

ОШИБКИ САМОНАСТРОЙКИ АВТОКОМПЕНСАТОРА ШУМОВЫХ ПОМЕХ В РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ С НЕПРЕРЫВНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

The paper is devoted to the dynamic errors of self-adjustment circuits sidelobe canceler of jammer for the radar with high speed of continuous angle scanning. Is considered one channel canceler with shaping filter, which designed for the sinusoidal changing of the adaptive weight. The estimation of efficiency of sidelobe canceler is obtained for the case of dynamic errors.

Задача анализа эффективности автокомпенсаторов шумовых помех для радиолокационной станции (РЛС) с быстрым непрерывным сканированием диаграммы направленности является актуальной. В этом случае основным фактором, влияющим на эффективность компенсации, выступают динамические ошибки. Синтез цепей фильтрации для такого автокомпенсатора в предположении изменения задающего воздействия по гармоническому закону описан в работе [1]. Получим выражения для динамических ошибок и эффективности автокомпенсатора для гармонического и случайного задающих воздействий.

Эквивалентная структурная схема измерителя весового коэффициента

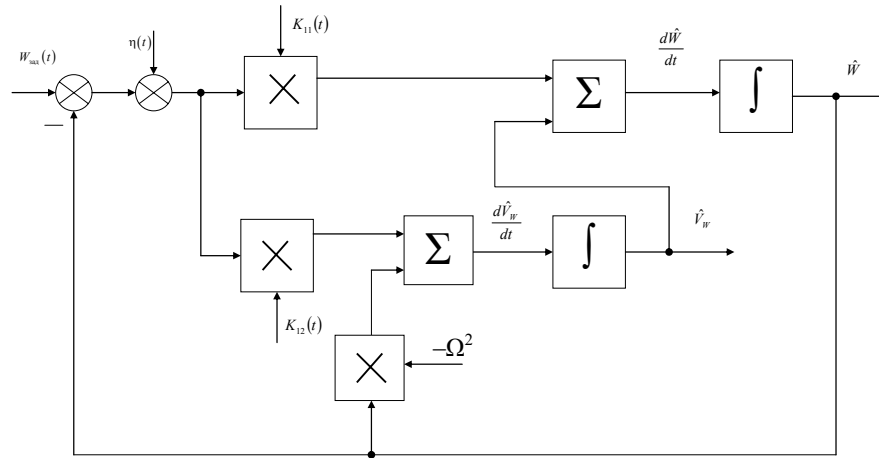
Уравнения фильтрации весового коэффициента автокомпенсатора шумовой помехи в РЛС с непрерывным сканированием для задающего гармонического воздействия могут быть представлены в следующем виде [1]:

$$\frac{d\hat{W}}{dt} = \hat{V}_w + K_{11}(t) \cdot [W_{\text{зад}}(t) - \hat{W}(t) + \eta(t)], \quad (1)$$

$$\frac{d\hat{V}_w}{dt} = -\Omega^2 \cdot \hat{W} + K_{12}(t) \cdot [W_{\text{зад}}(t) - \hat{W}(t) + \eta(t)], \quad (2)$$

где $\hat{W}$ – измеренное значение весового коэффициента; $\hat{V}_w$ – измеренное значение скорости изменения весового коэффициента; $K_{11}(t)$ – коэффициент фильтрации сигнала ошибки по положению; $K_{12}(t)$ – коэффициент фильтрации сигнала ошибки по скорости; Ω – постоянная величина, характеризующая скорость углового сканирования; $W_{\text{зад}}(t)$ – задающее воздействие измерителя; $\eta(t)$ – случайная составляющая сигнала ошибки.

Эквивалентная структурная схема измерителя весового коэффициента автокомпенсатора в соответствии с уравнениями (1) и (2) приведена на рисунке.



Эквивалентная структурная схема измерителя весового коэффициента

Характеристики контура измерения весового коэффициента

В соответствии со структурной схемой передаточная функция разомкнутого измерителя весового коэффициента описывается выражением

$$K_p(p) = \frac{K_{12} + K_{11}p}{\Omega^2 + p^2}.$$

Передаточную функцию замкнутого измерителя найдем следующим образом:

$$K(p) = \frac{\hat{W}(p)}{W_{\text{зад}}(p)} = \frac{K_p(p)}{1 - K_p(p)} = \frac{K_{12} + K_{11}p}{(K_{12} + \Omega^2) + K_{11}p + p^2}.$$

Аналогично можно получить выражение для полосы пропускания замкнутого измерителя весовых коэффициентов:

$$\Delta f_{0W} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |K(j\omega)|^2 d\omega = \frac{K_{11}}{2} + \frac{K_{12}^2}{2 \cdot (K_{12} + \Omega^2) \cdot K_{11}}.$$

Передаточная функция динамических ошибок описывается следующей формулой:

$$K_{\text{ош}}(p) = \frac{W_{\text{зад}}(p) - \hat{W}(p)}{W_{\text{зад}}(p)} = 1 - K(p) = \frac{(\Omega^2 + p^2)}{(K_{12} + \Omega^2) + K_{11}p + p^2}.$$

При переходе в частотную область с учетом соотношения $p = j\omega$ можно получить

$$K_{\text{ош}}(j\omega) = \frac{(\omega^2 - \Omega^2)}{(\omega^2 - \Omega^2) - K_{12} - K_{11} \cdot j\omega}. \quad (3)$$

Для обеспечения приемлемого уровня динамических ошибок фильтрации весового коэффициента должно соблюдаться условие: $K_{12} \gg \omega^2$, $K_{12} \gg K_{11}\omega$. В этом случае выражение (3) упростится:

$$K_{\text{ош}}(j\omega) \approx \frac{(\omega^2 - \Omega^2)}{K_{12}}. \quad (4)$$

Характеристики контура измерения скорости весового коэффициента

В соответствии с рисунком передаточная характеристика разомкнутого контура фильтрации скорости весового коэффициента описывается выражением

$$K_{pV}(p) = -\frac{p}{K_{11} + p} \cdot \frac{K_{11} \cdot \left(\Omega^2 - \frac{K_{12}}{K_{11}} p \right)}{\Omega^2 + p^2}.$$

Передаточную функцию замкнутого устройства фильтрации скорости найдем следующим образом:

$$K_{0V}(p) = \frac{\hat{V}_W(p)}{W_{\text{зад}}(p)} = \frac{K_{pV}(p)}{1 - K_{pV}(p) \cdot \frac{1}{p}} = \frac{-K_{11} \cdot \Omega^2 + K_{12} \cdot p}{(K_{12} + \Omega^2) + K_{11}p + p^2}. \quad (5)$$

В соответствии с выражением (5) можно получить полосу пропускания замкнутого устройства фильтрации скорости весового коэффициента:

$$\Delta f_{0V} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |K_{0V}(j\omega)|^2 d\omega = \frac{K_{12}^2}{2K_{11}} + \frac{K_{11} \cdot \Omega^4}{2(K_{12} + \Omega^2)}.$$

Передаточная функция ошибок скорости относительно задающего воздействия имеет вид

$$K_{\text{ош}0V}(p) = \frac{W_{\text{зад}}(p)p - \hat{V}(p)}{W_{\text{зад}}(p)} = p - K_{0V}(p) = \frac{(\Omega^2 + p^2) \cdot (K_{11} + p)}{(K_{12} + \Omega^2) + K_{11}p + p^2}. \quad (6)$$

После перехода в частотную область будем иметь

$$K_{\text{ош}0V}(j\omega) = \frac{(\omega^2 - \Omega^2) \cdot (K_{11} + j\omega)}{\omega^2 - K_{11}j\omega - (K_{12} + \Omega^2)}.$$

Для схемы фильтрации скорости можно получить следующие приближенные выражения для ошибок ($K_{12} \gg K_{11}\omega$, $K_{11} \gg \omega$):

$$K_{\text{ош}0V}(j\omega) \approx \frac{(\omega^2 - \Omega^2) \cdot K_{11}}{K_{12}}.$$

Динамические ошибки самонастройки при гармоническом задающем воздействии

Пусть задающее воздействие автокомпенсатора подчиняется гармоническому закону:

$$W_{\text{зад}} = A_W \cos(\omega t + \varphi_W).$$

В этом случае согласно (4) динамическая ошибка измерения весового коэффициента описывается следующим приближенным выражением:

$$\Delta W_{\text{дин}} \approx -A_W \cos(\omega t + \varphi_W) \cdot \frac{(\omega^2 - \Omega^2)}{K_{12}}.$$

Соответственно оценочное значение весового коэффициента описывается выражением

$$\hat{W} = W_{\text{зад}} - \Delta W_{\text{дин}} = \hat{A}_W \cos(\omega t + \hat{\varphi}_W) = A_W \cos(\omega t + \varphi_W) \cdot \left[1 + \frac{(\omega^2 - \Omega^2)}{K_{12}} \right].$$

Таким образом, динамическая ошибка измерения весового коэффициента приводит к изменению его амплитуды при неизменном значении фазы.

Точное значение скорости изменения задающего воздействия описывается как

$$V_W = -A_W \omega \sin(\omega t + \varphi_W) = -A_V \sin(\omega t + \varphi_W).$$

Динамическая ошибка измерения скорости весового коэффициента имеет вид

$$\Delta V_{\text{дин}} \approx -A_W \cos(\omega t + \varphi_W) \cdot \frac{(\omega^2 - \Omega^2)}{K_{12}} \cdot K_{11}.$$

Соответственно оценочное значение скорости весового коэффициента

$$\hat{V}_W = V_W - \Delta V_{\text{дин}} = -\hat{A}_V \sin(\omega t + \phi_W + \Delta\phi_V),$$

где

$$\hat{A}_V = A_W \omega \cdot \sqrt{1 + \left[\frac{(\omega^2 - \Omega^2)}{\omega \cdot K_{12}} K_{11} \right]^2} = A_W \sqrt{\omega^2 + \left[\frac{(\omega^2 - \Omega^2)}{K_{12}} K_{11} \right]^2};$$

$$\Delta\phi_V = -\arctg \frac{(\omega^2 - \Omega^2)}{\omega \cdot K_{12}} K_{11} = -\arcsin \left[\frac{1}{\hat{A}_V} \frac{(\omega^2 - \Omega^2)}{\omega \cdot K_{12}} K_{11} \right].$$

Отбрасывая ошибки второго порядка малости, последнее выражение можно записать в следующем виде:

$$\hat{V}_W \approx -A_W \omega \sin \left(\omega t + \phi_W - \frac{(\omega^2 - \Omega^2)}{\omega \cdot K_{12}} \cdot K_{11} \right).$$

Таким образом, динамическая ошибка измерения скорости весового коэффициента приводит к смещению фазы измеренного значения скорости при неизменной амплитуде.

Динамические ошибки при случайном задающем воздействии

Пусть спектр задающего воздействия соответствует колебательному звену и имеет вид

$$g_W(i\omega) = \frac{1}{(i\omega)^2 + 2\alpha \cdot i\omega + \omega_0^2}. \quad (7)$$

Дисперсия такого задающего воздействия описывается выражением

$$\sigma_{W_{\text{зад}}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |g_W(i\omega)|^2 \omega d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{1}{\omega_0^2 + 2\alpha(i\omega) + (i\omega)^2} \right|^2 d\omega = \frac{1}{4\omega_0^2 \alpha}.$$

Дисперсия динамических ошибок самонастройки весового коэффициента может быть получена следующим образом [2]:

$$\sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |g_W(i\omega)|^2 |K_{\text{ош}}(j\omega)|^2 d\omega.$$

В частности, с учетом выражений (3) и (7) можно получить

$$\sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\alpha_0 + \alpha_2(i\omega)^2}{\beta_0 + \beta_1(i\omega) + \beta_2(i\omega)^2 + \beta_3(i\omega)^3 + \beta_4(i\omega)^4} \right|^2 d\omega,$$

где $\alpha_0 = \Omega^2$; $\alpha_2 = 1$; $\beta_0 = (K_{12} + \Omega^2)\omega_0^2$; $\beta_1 = 2\alpha(K_{12} + \Omega^2) + K_{11}\omega_0^2$; $\beta_2 = (K_{12} + \Omega^2) + 2\alpha K_{11} + \omega_0^2$; $\beta_3 = K_{11} + 2\alpha$; $\beta_4 = 1$.

После использования интеграла Парсеваля 4-го порядка выражение для дисперсии динамической ошибки измерения весового коэффициента примет окончательный вид:

$$\sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2 = \sigma_{W_{\text{зад}}}^2 \frac{\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega_0^2} \right)^2 + 2\alpha \left(\frac{K_{12}^2}{(K_{12} + \Omega^2)K_{11}\omega_0^2} + \frac{\Omega^4(2\alpha + K_{11})}{\omega_0^4(K_{12} + \Omega^2)} \right)}{\left(\frac{K_{11}^2}{\omega_0^2} + \left(1 - \frac{K_{12} + \Omega^2}{\omega_0^2} \right)^2 + 2\alpha \left[\frac{(K_{12} + \Omega^2)K_{11}}{\omega_0^4} + \frac{K_{11}}{\omega_0^2} + 2\alpha \frac{(K_{12} + \Omega^2)}{\omega_0^4} \right] \right)}. \quad (8)$$

При выполнении условий $K_{12} \gg \omega_0^2$, $K_{11} \gg \omega_0$, $K_{12} \gg K_{11}\omega_0$ выражение (8) примет более простой вид:

$$\sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2 \approx \sigma_{W_{\text{зад}}}^2 \frac{\omega_0^4}{K_{12}^2} \left(\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega_0^2} \right)^2 + 2\alpha \left(\frac{K_{12}}{K_{11}\omega_0^2} + \frac{\Omega^4 K_{11}}{\omega_0^4 K_{12}} \right) \right). \quad (9)$$

Дисперсия динамической ошибки измерения скорости весового коэффициента описывается общим выражением:

$$\sigma_{\Delta V_{\text{дин}}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |g_W(i\omega)|^2 |K_{\text{ош}0V}(j\omega)|^2 d\omega. \quad (10)$$

С учетом (6) и (7) выражение (10) конкретизируется в виде

$$\sigma_{\Delta V_{\text{дин}}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\alpha_{0V} + \alpha_{1V}(i\omega) + \alpha_{2V}(i\omega)^2 + \alpha_{3V}(i\omega)^3}{\beta_0 + \beta_1(i\omega) + \beta_2(i\omega)^2 + \beta_3(i\omega)^3 + \beta_4(i\omega)^4} \right|^2 d\omega,$$

где $\alpha_{0V} = \Omega^2 K_{11}$; $\alpha_{1V} = \Omega^2$; $\alpha_{2V} = K_{11}$; $\alpha_{3V} = 1$.

После использования интеграла Парсеваля дисперсия динамической ошибки измерения скорости весового коэффициента примет вид

$$\sigma_{\Delta V_{\text{дин}}}^2 = \sigma_{W_{\text{зад}}}^2 \frac{(\omega_0^2 + K_{11}^2) \left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 2\alpha \cdot F_V}{\left(\frac{K_{11}^2}{\omega_0^2} + \left(1 - \frac{K_{12} + \Omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 2\alpha \left[\frac{(K_{12} + \Omega^2) K_{11}}{\omega_0^4} + \frac{K_{11}}{\omega_0^2} + 2\alpha \frac{(K_{12} + \Omega^2)}{\omega_0^4} \right] \right)}, \quad (11)$$

где $F_V = K_{11} \left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega_0^2} + \frac{K_{12}}{\omega_0^2}\right) + \frac{K_{12}^2}{K_{11}\omega_0^2} + 2\alpha \frac{K_{12} + \Omega^2}{\omega_0^2} + \frac{\Omega^4}{\omega_0^4} \frac{K_{11}}{K_{12} + \Omega^2} (\omega_0^2 + 2\alpha K_{11} + K_{11}^2)$.

При выполнении условий $K_{12} \gg \omega_0^2$, $K_{11} \gg \omega_0$, $K_{12} \gg K_{11}\omega_0$ выражение (11) упростится:

$$\sigma_{\Delta V_{\text{дин}}}^2 \approx \sigma_{W_{\text{зад}}}^2 \frac{\omega_0^4}{K_{12}^2} K_{11}^2 \left(\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 2\alpha \left[\frac{K_{12}}{K_{11}\omega_0^2} + \frac{\Omega^4}{\omega_0^4} \frac{K_{11}}{K_{12}} \right] \right) = \sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2 K_{11}^2.$$

Влияния ошибок измерения весового коэффициента на эффективность компенсации

Эффективность автокомпенсации, обусловленная динамическими ошибками измерения весового коэффициента ΔW , представляет собой отношение среднего квадрата модуля задающего воздействия к среднему значению квадрата модуля ошибок измерения весового коэффициента и описывается следующим общим выражением:

$$v_{\Delta W_{\text{дин}}} = \frac{\overline{|W_{\text{зад}}|^2}}{\overline{|\Delta W|^2}} = \frac{\sigma_{W_{\text{зад}}}^2}{\sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2}. \quad (12)$$

В частности, для расчета эффективности автокомпенсации, обусловленной динамическими ошибками самонастройки, с учетом (9) и (12) можно рекомендовать следующее приближенное выражение:

$$v_{\Delta W_{\text{дин}}} = \frac{\sigma_{W_{\text{зад}}}^2}{\sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2} \approx \frac{K_{12}^2}{\omega_0^4 \left(\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 2\alpha \left(\frac{K_{12}}{K_{11}\omega_0^2} + \frac{\Omega^4}{\omega_0^4} \frac{K_{11}}{K_{12}} \right) \right)}.$$

Таким образом, получены выражения для динамических ошибок самонастройки одноканального автокомпенсатора шумовых помех в РЛС с быстрым непрерывным сканированием. С этой целью была использована модель задающего воздействия, соответствующая колебательному звену. Показано, что в первом приближении динамические ошибки фильтрации весового коэффициента приводят к изменению его амплитуды, а динамические ошибки фильтрации скорости весового коэффициента – к изменению ее фазы. При совпадении параметра гармонической обратной связи автокомпенсатора Ω и центральной частоты спектра задающего воздействия ω_0 происходит минимизация динамических ошибок, уровень которых в этом случае определяется параметром α , характеризующим ширину спектра задающего воздействия. Предложены выражения, позволяющие оценить влияние динамических ошибок самонастройки на эффективность автокомпенсации шумовых помех.

1. Давыденко И.Н., Папушой В.И., Храпун И.С. // Электроника. 2008. № 10.

2. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика. М., 1990.

Поступила в редакцию 03.11.08.

Игорь Николаевич Давыденко – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НПРУП «АЛЕВКУРП».

Виталий Иванович Папушой – директор НПРУП «АЛЕВКУРП».

Василий Сергеевич Садов – кандидат технических наук, доцент кафедры интеллектуальных систем.

Игорь Станиславович Храпун – ведущий конструктор НПРУП «АЛЕВКУРП».