

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ДВИЖУЩИМИСЯ ОБЪЕКТАМИ**

УДК 629.7.058

**ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО
СОПРОВОЖДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ
ЛОКАЛЬНЫХ КВАДРАТИЧНО-БИКВАДРАТНЫХ ФУНКЦИОНАЛОВ.
II. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА**

© 2021 г. В. С. Верба^a, И. Р. Загребельный^{a,b,*}, В. И. Меркулов^a, Е. А. Руденко^{c,**}

^a АО “Концерн “Вега”, Москва, Россия

^b МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

^c МАИ (национальный исследовательский ун-т), Москва, Россия

*e-mail: ilya-zagrebelski@mail.ru

**e-mail: rudenkoevg@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.06.2020 г.

После доработки 18.08.2020 г.

Принята к публикации 30.11.2020 г.

Приведены результаты исследований эффективности оптимального радиолокационного угломера при сопровождении целей, движущихся по траекториям различной сложности. Следящая система угломера получена в первой части данной статьи локальной минимизацией квадратично-биквадратного функционала качества.

DOI: 10.31857/S0002338821020141

0. Введение. В работе [1] решена задача локальной квадратично-биквадратной оптимизации линейных систем автоматического сопровождения воздушных объектов. Там же рассмотрено и ее применение к синтезу управления типовым приводом антенны следящего радиолокационного угломера [2]:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_y &= \omega_y, & \varphi_y(0) &= \varphi_{y0}, \\ \dot{\omega}_y &= -\frac{1}{T}\omega_y + \frac{b}{T}u_y, & \omega_y(0) &= \omega_{y0}, \end{aligned} \quad (0.1)$$

предназначенного для сопровождения интенсивно маневрирующей воздушной цели, определяемой моделью

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_T &= \omega_T + \frac{j_T}{D}, & \varphi_T(0) &= \varphi_{T0}, \\ \dot{\omega}_T &= -\frac{2\dot{D}}{D}\omega_T - \frac{j_T}{D}, & \omega_T(0) &= \omega_{T0}. \end{aligned} \quad (0.2)$$

Здесь φ_T , ω_T – бортовой пеленг цели и угловая скорость линии визирования цели; φ_y , ω_y – угол поворота равносигнального направления антенны и скорость его изменения; φ_{y0} , ω_{y0} , φ_{T0} , ω_{T0} – значения этих координат на момент захвата цели; b , T – коэффициент передачи сигнала управления u_y и постоянная времени угломера; D , \dot{D} – дальность до цели и скорость ее изменения; j_T – поперечное ускорение цели, манипулируя которым можно реализовать траектории различной сложности.

Геометрия текущего взаимного расположения цели и угломера показана на рис. 1, на котором $O_{p,y}$ и $O_{ц}$ – точки расположения радиолокационного угломера и цели, $V_{ц}$ – вектор скорости цели, $x_{РСН}$ – положение равносигнального направления (РСН) в горизонтальной плоскости, определяющее величину φ_y .

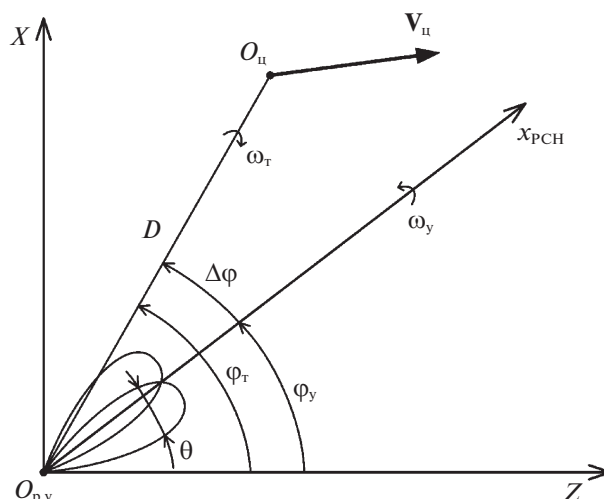


Рис. 1. Геометрия взаимного расположения радиолокационного угломера и цели

С целью уменьшения ошибок слежения за углом $\Delta\varphi = \varphi_\tau - \varphi_y$ и угловой скоростью $\Delta\omega = \omega_\tau - \omega_y$ в [1] был получен локально оптимальный по минимуму изменяющегося во времени функционала

$$I_t = \int_0^t k_\omega u_y^2(\tau) d\tau + \left[\begin{array}{c} \Delta\varphi \\ \Delta\omega \end{array} \right]^T \left[\begin{array}{cc} q_{11} & q_{12} \\ q_{12} & q_{22} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \Delta\varphi \\ \Delta\omega \end{array} \right] + \left\{ \left[\begin{array}{c} \Delta\varphi \\ \Delta\omega \end{array} \right]^T \left[\begin{array}{cc} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \Delta\varphi \\ \Delta\omega \end{array} \right] \right\}^2 \quad (0.3)$$

закон управления приводом

$$u_y = K_1 \Delta\varphi + K_2 \Delta\omega + K_3 \Delta\varphi^3 + K_4 \Delta\varphi^2 \Delta\omega + K_5 \Delta\varphi \Delta\omega^2 + K_6 \Delta\omega^3 \quad (0.4)$$

с коэффициентами

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{b}{k_\omega T} q_{12}, & K_2 &= \frac{b}{k_\omega T} q_{22}, & K_3 &= \frac{2b}{k_\omega T} p_{11} p_{12}, \\ K_4 &= \frac{2b}{k_\omega T} (2p_{12}^2 + p_{11} p_{22}), & K_5 &= \frac{6b}{k_\omega T} p_{12} p_{22}, & K_6 &= \frac{2b}{k_\omega T} p_{22}^2. \end{aligned} \quad (0.5)$$

Здесь q_{11}, q_{12}, q_{22} – коэффициенты квадратичного штрафа за ошибки слежения $\Delta\varphi, \Delta\omega$; p_{11}, p_{12}, p_{22} – коэффициенты соответствующего биквадратного штрафа, определяющие в законе (0.4) веса нелинейных слагаемых.

Целью дальнейшего изложения является исследование эффективности закона управления (0.4), (0.5) и его разновидностей при сопровождении целей, маневрирующих по сложным законам, в том числе и со сменой знаков производных.

1. Условия исследования. Исследование эффективности предложенного метода оптимизации по минимуму квадратично-биквадратных функционалов качества выполнялось на примере сопровождения радиолокационным угломером высокоскоростных целей,двигающихся по траекториям различной сложности, в том числе и со сменой знака производных. Необходимо отметить, что существующие следящие угломеры неспособны сопровождать такие цели [3].

При этом полагалось, что угломер входит в состав моноимпульсной радиолокационной системы (РЛС) с двухлепестковой диаграммой направленности с шириной $\theta = 4^\circ$ (рис. 1) с полосой рабочей зоны $0.5\theta = \pm 2^\circ$ [4], а цели перемещаются в пространстве со сверхзвуковой скоростью.

Исследования проводились путем моделирования траекторий полета цели (0.2) по трем различным траекториям. В качестве показателей эффективности использовались текущие ошибки сопровождения по углу и угловой скорости. Если при этом выполнялось условие $|\Delta\varphi| \geq 2^\circ$, то регистрировался срыв сопровождения.

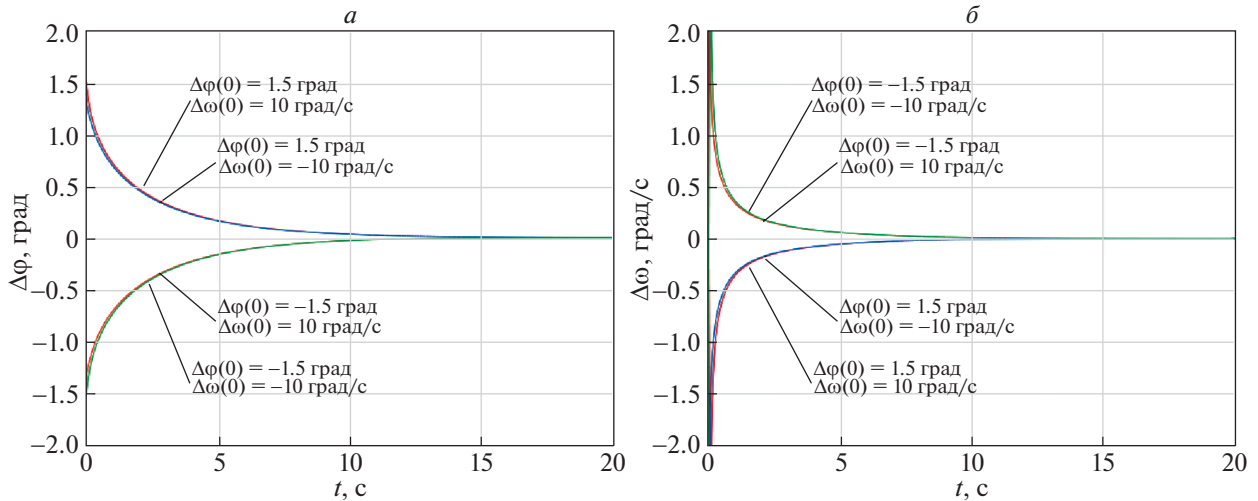


Рис. 2. Текущие ошибки по углу (а) и угловой скорости (б) при обработке алгоритмом (1.1) первоначальных ошибок захвата различных знаков

Для выяснения влияния отдельных слагаемых оптимального закона управления (0.4) на качество сопровождения исследования проводились при использовании следующих вариантов:

– полный закон (0.4) с коэффициентами (0.5):

$$u_{y1} = K_1\Delta\varphi + K_2\Delta\omega + K_3\Delta\varphi^3 + K_4\Delta\varphi^2\Delta\omega + K_5\Delta\varphi\Delta\omega^2 + K_6\Delta\omega^3; \quad (1.1)$$

– без куба ошибки по углу $\Delta\varphi^3$:

$$u_{y2} = K_1\Delta\varphi + K_2\Delta\omega + K_4\Delta\varphi^2\Delta\omega + K_5\Delta\varphi\Delta\omega^2 + K_6\Delta\omega^3; \quad (1.2)$$

– без куба ошибки по угловой скорости $\Delta\omega^3$:

$$u_{y3} = K_1\Delta\varphi + K_2\Delta\omega + K_3\Delta\varphi^3 + K_4\Delta\varphi^2\Delta\omega + K_5\Delta\varphi\Delta\omega^2; \quad (1.3)$$

– без куба ошибки по углу $\Delta\varphi^3$ и смеси $\Delta\varphi\Delta\omega^2$, что соответствует использованию в критерии (0.3) диагональной матрицы биквадратных штрафов ($p_{12} = 0$):

$$u_{y4} = K_1\Delta\varphi + K_2\Delta\omega + K_4\Delta\varphi^2\Delta\omega + K_6\Delta\omega^3; \quad (1.4)$$

– без кубов ошибок и по углу $\Delta\varphi^3$ и по угловой скорости $\Delta\omega^3$:

$$u_{y5} = K_1\Delta\varphi + K_2\Delta\omega + K_4\Delta\varphi^2\Delta\omega + K_5\Delta\varphi\Delta\omega^2; \quad (1.5)$$

– без куба ошибки по углу $\Delta\varphi^3$ и смеси $\Delta\varphi^2\Delta\omega$:

$$u_{y6} = K_1\Delta\varphi + K_2\Delta\omega + K_5\Delta\varphi\Delta\omega^2 + K_6\Delta\omega^3; \quad (1.6)$$

– без кубов ошибок по углу $\Delta\varphi^3$, по угловой скорости $\Delta\omega^3$ и смеси $\Delta\varphi\Delta\omega^2$:

$$u_{y7} = K_1\Delta\varphi + K_2\Delta\omega + K_4\Delta\varphi^2\Delta\omega; \quad (1.7)$$

– типовой линейный алгоритм сопровождения, который соответствует одному из лучших вариантов существующих угломеров [2]:

$$u_{y8} = K_1\Delta\varphi + K_2\Delta\omega. \quad (1.8)$$

Исследования проводились в несколько этапов:

– проверялась способность всех управлений устранять первоначальные ошибки захвата $\Delta\varphi(0) = \pm 1.5^\circ$ и $\Delta\omega(0) = \pm 10$ град/с в различных сочетаниях по знаку;

– изучались показатели сопровождения цели, движущейся равноускорено прямолинейно;

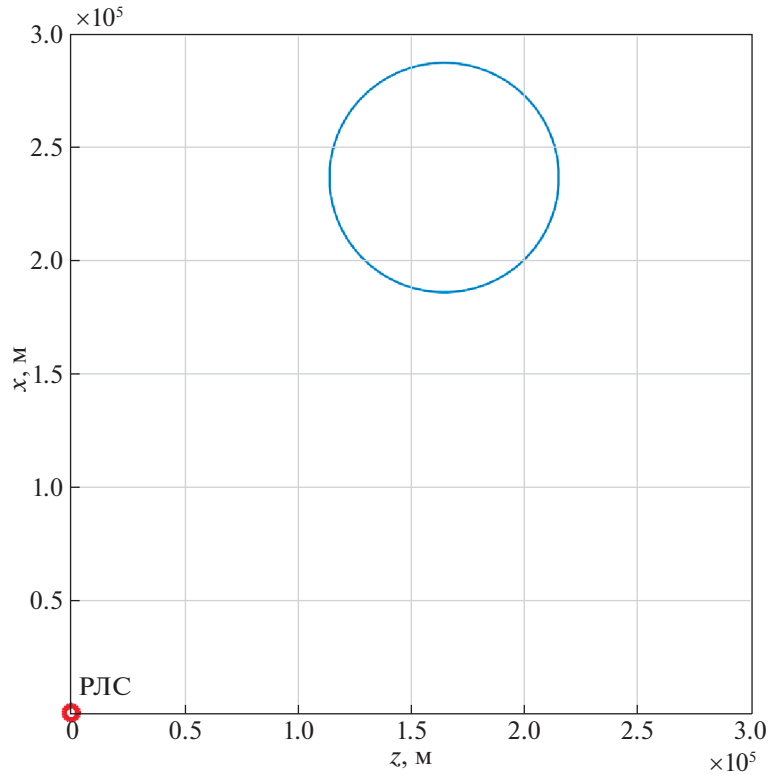


Рис. 3. Геометрия взаимного расположения РЛС и цели при ее движении по окружности

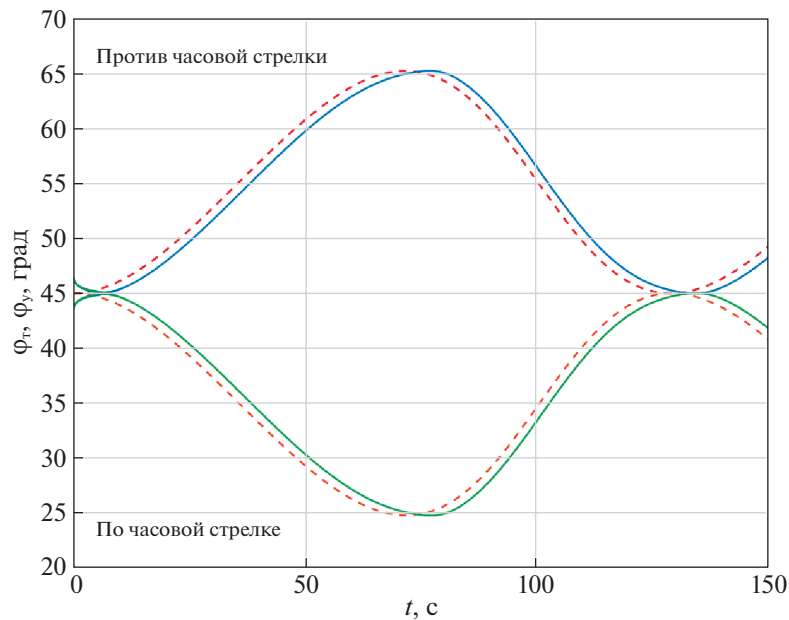


Рис. 4. Бортовой пеленг цели (пунктирная линия) и угол поворота антенны (сплошная линия) для алгоритма (1.1) при движении цели по окружности

– исследовалась работоспособность всех вариантов управления при сопровождении цели, движущейся по окружности на некотором удалении от РЛС с периодической сменой знаков производных бортовых пеленгов и дальности;

– оценивались возможности всех законов управления при сопровождении цели, движущейся по квазисинусоидальной траектории (маневр “змейка”).

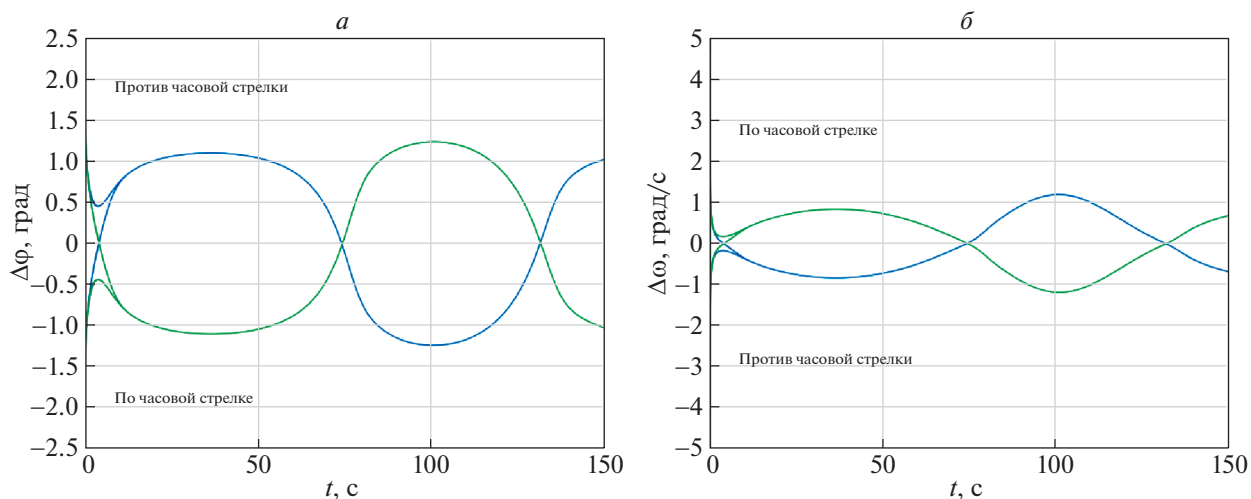


Рис. 5. Ошибки сопровождения по углу (а) и угловой скорости (б) для алгоритма (1.1) при движении цели по окружности

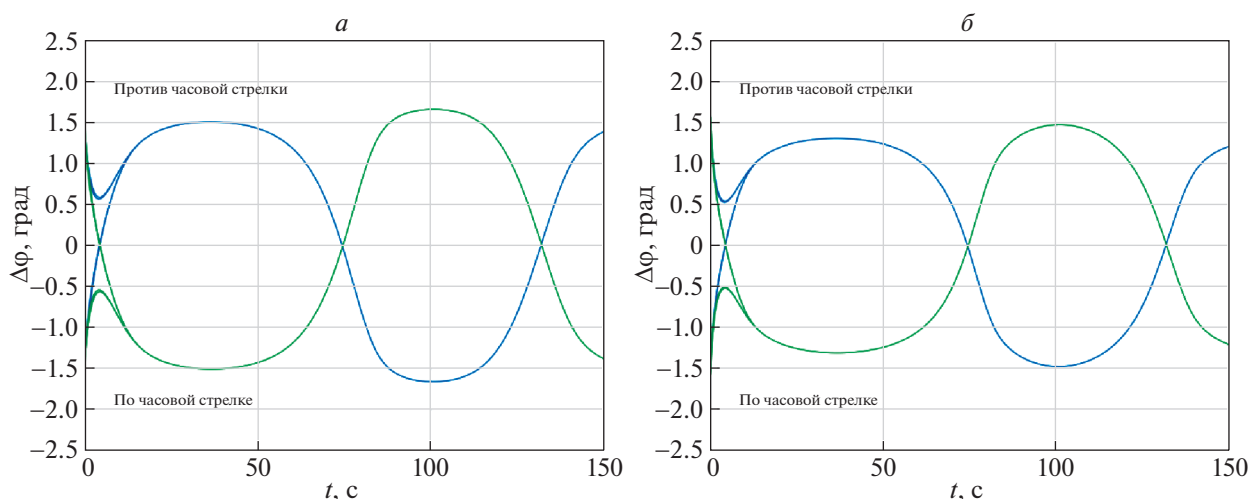


Рис. 6. Ошибки сопровождения по углу для алгоритмов (1.2) (а) и (1.3) (б) при движении цели по окружности

2. Результаты исследований. Проведенные исследования показали, что все варианты управления устойчиво устраняют первоначальные ошибки захвата при их различном сочетании по знаку. В качестве примера на рис. 2 показаны эпюры устранения ошибок захвата по углу и угловой скорости при использовании управления (1.1). Все остальные варианты управления (1.2)–(1.8) также устойчиво устраняют ошибки захвата, но с несколько худшими показателями точности и времени отработки.

При сопровождении цели, движущейся равноускоренно прямолинейно, ошибки сопровождения устраняются всеми вариантами сигналов управления, обеспечивая высокоточное сопровождение в установившемся режиме с некоторым увеличением ошибок сопровождения по углу и угловой скорости на начальном этапе. Исследование этого этапа позволяет прийти к заключению, что при сопровождении целей, маневрирующих без смены знака производных угловых координат, все варианты управления (1.1)–(1.7) по сравнению с традиционным пропорционально-дифференциальным методом (1.8) несколько улучшают точность сопровождения.

2.1. Сопровождение цели, движущейся по окружности. Положение цели, движущейся по окружности на определенном расстоянии от РЛС, показано на рис. 3, а результаты исследований иллюстрируются рис. 4–12.

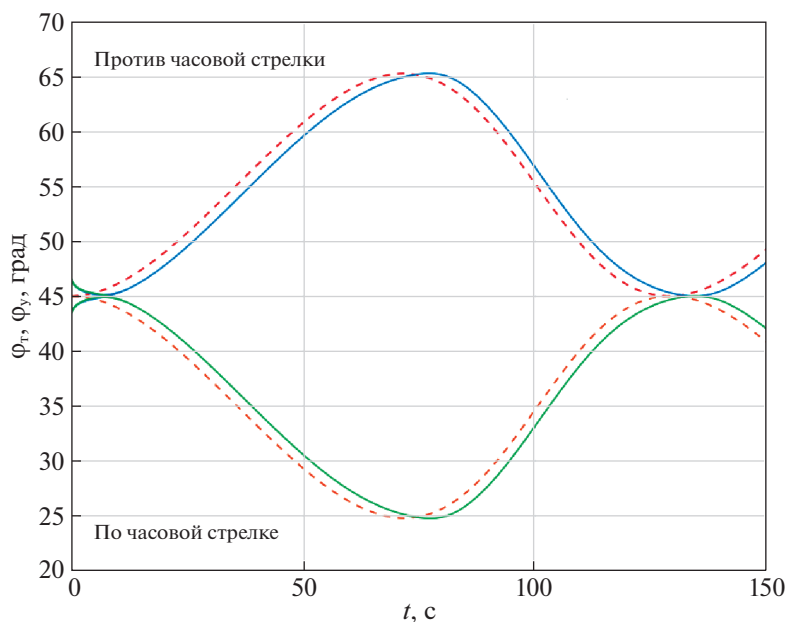


Рис. 7. Бортовой пеленг цели (пунктирная линия) и угол поворота антенны (сплошная линия) для алгоритма (1.4) при движении цели по окружности

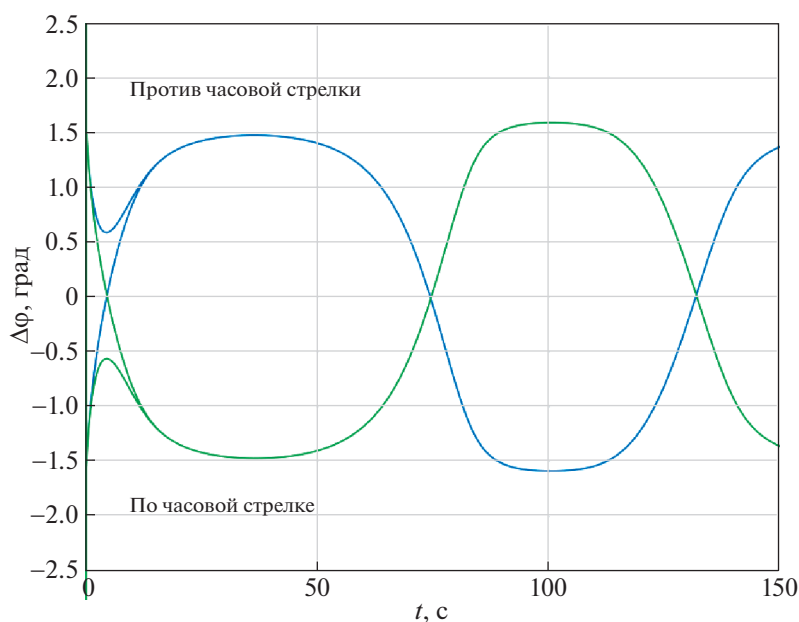


Рис. 8. Ошибка сопровождения по углу для алгоритма (1.5) при движении цели по окружности

На рис. 4 представлено изменение углового положения цели и угла поворота антенны в процессе сопровождения при использовании полного закона управления (1.1), а на рис. 5 – реализуемые при этом ошибки сопровождения по углу и угловой скорости. Из них видно, что закон управления (1.1), обеспечивая отработку ошибок захвата, реализует высокую точность сопровождения цели $|\Delta\varphi| \leq 1.3^\circ$, $|\Delta\dot{\omega}| \leq 1.2$ град/с, движущейся со сменой знаков производных дальности и углов, с большим запасом устойчивости $|0.5\theta - \Delta\varphi| > 0.5^\circ$.

Способы управления без учета $\Delta\varphi^3$ (1.2) и без учета $\Delta\dot{\omega}^3$ (1.3) также обеспечивают бесрывное сопровождение, но с несколько худшими показателями точности. Графики ошибок сопровождения для этих законов приведены на рис. 6.

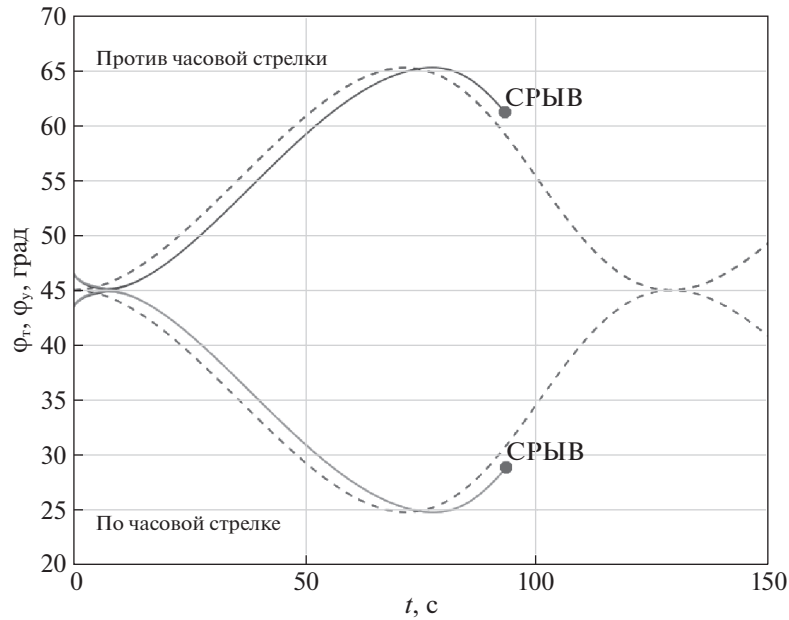


Рис. 9. Бортовой пеленг цели (пунктирная линия) и угол поворота антенны (сплошная линия) для алгоритмов (1.6) и (1.7) при движении цели по окружности

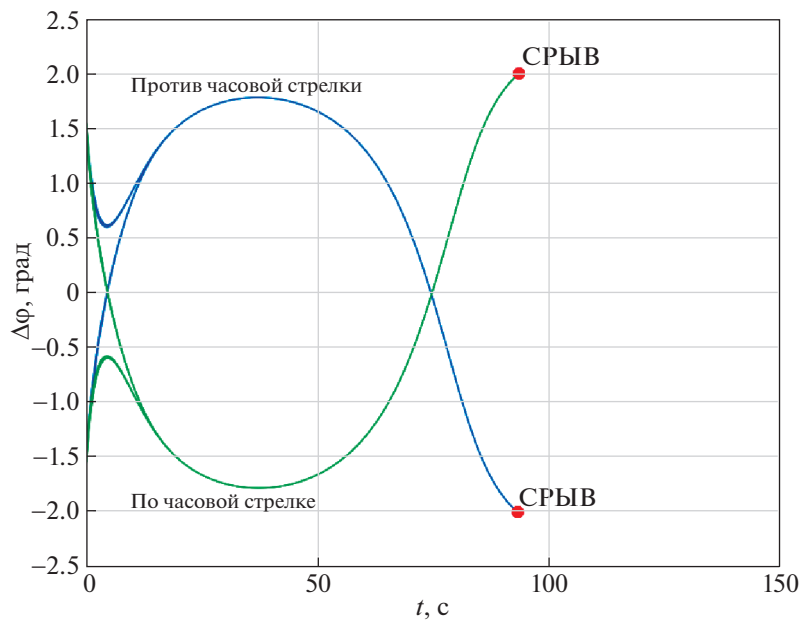


Рис. 10. Ошибки сопровождения по углу для алгоритмов (1.6) и (1.7) при движении цели по окружности

Рисунок 7 иллюстрирует показатели точности закона управления (1.4), полученного при условии использования в критерии (0.3) диагональной матрицы биквадратного штрафа ($p_{12} = 0$). Результаты исследований подтвердили его способность сопровождать цели, движущиеся по окружности, но с несколько худшей по сравнению с (1.1) точностью и меньшим запасом устойчивости.

Рисунок 8, характеризующий точность закона управления (1.5), который не учитывает кубических составляющих $\Delta\varphi^3$, $\Delta\omega^3$, свидетельствует о его возможности сопровождать цели, движущиеся по окружности, но с несколько худшей точностью.

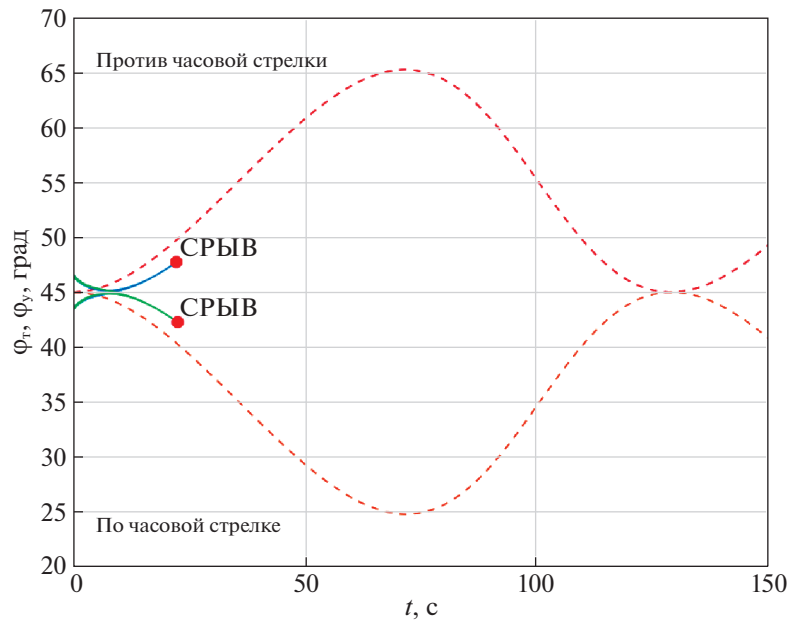


Рис. 11. Бортовой пеленг цели (пунктирная линия) и угол поворота антенны (сплошная линия) для алгоритма (1.8) при движении цели по окружности

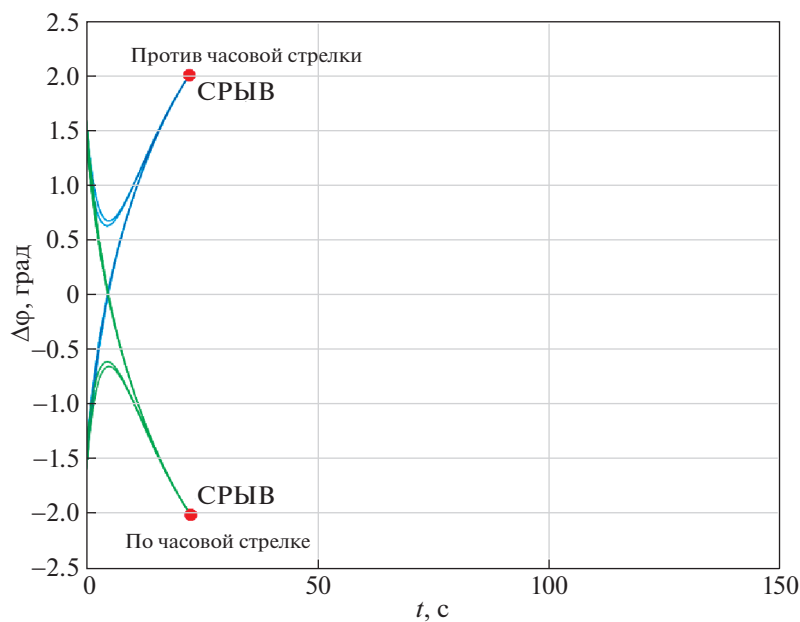


Рис. 12. Ошибка сопровождения по углу для алгоритма (1.8) при движении цели по окружности

Исследование вариантов без учета $\Delta\varphi^3$ и $\Delta\varphi^2\Delta\omega$ (1.6) и без учета $\Delta\varphi^3$, $\Delta\varphi\Delta\omega^2$ и $\Delta\omega^3$ (1.7) показало, что, практически обладая одинаковыми свойствами, данные законы не обеспечивают бесрывное сопровождение. Графики, поясняющие их работу, приведены на рис. 9, 10.

Графики текущих пеленгов, углов поворота антенны и ошибок сопровождения для традиционного угломера (1.8) представлены на рис. 11, 12.

Из рис. 5–8 видно, что полный вариант закона управления (1.1) и его разновидности (1.2)–(1.5) обеспечивают высокоточное бесрывное сопровождение цели при ее движении как по часовой, так и против часовой стрелки при любом наборе ошибок захвата. При этом хорошо

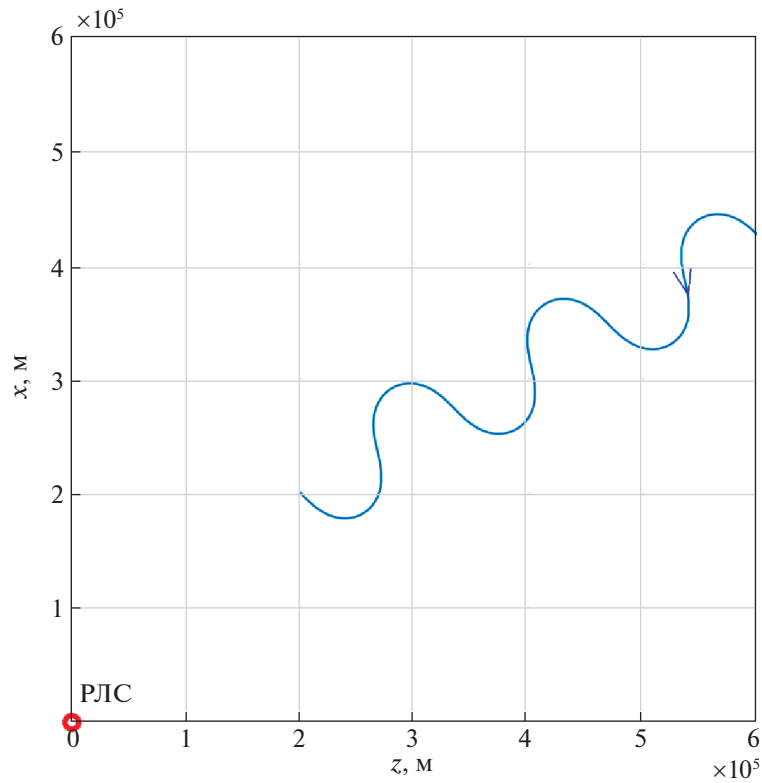


Рис. 13. Геометрия взаимного расположения РЛС и цели при выполнении маневра “змейка”

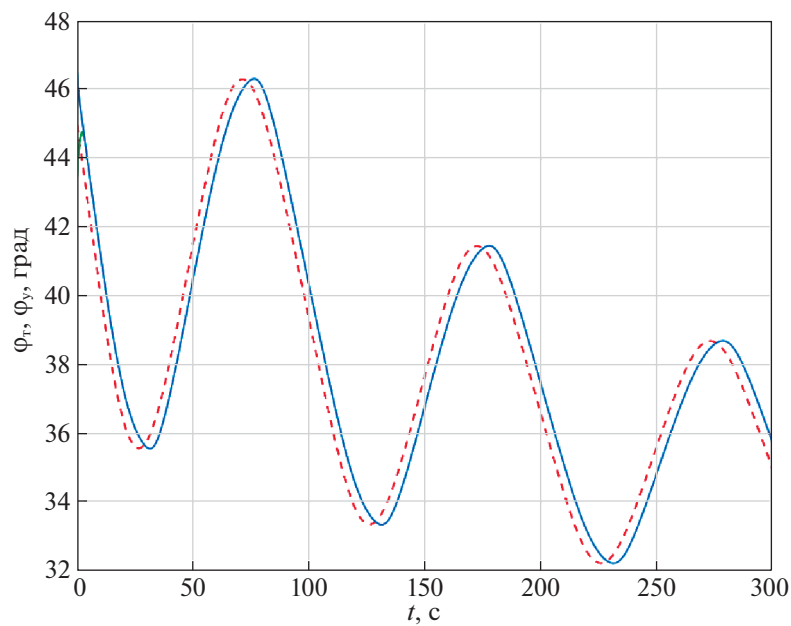


Рис. 14. Бортовой пеленг цели (пунктирная линия) и угол поворота антенны (сплошная линия) для алгоритма (1.1) при маневре цели “змейка”

просматривается сглаживающее влияние кубических слагаемых $K_3\Delta\varphi^3$ и $K_6\Delta\omega^3$ в области больших ошибок сопровождения. Так что достаточно высокими показателями точности и устойчивости обладают законы управления, содержащие хотя бы одно кубическое слагаемое.

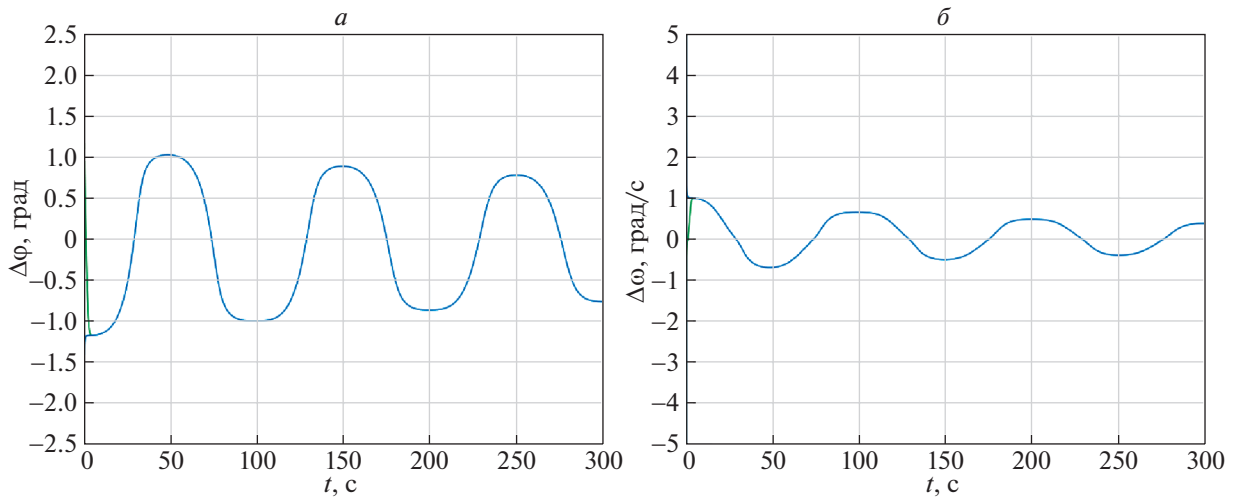


Рис. 15. Ошибки сопровождения по углу (а) и угловой скорости (б) для алгоритма (1.1) при маневре цели “змейка”

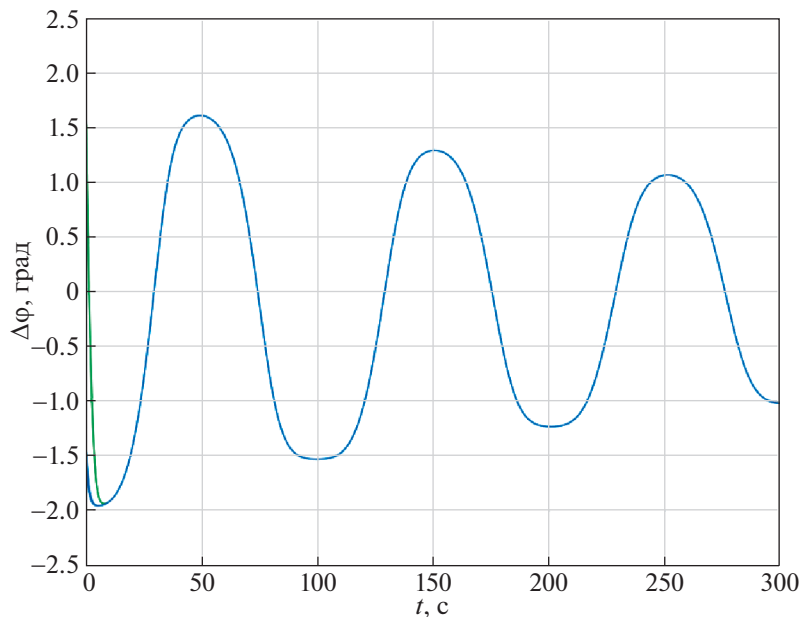


Рис. 16. Ошибки сопровождения по углу для алгоритмов (1.2)–(1.5) при маневре цели “змейка”

В то же время дополнительное исключение любого смешанного слагаемого $\Delta\varphi\Delta\omega^2$ или $\Delta\varphi^2\Delta\omega$ приводит к нарастанию текущих ошибок и срыву сопровождения (рис. 9, 10). Особенно показательны эпюры ошибок сопровождения (рис. 11, 12) для традиционного пропорционально-дифференциального метода (1.8), который приводит к срыву существенно быстрее, чем другие варианты управления.

Анализируя результаты исследований этого этапа, можно прийти к заключению, что разработанный метод оптимизации, в отличие от других, позволяет синтезировать управление, которое обеспечивает бессрывное сопровождение целей, движущихся по сложным траекториям со сменной знака производной дальности и угловой координаты.

2.2. Сопровождение цели, движущейся по квазисинусоидальной траектории. Для практики наибольшую ценность имеют результаты сопровождения цели, которую существующие угломеры неспособны непрерывно сопровождать и которая обычно

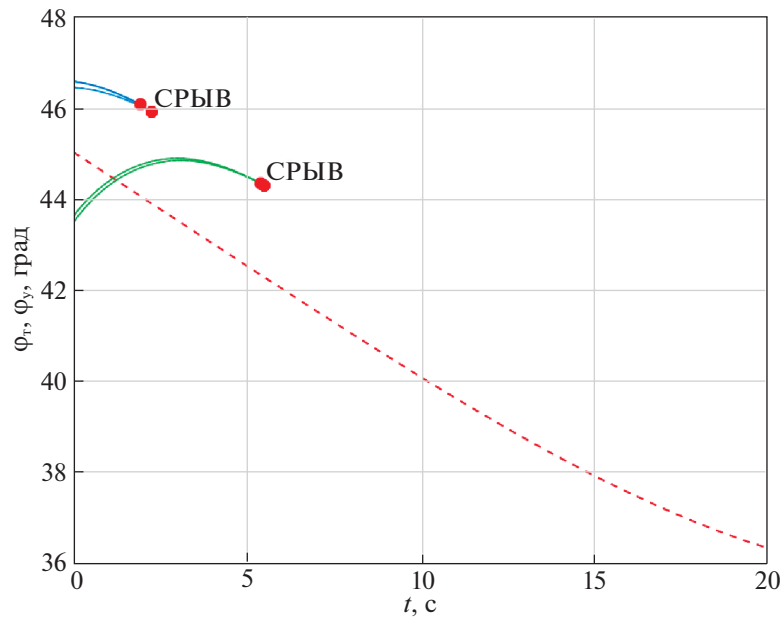


Рис. 17. Бортовой пеленг цели (пунктирная линия) и угол поворота антенны (сплошная линия) для алгоритма (1.8) при маневре цели “змейка”

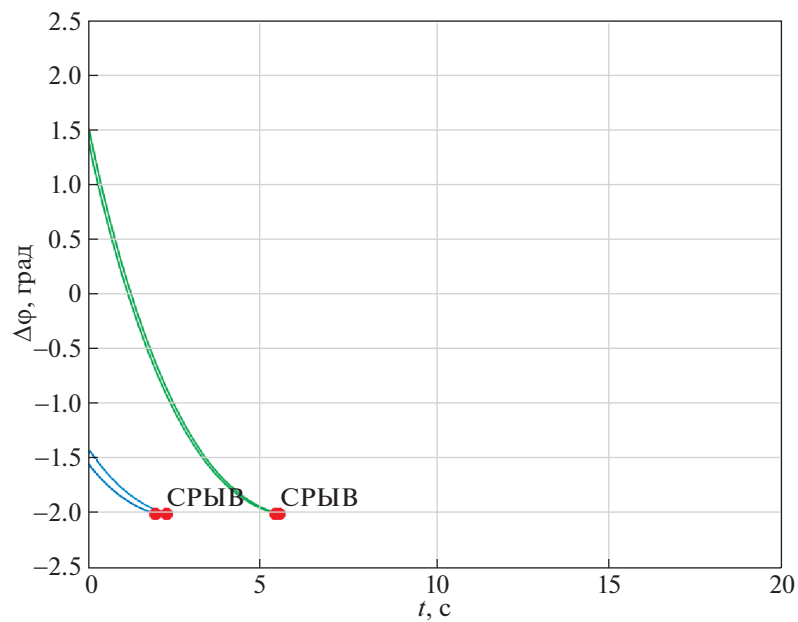


Рис. 18. Ошибка сопровождения по углу для алгоритма (1.8) при маневре цели “змейка”

используется для уклонения от средств поражения [3]. Траектория такого движения цели показана на рис. 13, а графики показателей сопровождения – на рис. 14–18.

При этом на рис. 14 показаны зависимости бортового пеленга и угла поворота антенны для закона управления (1.1), а на рис. 15 – соответствующие графики ошибок слежения по углу и угловой скорости. Из этих двух рисунков видно, что цель устойчиво сопровождается с тенденцией снижения ошибок сопровождения и по углу, и по угловой скорости.

На рис. 16 приведены графики ошибок сопровождения по углу, общие для законов управления (1.2)–(1.5). Они качественно повторяют рис. 15, а, но с несколько худшей точностью.

Остальные варианты управления (1.6), (1.7) и особенно традиционный метод (1.8) не обеспечивают бесрывного сопровождения целей,двигающихся по квазисинусоидальной траектории. В качестве примера на рис. 17, 18 приведены графики траекторий отслеживаемых углов и соответствующих ошибок сопровождения для традиционного алгоритма (1.8).

Заключение. Предложенный способ синтеза систем на основе минимизации квадратично-биквадратных функционалов качества позволяет сформировать более эффективные законы управления. Они решают задачи бесрывного сопровождения новых типов целей, недоступные для типовых систем автосопровождения, оптимизированных по минимуму квадратичных функционалов качества.

При этом для формирования оптимального закона (1.1) не требуется знания старших производных угловых координат, а достаточно знания бортовых пеленгов, углового положения антенны и скоростей их изменения. Последние довольно просто формируются по результатам измерений углового положения антенны и пеленгаторов в плоскостях управления летательного аппарата-носителя.

Необходимо подчеркнуть, что, манипулируя видом биквадратного слагаемого функционала качества и его коэффициентами, можно получить широкий набор алгоритмов бесрывного высокоточного сопровождения для различных областей техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Верба В.С., Меркулов В.И., Руденко Е.А.* Оптимизация систем автоматического сопровождения воздушных объектов на основе локальных квадратично-биквадратных функционалов. Ч. I. Синтез оптимального управления // Изв. РАН. ТиСУ. 2021. № 1. С. 24–29.
2. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Т. 2. Сопровождение одиночных целей / Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2018. 486 с.
3. Авиационные системы радиоправления. Т. 3. Системы командного радиоправления. Автономные и комбинированные системы наведения / Под ред. А.И. Канашенкова и В.И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2004. 320 с.
4. Многофункциональные радиолокационные комплексы истребителей / Под ред. В.Н. Лепина. М.: Радиотехника, 2014. 296 с.