - \mathbf{x}_y(t))^T \mathbf{Q} (\mathbf{x}_T(t) - \mathbf{x}_y(t)) + 2(\mathbf{x}_T(t) - \mathbf{x}_y(t))^T \mathbf{G} \mathbf{s}_y(t) + \mathbf{s}_y^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{s}_y(t) + \int_0^t \mathbf{u}^T(t) \mathbf{K} \mathbf{u}(t) dt \right\},$$

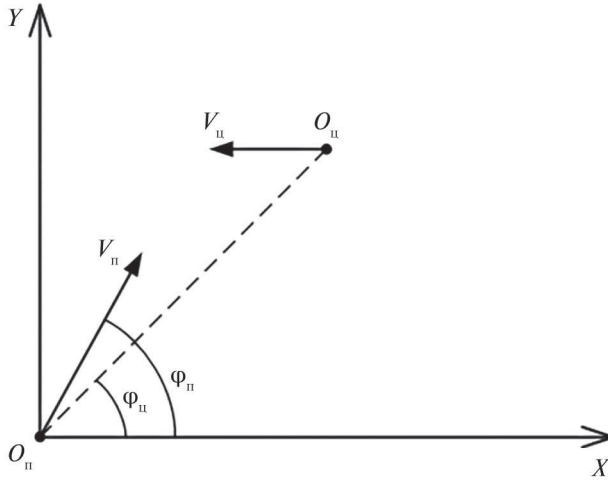


Рис. 1. Геометрия взаимного расположения перехватчика и цели.

где

$$(7) \quad \mathbf{x} = [\mathbf{x}_T^T \quad \mathbf{x}_y^T]^T, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_T & \mathbf{O}_1 \\ \mathbf{O}_2 & \mathbf{F}_y \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = [\mathbf{O}_3 \mathbf{B}_y], \quad \mathbf{s}_y = (\mathbf{F}_T - \mathbf{F}_y) \mathbf{x}_T, \\ \xi = [\xi_T^T \quad \xi_y^T]^T, \quad \Delta \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}}_T - \hat{\mathbf{x}}_y,$$

\mathbf{x}_y и \mathbf{x}_T – n -мерные векторы состояния; \mathbf{F}_y и \mathbf{F}_T – матрицы внутренних связей процессов (2) и (3), характеризующие их динамичность; \mathbf{u} – вектор управления; \mathbf{B}_y – матрица эффективности сигналов управления; \mathbf{z} – вектор измерений; ξ – вектор шумов; ξ_T , ξ_y и ξ_z – векторы шумов состояния (2), (3) и измерений (4); \mathbf{H} – матрица связи \mathbf{z} и \mathbf{x} ; \mathbf{Q} и \mathbf{K} – матрицы штрафов за точность и экономичность функционирования; \mathbf{G} – матрица взаимных связей $\Delta \mathbf{x}$ и \mathbf{s}_y ; \mathbf{s}_y – вектор, характеризующий несоответствие динамических свойств систем (процессов); t – текущее время; \mathbf{O}_1 – \mathbf{O}_3 – нулевые матрицы соответствующих размеров; $M\{\bullet\}$ – знак математического ожидания.

Для сокращения математических выкладок далее в представлениях (1)–(7) опущена зависимость от времени.

Геометрия взаимного расположения перехватчика и цели приведена на рис. 1, где представлено: O_{Π} и $O_{Ц}$ – положения перехватчика и цели; $\mathbf{V}_{Ц}$ и \mathbf{V}_{Π} – векторы скорости цели и перехватчика; φ_{Π} – угол визирования перехватчика (угол между вектором скорости перехватчика и горизонтальной осью); $\varphi_{Ц}$ – угол визирования ВСЛА (угол между линией визирования системы «перехватчик–цель» и горизонтальной осью).

Задача синтеза требуемого управления формулируется следующим образом.

Пусть ВСЛА как цель определяется системой уравнений вида:

$$(8) \quad \begin{aligned} \dot{\varphi}_{\Pi} &= \omega_{\Pi}, & \varphi_{\Pi}(0) &= \varphi_{\Pi 0}, \\ \dot{\omega}_{\Pi} &= -\frac{2\dot{D}}{D}\omega_{\Pi} + \frac{1}{D}(j_{\Pi} - \dot{j}_{\Pi}) + \xi_{\Pi}, & \omega_{\Pi}(0) &= \omega_{\Pi 0}. \end{aligned}$$

Необходимо для инерционного перехватчика, соответствующего модели:

$$(9) \quad \begin{aligned} \dot{\varphi}_{\Pi} &= \omega_{\Pi}, & \varphi_{\Pi}(0) &= \varphi_{\Pi 0}, \\ \dot{\omega}_{\Pi} &= -\frac{1}{T_{\Pi}}\omega_{\Pi} + \frac{b}{T_{\Pi}}j_{\Pi} + \xi_{\Pi}, & \omega_{\Pi}(0) &= \omega_{\Pi 0}, \end{aligned}$$

при наличии измерений

$$(10) \quad \varphi_z = \varphi_{\Pi} + \xi_z$$

найти сигнал управления j_{Π} , минимизирующий функционал

$$(11) \quad \begin{aligned} I = M \left\{ \begin{aligned} & \begin{bmatrix} \varphi_{\Pi} - \varphi_{\Pi} \\ \omega_{\Pi} - \omega_{\Pi} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{q_{11}}{D} & q_{12} \\ q_{21} & \frac{q_{22}}{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{\Pi} - \varphi_{\Pi} \\ \omega_{\Pi} - \omega_{\Pi} \end{bmatrix} + \\ & + 2 \begin{bmatrix} \varphi_{\Pi} - \varphi_{\Pi} \\ \omega_{\Pi} - \omega_{\Pi} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \left[\begin{pmatrix} 0 \\ \left(\frac{1}{T_{\Pi}} - \frac{2\dot{D}}{D} \right) \omega_{\Pi} \end{pmatrix} \right] + \\ & + \left[\begin{pmatrix} 0 \\ \left(\frac{1}{T_{\Pi}} - \frac{2\dot{D}}{D} \right) \omega_{\Pi} \end{pmatrix} \right]^T \begin{bmatrix} \frac{q_{11}}{D} & q_{12} \\ q_{21} & \frac{q_{22}}{D} \end{bmatrix} \left[\begin{pmatrix} 0 \\ \left(\frac{1}{T_{\Pi}} - \frac{2\dot{D}}{D} \right) \omega_{\Pi} \end{pmatrix} + \int_0^t j_{\Pi}^2 k_j dt \right] \end{aligned} \right\}. \end{aligned}$$

В (8)–(11) принято: φ_{Π} и φ_{Π} – соответственно углы визирования ВСЛА и перехватчика в системе координат, связанной с центром массы перехватчика; ω_{Π} и ω_{Π} – соответственно скорости изменения углов визирования; $\varphi_{\Pi 0}$, $\varphi_{\Pi 0}$ и $\omega_{\Pi 0}$, $\omega_{\Pi 0}$ – соответственно начальные значения углов визирования и их скоростей; b и T_{Π} – коэффициент передачи и постоянная времени перехватчика; j_{Π} и \dot{j}_{Π} – соответственно поперечные ускорения ВСЛА и перехватчика; D и \dot{D} – соответственно дальность от перехватчика до ВСЛА и скорость ее изменения; ξ_{Π} и ξ_{Π} – центрированные гауссовские возмущения траекторий ВСЛА и перехватчика; $\frac{q_{11}}{D}$, q_{12} , q_{21} , $\frac{q_{22}}{D}$ – неотрицательные элементы матрицы \mathbf{Q} ; g_{11} , g_{12} , g_{21} , g_{22} – неотрицательные элементы матрицы \mathbf{G} . При этом следует отметить, что на практике нахождение элементов матриц \mathbf{Q} , \mathbf{G} и \mathbf{K} является наиболее сложной задачей, решение которой в большинстве своем базируется на эмпирических способах. Наиболее известный способ основан на принципе равнопрочности. Смысл этого способа состоит в том, что

произведения квадратов максимально допустимых ошибок на соответствующие коэффициенты штрафов полагаются одинаковыми для всех координат. Задаваясь максимально допустимыми ошибками (дисперсиями) и одним из коэффициентов штрафов, можно предварительно оценить значения коэффициентов штрафов по другим координатам. Далее полученные значения коэффициентов уточняются на основе моделирования.

Спецификой нестационарной модели цели (8) является ее высокая универсальность, обусловленная учетом влияния на угловые координаты дальности и скорости сближения и возможность, манипулируя законами изменения $\dot{J}_Ц$, реализовать маневры практически любой сложности.

Кинематические модели (8) и (9) наряду с тем, что являются достаточно простыми, позволяют описать геометрию взаимного расположения перехватчика и ВСЛА и скорость ее (геометрии) изменения с достаточной для решаемой задачи точностью [8].

Особенностью функционала (11) является то, что наряду с возможностью учета требований к точности и экономичности управления (первое и четвертое слагаемые функционала), он позволяет учесть требование к снижению взаимного влияния ошибок управления и несоответствия динамических свойств перехватчика и ВСЛА (второе слагаемое функционала), а также требование к компенсации несоответствия динамических свойств перехватчика и ВСЛА (третье слагаемое). Кроме того, в первом и третьем слагаемых функционала (11) содержатся нестационарные коэффициенты матрицы штрафов за точность управления $\frac{q_{11}}{\mathcal{D}}$, $\frac{q_{22}}{\mathcal{D}}$, введение которых позволяет получить нестационарный сигнал управления даже при использовании упрощенной стационарной модели перехватчика (9) [9].

Поскольку модели (8) и (9) линейные, шумы гауссовские, а функционал (11) квадратичный, то на основании теоремы разделения и статистической эквивалентности синтез сигналов управления будет выполняться на основе детерминированных моделей (8) и (9) при условии $\xi_Ц = 0$, $\xi_П = 0$, а координаты (8) и (9) заменены их оптимальными оценками.

Поставив в соответствие (8) с (2), (9) с (3), а (11) с (6) и (7), получим:

$$(12) \quad \begin{aligned} \mathbf{x}_T &= \begin{bmatrix} \hat{\varphi}_Ц \\ \hat{\omega}_Ц \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_y = \begin{bmatrix} \hat{\varphi}_П \\ \hat{\omega}_П \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_y = \begin{bmatrix} 0 \\ b \\ T_П \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \hat{J}_П, \\ \mathbf{Q} &= \begin{bmatrix} \frac{q_{11}}{\mathcal{D}} & q_{12} \\ q_{21} & \frac{q_{22}}{\mathcal{D}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_П} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{F}_T &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{2\hat{\mathcal{D}}}{\hat{\mathcal{D}}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{s}_y = \begin{bmatrix} 0 \\ \left(\frac{1}{T_П} - \frac{2\hat{\mathcal{D}}}{\hat{\mathcal{D}}} \right) \hat{\omega}_Ц \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = k_j. \end{aligned}$$

Анализ \mathbf{s}_y позволяет прийти к заключению, что на больших расстояниях ($\hat{\omega}_{\Pi} \rightarrow 0$) несоответствие динамических свойств ВСЛА и перехватчика практически не оказывает никакого влияния, в то время как на малых расстояниях, характеризуемых возрастающим значением $\hat{\omega}_{\Pi}$, значимость \mathbf{s}_y увеличивается.

Подставив (12) в (5), получим

$$j_{\Pi} = \frac{1}{k_j} \begin{bmatrix} 0 \\ b \\ T_{\Pi} \end{bmatrix}^T \left[\begin{bmatrix} \frac{q_{11}}{\hat{D}} & q_{12} \\ q_{21} & \frac{q_{22}}{\hat{D}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\varphi}_{\Pi} - \hat{\varphi}_{\Pi} \\ \hat{\omega}_{\Pi} - \hat{\omega}_{\Pi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \left(\frac{1}{T_{\Pi}} - \frac{2\hat{D}}{\hat{D}} \right) \hat{\omega}_{\Pi} \end{bmatrix} \right] =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & b \\ k_j T_{\Pi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{q_{11}}{\hat{D}} \Delta\hat{\varphi} + q_{12} \Delta\hat{\omega} - g_{12} \left(\frac{1}{T_{\Pi}} - \frac{2\hat{D}}{\hat{D}} \right) \hat{\omega}_{\Pi} \\ q_{21} \Delta\hat{\varphi} + \frac{q_{22}}{\hat{D}} \Delta\hat{\omega} - g_{22} \left(\frac{1}{T_{\Pi}} - \frac{2\hat{D}}{\hat{D}} \right) \hat{\omega}_{\Pi} \end{bmatrix},$$

тогда

$$(13) \quad j_{\Pi} = \frac{bq_{21}}{k_j T_{\Pi}} \Delta\hat{\varphi} + \frac{bq_{22}}{k_j T_{\Pi} \hat{D}} \Delta\hat{\omega} - \frac{bg_{22}}{k_j T_{\Pi}} \left(\frac{1}{T_{\Pi}} - \frac{2\hat{D}}{\hat{D}} \right) \hat{\omega}_{\Pi},$$

$$\Delta\hat{\varphi} = \hat{\varphi}_{\Pi} - \hat{\varphi}_{\Pi}; \quad \Delta\hat{\omega} = \hat{\omega}_{\Pi} - \hat{\omega}_{\Pi}.$$

Анализ (13) позволяет заключить следующее:

1. Сигнал управления (13) всевысотный. Всевысотность определяется использованием в качестве сигнала управления поперечного ускорения перехватчика, а не угла отклонения рулей, эффективность которых определяется различной плотностью воздуха на различных высотах.

2. Сигнал управления состоит из трех компонент, при этом первое слагаемое $\frac{bq_{21}}{k_j T_{\Pi}} \Delta\hat{\varphi}$ представляет собой разновидность прямого метода, сумма первого и второго слагаемых $\frac{bq_{21}}{k_j T_{\Pi}} \Delta\hat{\varphi} + \frac{bq_{22}}{k_j T_{\Pi} \hat{D}} \Delta\hat{\omega}$ — метода последовательных упреждений. На больших дальностях при $\hat{\omega}_{\Pi} \rightarrow 0$, $\frac{bq_{22}}{k_j T_{\Pi} \hat{D}} \rightarrow 0$ наибольшую значимость приобретает требование устранения ошибок по углу $\Delta\varphi$. На малых дальностях наряду с возрастанием влияния второго слагаемого ввиду возрастания $\frac{bq_{22}}{k_j T_{\Pi} \hat{D}}$ при уменьшении \hat{D} возрастает значимость третьего слагаемого по причине возрастающего значения $\hat{\omega}_{\Pi}$. Вышеизложенное определяет нестационарность полученного сигнала управления. Наличие в третьем слагаемом (13) множителя $\frac{1}{T_{\Pi}} - \frac{2\hat{D}}{\hat{D}}$, характеризующего несоответствие динамических свойств перехватчика и ВСЛА, определяет удовлетворение требованию учета в сигнале управления данного несоответствия, которое возрастает с уменьшением дальности, предопределяя возрастание влияния маневра

цели. Учет несоответствия динамических свойств перехватчика и ВСЛА в сигнале управления позволит данное несоответствие скомпенсировать за счет формирования должного управляющего воздействия.

3. Для формирования требуемого сигнала управления (13) необходимо оценивать дальность, скорость сближения, бортовой пеленг ВСЛА и угловую скорость линии визирования, что не накладывает ограничений на его практическую реализацию.

4. Вес ошибок в сигнале управления (13) определяется не абсолютными значениями коэффициентов штрафов, а их отношениями $\frac{q_{21}}{k_j}$; $\frac{q_{22}}{k_j}$; $\frac{q_{22}}{k_j}$.

3. Исследование эффективности сигнала управления

Целью исследований является проверка потенциальной возможности осуществлять перехват ВСЛА, совершающего сложный маневр со сменой знака производной угловой скорости, используя инерционный перехватчик, управляемый по закону (13).

Исследования проводились при перехвате ВСЛА на встречно-пересекающихся курсах при условии, что скорость цели превышает скорость перехватчика, при наличии ограничения на величину сигнала управления и отсутствии ошибок оценивания, т.е. $\hat{D} = D$, $\hat{\dot{D}} = \dot{D}$, $\hat{\varphi}_Ц = \varphi_Ц$, $\hat{\varphi}_П = \varphi_П$, $\hat{\omega}_Ц = \omega_Ц$, $\hat{\omega}_П = \omega_П$. Данное допущение справедливо с учетом поставленной цели работы, состоящей в получении сигнала управления, обеспечивающего потенциальный (без учета шумов и возмущений) перехват. При реализации данного подхода по результатам моделирования могут быть получены предварительные оценки динамических ошибок системы наведения в виде величин текущих и конечных промахов. Оценка флуктуационных ошибок, когда шумы отличны от нуля, требует дополнительных исследований.

При этом для оценки возможности упрощения закона (13) при исследовании проверялись три варианта закона наведения:

I – определяется соотношением (13);

II – определяется соотношением

$$(14) \quad \hat{j}_П = \frac{bq_{21}}{k_j T_П} \Delta\hat{\varphi} + \frac{bq_{22}}{k_j T_П \hat{D}} \Delta\hat{\omega};$$

III – определяется соотношением

$$(15) \quad \hat{j}_П = \frac{bq_{21}}{k_j T_П} \Delta\hat{\varphi}$$

при различных значениях постоянной времени перехватчика $T_П$.

В качестве показателя эффективности использовались величины текущего и конечного промахов, а также значения боковых ускорений перехватчика, реализуемых в процессе перехвата.

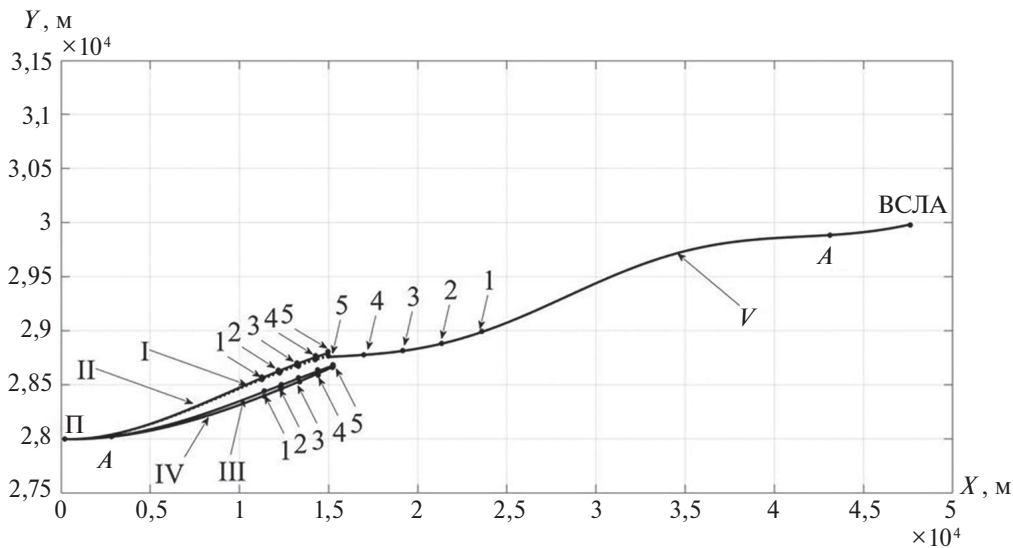


Рис. 2. Траектории движения ВСЛА и перехватчика в процессе перехвата.

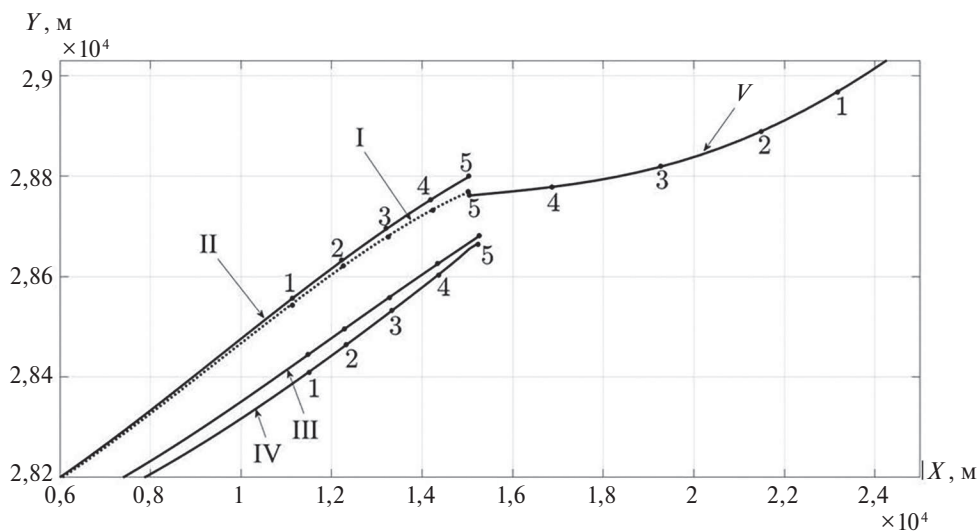


Рис. 3. Траектории ВСЛА и перехватчика на конечном участке наведения.

На рис. 2–5 представлены результаты моделирования:

- рис. 2 иллюстрирует движение ВСЛА и перехватчика на всей траектории перехвата в вертикальной плоскости;
- рис. 3 отображает траектории ВСЛА и перехватчика на конечном участке наведения;
- рис. 4 характеризует текущие h и конечные $h_{к}$ значения промахов, реализуемых при наведении в соответствии с j_1 , j_2 и j_3 ;
- рис. 5 характеризует значения реализуемых боковых ускорений.

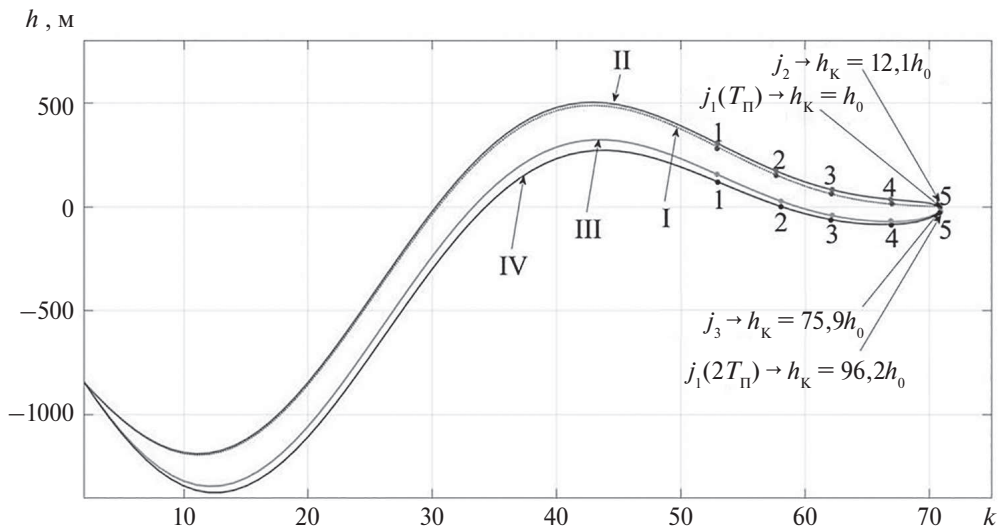


Рис. 4. Значения текущих и конечных промахов перехватчика при реализации различных законов наведения.

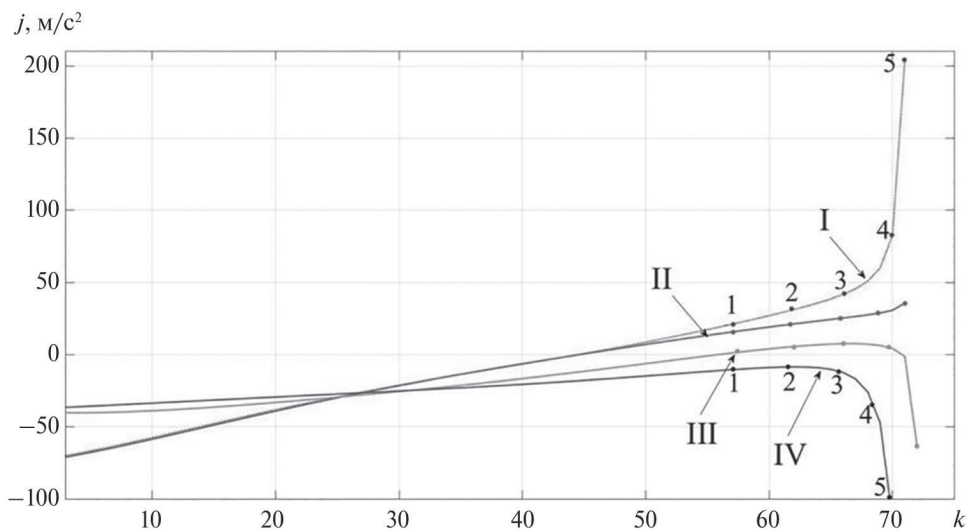


Рис. 5. Значения боковых ускорений перехватчика при реализации различных законов наведения.

На рис. 2 и 3 для вертикальной плоскости XOY цифрами I, II и III обозначены траектории перехватчика при реализации соответственно j_1 , j_2 и j_3 для постоянной времени $T_{II} = 2$, при этом $b = 2$; IV – траектория перехватчика при реализации j_1 для постоянной времени $2T_{II}$; V – траектория ВСЛА, осуществляющего маневрирование со сменой знака производных координат состояния; точки «ВСЛА» и «П» – соответственно начальные позиции ВСЛА

и перехватчика; точки $A, 1, 2, 3, 4, 5$ – текущие положения ВСЛА и перехватчика в одинаковые моменты времени.

На рис. 4 представлено: кривые I–IV – соответственно текущие промахи h при реализации j_1, j_2 и j_3 ; h_k – конечный промах; h_0 – значение конечного промаха при реализации синтезированного закона управления j_1 при постоянной времени T_{Π} .

На рис. 5 представлены кривые I–IV, соответствующие текущим значениям боковых ускорений, возникающих в процессе перехвата.

Анализ результатов моделирования позволил заключить следующее:

1. Использование нестационарного закона управления j_1 (13), учитывающего несоответствие динамических свойств цели и перехватчика, позволяет повысить точность наведения инерционного перехватчика. При этом попытка упростить закон управления, используя для расчета боковых ускорений выражения (14) и (15), приводит к снижению точности наведения, характеризуемой конечным промахом перехватчика h_k , что показывает совместный анализ кривых I–IV на рис. 4.

2. Учет нестационарности в законе наведения оказывает существенную роль в эффективности наведения. Это подтверждается совместным анализом кривых I–III на рис. 2. Анализ показывает, что при принятых начальных условиях наведение в соответствии с нестационарными законами наведения по траекториям I и II после преодоления перехватчиком первых 3 км (точка A на рис. 2), что соответствует удалению до цели порядка 40 км, отделяется от кривой III, являющейся результатом перехвата в соответствии со стационарным законом наведения.

3. Дополнительный учет в j_1 несоответствия динамических свойств перехватчика и цели оказывает влияние на конечном этапе перехвата. Когда перехватчик преодолел отметку порядка 7 км, наблюдается разделение траекторий I и II на рис. 3. Этой позиции перехватчика соответствует расстояние до цели порядка 25 км. Вышеизложенное определяет кардинальную роль учета несоответствия динамических свойств перехватчика и цели в законе наведения.

4. Текущие значения промахов имеют сходящуюся тенденцию для всех законов управления j_1 – j_3 перехватчиков, чему свидетельствует совместный анализ кривых I–IV на рис. 4.

5. Увеличение инерционности перехватчика, характеризуемой постоянной времени T_{Π} , в два раза снижает эффективность перехвата, чему свидетельствует совместный анализ кривых I и IV на всех рисунках.

6. Отсутствуют какие-либо ограничения на практическую реализацию закона управления (13). Это определяется тем, что, с одной стороны, для информационного обеспечения (13) могут быть задействованы существующие измерители дальности, скорости и угловых координат, с другой – наведение выполняется в рамках реализуемых боковых ускорений (кривые I–IV на рис. 5).

4. Заключение

В работе на основе локального варианта оптимизации синтезирован нестационарный закон управления инерционным перехватчиком при наведении его на маневрирующую воздушную цель, учитывающий несоответствие динамических свойств перехватчика и цели.

Нестационарность закона управления и учет несоответствия динамических свойств перехватчика и цели позволяют уменьшить величину конечного промаха перехватчика. При этом нестационарность закона управления для приведенных условий моделирования начинает оказывать влияние с расстояния до цели порядка 40 км, а учет несоответствия динамических свойств перехватчика и цели с расстояния до цели порядка 25 км.

Нестационарность закона наведения обеспечена путем введения в функционал, лежащий в основе синтеза, нестационарных (зависящих от условия применения) коэффициентов штрафов за точность управления. Учет несоответствия динамических свойств перехватчика и ВСЛА обеспечен посредством использования различных математических моделей, описывающих данные объекты, и введением в функционал матрицы измеряемых возмущений, характеризующей несоответствие динамических свойств.

В результате проведенного исследования установлено, что синтезированный нестационарный закон управления перехватчиком, учитывающий несоответствие динамических свойств перехватчика и цели, потенциально обеспечивает перехват цели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Верба В.С., Меркулов В.И., Закомолдин Д.В.* Проблемы перехвата высокоскоростных летательных аппаратов, маневрирующих по сложным законам. Ч. 1. // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2024. № 3. С. 5–12.
2. *Верба В.С., Меркулов В.И., Закомолдин Д.В., Лихачев В.П.* Проблемы перехвата высокоскоростных летательных аппаратов, маневрирующих по сложным законам. Ч. 2. // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2024. № 4. С. 5–14.
3. *Yibo D., Yue X., Chen G., et al.* Review of control and guidance technology on hypersonic vehicle // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022. V. 35. No. 7. P. 1–18.
4. *Grant M., Antony T.* Rapid indirect trajectory optimization of a hypothetical long range weapon system // In *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*. 2016. P. 1–19.
5. *Besser H., Shaffer A., Zimper D., et al.* Hypersonic Vehicles: Game Changers for Future Warfare // *Transforming Joint Air Power: J. JAPCC*. 2017. No. 24. P. 11–27.
6. *Shen H., Liu Y., Chen B., et al.* Control-relevant modeling and performance limitation analysis for flexible air-breathing hyper-sonic vehicles // *Aerospace Science Technology*. 2018. No.76. P. 340–349.
7. *Karako T., Dahlgren M.* Complex Air Defense Countering the Hypersonic Missile Threat. A Report of the CSIS Missile Defense Project. 2022. 69 p.

8. *Верба В.С., Меркулов В.И., Ильчук А.Р.* Подходы к оптимизации методов наведения на высокоскоростные интенсивно маневрирующие цели. Ч. 3. // *АиТ.* 2025. № 2. С. 71–85.
9. *Меркулов В.И., Верба В.С.* Синтез и анализ авиационных радиоэлектронных систем управления. Кн. 1. Теоретические основы построения и разработки. М.: Радиотехника, 2023.

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

Поступила в редакцию 30.07.2025

После доработки 10.10.2025

Принята к публикации 15.10.2025