

УДК 629.7.05

СИНТЕЗ КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО КОНТУРА ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ИНЕРЦИОННОМ ИЗМЕРИТЕЛЕ

А.А. КУН, С.А. ШАБАН, А.М. ЕРОМИН, А.Л. КОЧЕРОВ

Военная академия Республики Беларусь
Минск-57, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 16 июня 2014

Решена задача синтеза квазиоптимального контура телеуправляемого беспилотного летательного аппарата с учетом инерционности координатного блока цели. Предложен способ компенсации инерционности измерительного устройства. Проведен анализ зависимости параметров контура телеуправления при различных дальностях до точки встречи беспилотного летательного аппарата с целью.

Ключевые слова: синтез контура телеуправляемого беспилотного летательного аппарата, измерительное устройство, устройство выработки команд.

Введение

Одной из задач синтеза контура телеуправляемого беспилотного летательного аппарата (БЛА) является определение оптимальной структуры и параметров контура. Наличие в контуре управления измерительного устройства приводит к увеличению инерционности системы в целом.

Рассматривается контур телеуправляемого БЛА малой дальности. При синтезе принимаются следующие допущения: динамические свойства координатного блока БЛА, устройства передачи команд и системы стабилизации БЛА считаются безинерционными. В качестве управления принимается нормальное ускорение БЛА.

Постановка задачи

Представим кинематику плоского телеуправления в виде линеаризованного уравнения [1, 2]:

$$\ddot{h}(t) = W_k(t) - W_p(t), \quad (1)$$

где $h(t)$ – ошибка наведения БЛА на цель, $W_k(t)$ и $W_p(t)$ – требуемое (кинематическое) и нормальное ускорения БЛА соответственно.

Будем полагать, что $W_k(t)$ является случайной функцией времени и описывается стохастическим дифференциальным уравнением [1, 3]:

$$\dot{W}_k(t) = -\frac{1}{T} W_k(t) + \frac{1}{T} \xi(t), \quad W_k(t_0) = W_{k0},$$

где $\xi(t)$ – гауссовый процесс типа белого шума с интенсивностью Q .

Представим уравнение (1) в форме Коши [4]. Положив $h(t) = x_1(t)$, $W_k(t) = x_3(t)$ при $t_0 < t < t_k$, получим систему уравнений для фазовых переменных с учетом модели задающего воздействия:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), & x_1(t_0) = x_{10}; \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t) - W_p(t), & x_2(t_0) = x_{20}; \\ \dot{x}_3(t) = -\frac{1}{T}x_3(t) + \frac{1}{T}\xi(t), & x_3(t_0) = x_{30}. \end{cases} \quad (2)$$

В векторно-матричной форме (2) примет вид:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}\mathbf{X}(t) + \mathbf{G}\mathbf{U}(t) + \mathbf{J}\zeta(t), \quad \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0, \quad (3)$$

$$\text{где } \mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{U} = \begin{pmatrix} 0 \\ W_p \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{J} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T} & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Вектор состояния в начальный момент времени $\mathbf{X}(t_0)$ – гауссовый случайный вектор с характеристиками: $M[\mathbf{X}(t_0)] = 0$, $M[\mathbf{X}(t_0)\mathbf{X}^T(t_0)] = \mathbf{P}_0$, где \mathbf{P}_0 – матрица априорных дисперсий фазовых координат наблюдаемой системы.

Ошибка наведения в контуре телеуправления формируется в виде [1, 2]:

$$h = r_p(t) \cdot (\hat{\varepsilon}'_{ц} - \hat{\varepsilon}'_p), \quad (4)$$

где $r_p(t)$ – дальность до БЛА; $\hat{\varepsilon}'_{ц}$, $\hat{\varepsilon}'_p$ – относительные угловые координаты цели и БЛА, измеряемые координатным блоком цели и координатным блоком БЛА соответственно.

Передаточная функция координатного блока цели определяется выражением [1]:

$$K_{ц0}(p) = \frac{1 + pT_{ц}}{\frac{1}{K_{ц}}p^2 + pT_{ц} + 1} = \frac{z_1(p)}{x_1(p)}, \quad (5)$$

где $K_{ц}$, $T_{ц}$ – параметры передаточной функции; $z_1 = \hat{\varepsilon}'_{ц}$ – измеренная координата; $x_1 = \varepsilon'_{ц} = \varepsilon_{ц} - \varepsilon_a$ – ошибка между направлением на цель и положением антенны.

Для того, чтобы найти систему дифференциальных уравнений в форме Коши, соответствующую передаточной функции (5), составим структурную схему координатного блока цели как показано на рис. 1. Такой подход исключает дифференцирование белого шума η .

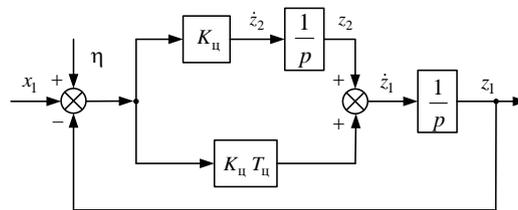


Рис. 1. Структурная схема координатного блока цели

$$\begin{cases} \dot{z}_1(t) = (x_1(t) - z_1(t)) \cdot K_{ц} T_{ц} + z_2(t) + \eta(t) \cdot K_{ц} T_{ц} = (x_1(t) - z_1(t)) \cdot k_1 + z_2(t) + \eta(t) \cdot k_1; \\ \dot{z}_2(t) = (x_1(t) - z_1(t)) \cdot K_{ц} + \eta(t) \cdot K_{ц} = (x_1(t) - z_1(t)) \cdot k_2 + \eta(t) \cdot k_2; \end{cases} \quad (6)$$

где $k_1 = K_{ц} T_{ц}$; $k_2 = K_{ц}$; $\eta(t)$ – гауссовый процесс типа белого шума с интенсивностью R .

Полученную систему уравнений можно записать в векторно-матричной форме:

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{L}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{N}\eta(t), \quad (7)$$

где $\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}$; $\mathbf{L} = \begin{bmatrix} -k_1 & 1 \\ -k_2 & 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ k_2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{N} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}$.

Процессы $\xi(t)$ и $\eta(t)$ – некоррелированные белые шумы с нулевыми математическими ожиданиями и корреляционными функциями:

$$M[\xi(t)\xi^T(t')] = Q\delta(t-t'); \quad M[\eta(t)\eta^T(t')] = R\delta(t-t'),$$

где M – знак математического ожидания.

Требуется найти такое управление $W_p(t)$, которое минимизирует функционал

$$J(W_p) = \frac{1}{2} M \left\{ \int_{t_0}^{t_k} [h^2(t) + kW_p^2(t)] dt \right\}, \quad (8)$$

где $k = \frac{h_{\text{доп}}^2}{W_{\text{расп}}^2}$ – коэффициент штрафа на управление; $h_{\text{доп}}$ и $W_{\text{расп}}$ – допустимое значение ошибки наведения, и располагаемое нормальное ускорения БЛА.

Компенсация инерционности измерительного устройства

Для построения оптимального линейного фильтра при инерционном измерителе применим предварительное преобразование выражения (7), введя в рассмотрение преобразованный вектор оценивания [5]:

$$\mathbf{Z}^*(t) = \dot{\mathbf{Z}}(t) - \mathbf{L}\mathbf{Z}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{N}\eta(t), \quad (9)$$

который в скалярной форме запишется в виде:

$$\begin{cases} \dot{z}_1^*(t) = \dot{z}_1(t) + z_1(t) \cdot k_1 - z_2(t); \\ \dot{z}_2^*(t) = \dot{z}_2(t) + z_1(t) \cdot k_2. \end{cases} \quad (10)$$

Теперь задача аналитического построения фильтра свелась к рассмотренной в [5], но для преобразованного вектора оценивания $\mathbf{Z}^*(t)$.

С учетом (9) уравнения фильтра для рассматриваемой задачи запишутся в виде [5]:

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}}(t) = \mathbf{F}\hat{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{G}\mathbf{U}(t) + \mathbf{B}(t)(\mathbf{Z}^*(t) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}(t)), \quad \hat{\mathbf{X}}(t_0) = \langle X_0 \rangle, \quad (11)$$

или в скалярной форме

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = \hat{x}_2(t) + b_{11}(z_1^*(t) - k_1\hat{x}_1(t)) + b_{12}(z_2^*(t) - k_2\hat{x}_1(t)), & \hat{x}_1(t_0) = \hat{x}_{10}; \\ \dot{\hat{x}}_2(t) = \hat{x}_3(t) - W_p(t) + b_{21}(z_1^*(t) - k_1\hat{x}_1(t)) + b_{22}(z_2^*(t) - k_2\hat{x}_1(t)), & \hat{x}_2(t_0) = \hat{x}_{20}; \\ \dot{\hat{x}}_3(t) = -\frac{1}{T}\hat{x}_3(t) + b_{31}(z_1^*(t) - k_1\hat{x}_1(t)) + b_{32}(z_2^*(t) - k_2\hat{x}_1(t)), & \hat{x}_3(t_0) = \hat{x}_{30}. \end{cases} \quad (12)$$

Матрица коэффициентов усиления $\mathbf{B}(t)$ определяется из условия минимума среднего квадрата ошибки фильтрации [1, 2, 5]:

$$\mathbf{B}(t) = \mathbf{P}(t)\mathbf{C}^T(\mathbf{N}\mathbf{R}\mathbf{N}^T)^{-1}. \quad (13)$$

Входящая в (13) ковариационная матрица ошибок фильтрации $\mathbf{P}(t)$ симметрична, положительно определена и удовлетворяет уравнению Риккати [1, 2, 5]:

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = \mathbf{F}\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{F}^T - \mathbf{P}(t)\mathbf{C}^T(\mathbf{N}\mathbf{R}\mathbf{N}^T)^{-1}\mathbf{C}\mathbf{P}(t) + \mathbf{J}\mathbf{Q}\mathbf{J}^T, \quad \mathbf{P}(t_0) = \mathbf{P}_0. \quad (14)$$

Анализируя выражения (13), (14) с целью выявления условий компенсации инерционности поступающих на вход фильтра (11) измерений (7), выразим коэффициенты усиления b_{ij} (элементы матрицы $\mathbf{B}(t)$) через параметры системы и характеристики протекающих процессов. Так как матрица

$$\mathbf{N}\mathbf{N}^T = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1^2 & k_1 k_2 \\ k_1 k_2 & k_2^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

вырождена [3, 5], то, умножив левую и правую части (13) на (15), можно найти систему скалярных уравнений:

$$\begin{cases} b_{11} k_1 + b_{12} k_2 = \frac{1}{R} p_{11}; \\ b_{21} k_1 + b_{22} k_2 = \frac{1}{R} p_{12}; \\ b_{31} k_1 + b_{32} k_2 = \frac{1}{R} p_{13}. \end{cases} \quad (16)$$

Покажем, что условия оптимальной фильтрации выполняются независимо от выбора соотношения между b_{i1} и b_{i2} при следующих условиях:

$$b_{i1} k_1 = d p_{1i}; \quad b_{i2} k_2 = (1-d) p_{1i}; \quad d = \text{const}; \quad i = \overline{1,3}. \quad (17)$$

$$\text{Найдем передаточные функции } K_{z_1 x_1}(p) = \frac{z_1(p)}{x_1(p)} \text{ и } K_{z_2 x_1}(p) = \frac{z_2(p)}{x_1(p)}.$$

Используя преобразование Лапласа, систему уравнений (6) при нулевых начальных условиях преобразуем к виду:

$$\begin{cases} (k_1 + p) z_1(p) - z_2(p) = k_1 x_1(p); \\ k_2 z_1(p) + p z_2(p) = k_2 x_1(p). \end{cases} \quad (18)$$

Решая систему (18) методом Жордана [4], получим

$$\begin{cases} K_{z_1 x_1}(p) = \frac{z_1(p)}{x_1(p)} = \frac{k_1 p + k_2}{p^2 + k_1 p + k_2} = \frac{k_1 p + k_2}{A(p)}; \\ K_{z_2 x_1}(p) = \frac{z_2(p)}{x_1(p)} = \frac{k_2 p}{p^2 + k_1 p + k_2} = \frac{k_2 p}{A(p)}, \end{cases} \quad (19)$$

где $A(p) = p^2 + k_1 p + k_2$.

Линейную комбинацию $b_{i1} z_1^*(p) + b_{i2} z_2^*(p)$ ($i = \overline{1,3}$) в уравнении фильтра (12) с учетом (10), (17) и (19) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} b_{i1} z_1^*(p) + b_{i2} z_2^*(p) &= b_{i1} \left(\frac{d z_1(p)}{dt} + k_1 z_1(p) - z_2(p) \right) + b_{i2} \left(\frac{d z_2(p)}{dt} + k_2 z_1(p) \right) = \\ &= \frac{p_{1i}}{2R} \left(\frac{p(k_1 p + k_2)}{k_1 A(p)} + \frac{k_1 p + k_2}{A(p)} - \frac{k_2 p}{k_1 A(p)} + \frac{k_2 p^2}{k_2 A(p)} + \frac{k_1 p + k_2}{A(p)} \right) x_1(p) = \\ &= \frac{p_{1i}}{2RA(p)} (2p^2 + 2k_1 p + 2k_2) x_1(p) = \frac{1}{R} p_{1i} x_1(p). \end{aligned} \quad (20)$$

С учетом (17) и (20) систему уравнений (12) запишем в виде:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = \hat{x}_2(t) + \frac{p_{11}(t)}{R}(x_1(t) + \eta(t) - \hat{x}_1(t)) = \hat{x}_2(t) + \frac{p_{11}(t)}{R}(z(t) - \hat{x}_1(t)); \\ \dot{\hat{x}}_2(t) = \hat{x}_3(t) - W_p(t) + \frac{p_{12}(t)}{R}(x_1(t) + \eta(t) - \hat{x}_1(t)) = \hat{x}_3(t) - W_p(t) + \frac{p_{12}(t)}{R}(z(t) - \hat{x}_1(t)); \\ \dot{\hat{x}}_3(t) = -\frac{\hat{x}_3(t)}{T} + \frac{p_{13}(t)}{R}(x_1(t) + \eta(t) - \hat{x}_1(t)) = -\frac{\hat{x}_3(t)}{T} + \frac{p_{13}(t)}{R}(z(t) - \hat{x}_1(t)), \end{cases} \quad (21)$$

где $z(t) = x_1(t) + \eta(t)$.

Сравнивая уравнения (21) с аналогичными уравнениями из [6], можно сделать вывод о том, что условия оптимальной фильтрации выполняются независимо от выбора соотношения между b_{i1} и b_{i2} , но при этом должны быть выполнены условия (16).

Другими словами, при выполнении условия (17) и формировании сигнала в соответствии с (21) состояние системы (3) оценивается фильтром [5]:

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}}(t) = \mathbf{F}\hat{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{G}\mathbf{U}(t) + \mathbf{B}(t)(\mathbf{Z}(t) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}(t)), \quad \hat{\mathbf{X}}(t_0) = \mathbf{X}_0, \quad (22)$$

где $\mathbf{Z}(t)$ – вектор измерения (в данном случае это измеренное значение ошибки наведения $z(t) = \hat{h}(t)$, формируемое из состояний $z_1(t), z_2(t)$ инерционного измерителя (7) в соответствии с условиями (17) и (21)).

Таким образом, компенсация инерционности измерительного устройства осуществляется за счет добавления ошибки сопровождения к оценке угловой координаты, что позволяет уменьшить динамическую ошибку разности угловых координат цели и БЛА.

Синтез квазиоптимального контура управления

Для модели (1), (3), (21) и критерия качества (8) оптимальным является управление [6]:

$$W_p(t) = b_1 \hat{x}_1(t) + b_2 \hat{x}_2(t) + b_3 \hat{x}_3(t), \quad t \in [0; t_k]; \quad (23)$$

$$\text{где } b_1 = \frac{1}{\sqrt{k}}; \quad b_2 = 4\sqrt[4]{k}; \quad b_3 = \frac{(T + 4\sqrt[4]{4k})T}{T^4\sqrt[4]{4k} + \sqrt{k} + T^2}; \quad k = \frac{h_{\text{доп}}^2}{W_{\text{расп}}^2}.$$

Объединив (21), (23) и перейдя к изображениям по Лапласу при нулевых начальных условиях, получим систему уравнений, описывающих контур управления БЛА:

$$\begin{cases} W_p(p) - b_1 \hat{x}_1(p) - b_2 \hat{x}_2(p) - b_3 \hat{x}_3(p) = 0; \\ (p + M_1) \hat{x}_1(p) - \hat{x}_2(p) = M_1 x_1(p); \\ W_p(p) + M_2 \hat{x}_1(p) + p \hat{x}_2(p) - \hat{x}_3(p) = M_2 x_1(p); \\ M_3 \hat{x}_1(p) + \left(p + \frac{1}{T}\right) \hat{x}_3(p) = M_3 x_1(p). \end{cases} \quad (24)$$

где $M_i = \frac{1}{R} p_{1i}; \quad i = \overline{1,3}$.

Решая систему (24) методом Жордана [4], получим:

$$\begin{aligned} W_p(p) &= x_1(p) \times \\ &\times \frac{(M_1 b_1 + M_2 b_2 + M_3 b_3) p^2 + \left(\frac{M_1 b_1 + M_2 b_2}{T} + M_2 b_1 + M_3 b_2\right) p + M_3 b_1 + \frac{M_2 b_1}{T}}{p^3 + \frac{1 + M_1 T + b_2 T}{T} p^2 + \frac{M_1 + b_2 + b_1 T + M_1 b_2 T + M_2 T}{T} p + \frac{M_2 + M_3 T + b_1 + M_1 b_2 - M_3 b_3 T}{T}} = \\ &= \frac{K_w (T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} x_1(p), \end{aligned} \quad (25)$$

$$\text{где } K_w = \frac{M_3 b_1 T + M_2 b_1}{M_2 + M_3 T + b_1 + M_1 b_2 - M_3 b_3 T} ; a_1 = \frac{M_1 + b_2 + b_1 T + M_1 b_2 T + M_2 T}{M_2 + M_3 T + b_1 + b_2 M_1 - M_3 b_3 T} ;$$

$$a_3 = \frac{T}{M_2 + M_3 T + b_1 + b_2 M_1 - M_3 b_3 T} ; a_2 = \frac{1 + M_1 T + b_2 T}{M_2 + M_3 T + b_1 + b_2 M_1 - M_3 b_3 T} ;$$

$$T_1 = \sqrt{\frac{T(M_1 b_1 + M_2 b_2 + M_3 b_3)}{M_3 b_1 T + M_2 b_1}} ; \xi_1 = \frac{M_1 b_1 + M_2 b_2 + (M_2 b_1 + M_3 b_2) T}{2\sqrt{T(M_1 b_1 + M_2 b_2 + M_3 b_3)(M_3 b_1 T + M_2 b_1)}} .$$

Знаменатель выражения (25) представляет собой полином третьей степени. Поэтому хотя бы один из его корней является действительным числом. В результате передаточная функция квазиоптимального контура телеуправления, обеспечивающая выполнение критерия качества (8), примет вид

$$W_p(p) = \frac{K_w (T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)}{p^2 (1 + pT_3) (T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1)} x_1(p). \quad (26)$$

Пример. Дано: 1) дисперсия нормального ускорения цели при маневре $\sigma_m^2 = 400 \text{ м}^2/\text{с}^4$, среднее время переключения знака ускорения $T = 5 \text{ с}$; 2) СКО ошибки угловых измерений $\sigma_\varepsilon = 1 \text{ угл. мин}$, время корреляции шума измерений $T_{\text{ш}} = 0,06 \text{ с}$; 3) величина допустимого значение ошибки наведения $h_{\text{доп}} = 25 \text{ м}$, располагаемое нормальное ускорения БЛА $W_{\text{расп}} = 30 \text{ м}/\text{с}^2$.

Необходимо определить параметры передаточной функции (26) при различных дальностях до точки встречи r_b . Результаты вычислений приведены в таблице.

Параметры контура управления

Дальность r_b , км	Значения параметров контура управления					
	K_w , с^{-2}	T_1 , с	ξ_1	T_3 , с	T_2 , с	ξ_2
3	6,4	1,26	0,741	4,356	0,171	0,707
5	5,227	1,326	0,745	4,482	0,197	0,707
7	4,541	1,376	0,747	4,555	0,215	0,707
10	3,886	1,435	0,75	4,624	0,236	0,707
15	3,228	1,511	0,754	4,693	0,262	0,707

Как видно из примера, постоянная времени аperiodического звена T_3 приблизительно определяется временем корреляции нормального ускорения цели ($T = 5 \text{ с}$). Дифференцирующее звено второго порядка с постоянной времени T_1 обеспечивает нормальные запасы устойчивости по фазе. Опорная частота колебательного звена с постоянной времени T_2 находится за частотой среза. Логарифмические амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ) контура управления представлены на рис. 2.

Анализ зависимости параметров контура телеуправления при различных дальностях до точки встречи r_b показал, что с увеличением r_b коэффициент преобразования разомкнутого контура управления K_w уменьшается, постоянные времени T_2 увеличиваются, а остальные параметры контура существенно не изменяются.

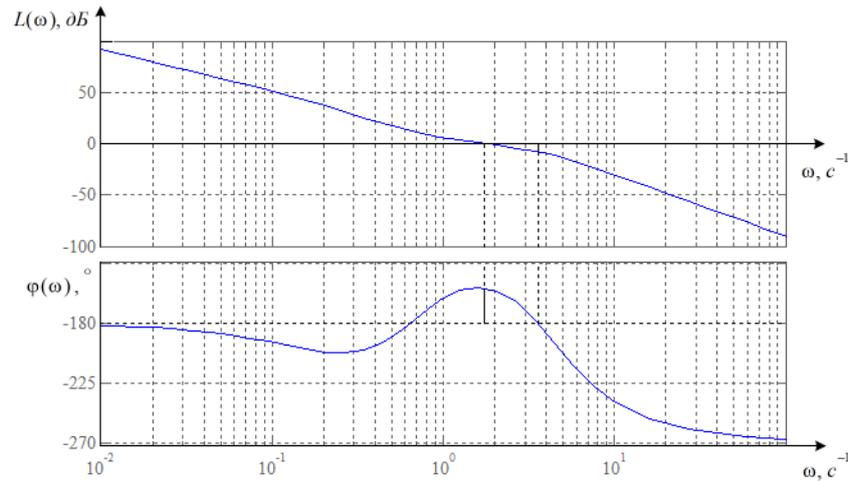


Рис. 2. ЛАЧХ и ЛФЧХ контура управления при $r_B = 10$ км

Заключение

В статье проведен синтез квазиоптимального контура телеуправляемого БЛА с учетом инерционности координатного блока цели. Анализ ЛАЧХ и ЛФЧХ синтезированного контура показал необходимость компенсации инерционности измерительного устройства за счет добавления ошибки сопровождения к оценке угловой координаты. Такой подход позволил избавиться от динамической ошибки разности угловых координат цели и БЛА.

Анализ параметров синтезированного квазиоптимального контура показал, что при полете БЛА на большие дальности необходимо сужать полосу пропускания системы за счет уменьшения коэффициента преобразования контура и увеличения постоянной времени фильтра устройства выработки команд управления.

THE SYNTHESIS OF QUASIOPTIMAL CONTOUR OF THE LONG-DISTANCE DRONE'S COMMAND AND CONTROL WITH THE INERTIA MEASURING DEVICE

A.A. KUN, S.A. SHABAN, A.M. EROMIN, A.L. KOCHEROV

Abstract

The problem of synthesis of a quasioptimal contour of the long-distance drone's command and control considering the inertia of the target coordinate unit is solved. The mean of the compensation of the inertia measuring device is offered. The analysis of the distance influence on the parameters of the long-distance drone's command and control contour before the contact of the drone with the target is carried out.

Список литературы

1. Кун А.А., Лукьянов В.Ф., Шабан С.А. Основы построения систем управления ракетами. Минск, 2001.
2. Орлов Е.В. Проектирование систем телеуправления. Ижевск, 2000.
3. Батков А.М., Тарханов И.Б. Системы телеуправления. М., 1971.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., 1973.
5. Казаков И.Е., Гладков Д.И. Методы оптимизации стохастических систем. М., 1987.
6. Кун А.А., Шабан С.А., Еромин А.М. и др. // Сб. науч. статей Воен. акад. РБ. 2014. № 26. С. 95–102.