

УДК 621.396.98

ОШИБКИ САМОНАСТРОЙКИ АВТОКОМПЕНСАТОРА ШУМОВЫХ ПОМЕХ

И.С. ХРАПУН, И.Н. ДАВЫДЕНКО, В.И. ПАПУШОЙ

*Научно-производственное республиканское унитарное предприятие "Алевкурп"
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 4 сентября 2008*

Рассматриваются ошибки самонастройки весового коэффициента автокомпенсатора шумовых помех для РЛС с линейным сканированием. Для анализа выбран одноканальный автокомпенсатор, цепи фильтрации весового коэффициента которого реализуют второй порядок астатизма. Раздельно рассматриваются динамические, флуктуационные ошибки самонастройки и ошибки экстраполяции весового коэффициента. В качестве модели задающего воздействия выбрана модель, соответствующая колебательному звену.

Ключевые слова: автокомпенсатор шумовых помех, ошибки самонастройки.

Введение

Задача анализа ошибок самонастройки автокомпенсаторов шумовых помех для РЛС с быстрым непрерывным сканированием диаграммы направленности актуальна. В этом случае основным фактором, влияющим на эффективность компенсации, являются динамические ошибки и ошибки экстраполяции.

Эквивалентная структурная схема измерителя весового коэффициента

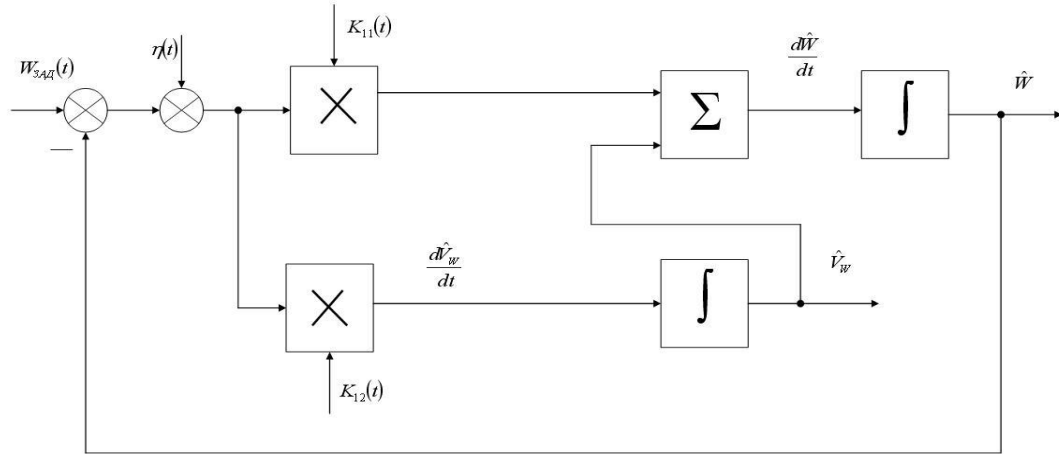
Уравнения фильтрации весового коэффициента автокомпенсатора шумовой помехи с вторым порядком астатизма могут быть представлены в следующем виде:

$$\frac{dW}{dt} = \dot{W}_w + K_{11} t \left[W_{\text{зад}} t - W t + \eta t \right], \quad (1)$$

$$\frac{d\dot{W}_w}{dt} = K_{12} t \left[W_{\text{зад}} t - W t + \eta t \right], \quad (2)$$

где W — измеренное значение весового коэффициента; \dot{W}_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; $W_{\text{зад}} t$ — задающее воздействие измерителя; ηt — случайная составляющая сигнала ошибки.

В соответствии с приведенными уравнениями эквивалентная структурная схема измерителя весового коэффициента автокомпенсатора представлена на рисунке.



Эквивалентная структурная схема измерителя весового коэффициента автокомпенсатора

Характеристики контура измерения весового коэффициента

Передаточная функция замкнутого измерителя имеет следующий вид [1]:

$$K_p = \frac{W_{\text{ЗАД}} p}{W_{\text{ЗАД}} p} = \frac{K_p p}{1 - K_p p} = \frac{K_{12} + K_{11}p}{K_{12} + K_{11}p + p^2}. \quad (3)$$

Соответственно полоса пропускания замкнутого измерителя весовых коэффициентов:

$$\Delta f_{\text{ОВ}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |K(j\omega)|^2 d\omega = \frac{K_{11}}{2} + \frac{K_{12}}{2K_{11}}. \quad (4)$$

Передаточная функция динамических ошибок описывается следующим выражением:

$$K_{\text{ОШ}} p = \frac{W_{\text{ЗАД}} p - W_{\text{ЗАД}} p}{W_{\text{ЗАД}} p} = 1 - K_p = \frac{p^2}{K_{12} + K_{11}p + p^2}. \quad (5)$$

С переходом в частотную область с учетом соотношения $p = j\omega$ можно получить:

$$K_{\text{ОШ}}(j\omega) = \frac{\omega^2}{\omega^2 - K_{12} - K_{11}j\omega}. \quad (6)$$

Для обеспечения приемлемого уровня динамических ошибок фильтрации весового коэффициента должно соблюдаться условие: $K_{12} \gg \omega^2$, $K_{12} \gg K_{11}\omega^2$. В этом случае выражение (6) упрощается:

$$K_{\text{ОШ}}(j\omega) \approx -\frac{\omega^2}{K_{12}}. \quad (7)$$

Характеристики контура измерения скорости весового коэффициента

Передаточная функция замкнутого устройства фильтрации скорости имеет вид

$$K_{\text{ОВ}} p = \frac{v_w p}{W_{\text{ЗАД}} p} = \frac{K_{12}p}{K_{12} + K_{11}p + p^2}. \quad (8)$$

Полоса пропускания замкнутого устройства фильтрации скорости весового коэффициента определяется выражением:

$$\Delta f_{0V} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |K_{0V}(j\omega)|^2 d\omega = \frac{K_{12}^2}{2K_{11}}. \quad (9)$$

Передаточная функция динамической ошибки скорости, привязанная к задающему воздействию, получается следующим образом:

$$K_{0ш0V}(p) = \frac{W_{3АД}(p)}{W_{3АД}(p)} = p - K_{0V} = \frac{p^2 K_{11} + p}{K_{12} + K_{11}p + p^2}. \quad (10)$$

После перехода в частотную область получим:

$$K_{0ш0V}(j\omega) = -\frac{\omega^2}{j\omega} \frac{j\omega + K_{11}}{j\omega + K_{11} + K_{12}}. \quad (11)$$

Для схемы фильтрации скорости можно получить приближенные выражения для ошибок ($K_{12} \gg \omega^2$, $K_{12} \gg K_{11}\omega^2$):

$$K_{0ш0V}(j\omega) \approx -\frac{\omega^2 K_{11}}{K_{12}}. \quad (12)$$

Динамические ошибки при гармоническом задающем воздействии

Пусть задающее воздействие автокомпенсатора подчиняется гармоническому закону:

$$W_{3АД} = A_W \cos(\omega t + \varphi_W). \quad (13)$$

В этом случае в соответствии с выражением (7) динамическая ошибка измерения весового коэффициента имеет вид

$$\Delta W_{дин} \approx -A_W \cos(\omega t + \varphi_W) \frac{\omega^2}{K_{12}}. \quad (14)$$

Соответственно оценочное значение весового коэффициента описывается выражением

$$\widehat{W} = W_{3АД} - \Delta W_{дин} = A_W \cos(\omega t + \varphi_W) \left[1 + \frac{\omega^2}{K_{12}} \right]. \quad (15)$$

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

Точное значение скорости изменения задающего воздействия описывается выражением:

$$V_W = -A_W \omega \sin(\omega t + \varphi_W) = -A_V \sin(\omega t + \varphi_V). \quad (16)$$

Динамическая ошибка измерения скорости весового коэффициента в соответствии с выражением (12) имеет приближенный вид

$$\Delta V_{дин} \approx -A_V \cos(\omega t + \varphi_V) \frac{\omega^2}{K_{12}} K_{11}. \quad (17)$$

Соответственно оценочное значение скорости весового коэффициента:

$$\widehat{V}_W = V_W - \Delta V_{дин} = -A_V \sin(\omega t + \varphi_V) + \Delta \varphi_V. \quad (18)$$

где $\mathcal{A}_V = A_w \omega \sqrt{1 + \left[\frac{\omega}{K_{12}} K_{11} \right]^2}$; $\Delta\phi_V = -\text{arctg} \frac{\omega}{K_{12}} K_{11} = -\arcsin \left[\frac{1}{\mathcal{A}_V} \frac{\omega}{K_{12}} K_{11} \right]$.

Отбрасывая ошибки второго порядка малости, выражение (18) упростим следующим образом:

$$\mathcal{V}_W \approx -A_w \omega \sin \left(\omega t + \phi_W - \frac{\omega}{K_{12}} K_{11} \right). \quad (19)$$

Таким образом, динамическая ошибка измерения скорости весового коэффициента в первом приближении 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

$$g_W \ i\omega = \frac{1}{i\omega^2 + 2\alpha i\omega + \omega_0^2}. \quad (20)$$

Дисперсия такого задающего воздействия описывается выражением

$$\sigma_{W_{\text{зад}}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |g_W \ i\omega|^2 \omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{1}{\omega_0^2 + 2\alpha i\omega + i\omega^2} \right|^2 d\omega = \frac{1}{4\omega_0^2 \alpha}. \quad (21)$$

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

$$\sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |g_W \ i\omega|^2 |K_{\text{ОШ}} \ j\omega|^2 d\omega. \quad (22)$$

В частности, с учетом выражений (20) и (5) можно получить:

$$\sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\alpha_2 \ i\omega^2}{\beta_0 + \beta_1 \ i\omega + \beta_2 \ i\omega^2 + \beta_3 \ i\omega^3 + \beta_4 \ i\omega^4} \right|^2 d\omega, \quad (23)$$

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

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

$$\sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2 = \sigma_{W_{\text{зад}}}^2 \frac{1 + 2\alpha \frac{K_{12}}{K_{11}\omega_0^2}}{1 + \frac{K_{11}^2}{\omega_0^2} + \frac{K_{12}^2}{\omega_0^4} - 2 \frac{K_{12}}{\omega_0^2} + 2\alpha \left[\frac{K_{12}K_{11}}{\omega_0^4} + \frac{K_{11}}{\omega_0^2} + 2\alpha \frac{K_{12}}{\omega_0^4} \right]}. \quad (24)$$

Для монохроматического задающего воздействия ($\alpha \rightarrow 0$) выражение (24) изменится следующим образом:

$$\sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2 = \sigma_{W_{\text{зад}}}^2 \frac{1}{1 + \frac{K_{11}^2}{\omega_0^2} + \frac{K_{12}^2}{\omega_0^4} - 2 \frac{K_{12}}{\omega_0^2}}. \quad (25)$$

При выполнении условий $K_{12} \gg \omega_0^2$, $K_{11} \gg \omega_0$, $K_{12} \gg K_{11}\omega_0$ выражение (24) примет более простой вид

$$\sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2 \approx \sigma_{W_{\text{зАд}}}^2 \frac{\omega_0^4}{K_{12}^2} \left(1 + 2\alpha \frac{K_{12}}{K_{11}\omega_0^2} \right). \quad (26)$$

Дисперсия динамической ошибки измерения скорости весового коэффициента описывается следующим общим выражением

$$\sigma_{\Delta V_{\text{дин}}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |g_w i\omega|^2 |K_{\text{ошВ}} j\omega|^2 d\omega. \quad (27)$$

С учетом выражений (20) и (10) выражение (27) конкретизируется в виде

$$\sigma_{\Delta V_{\text{дин}}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\alpha_{2V} i\omega^2 + \alpha_{3V} i\omega^3}{\beta_0 + \beta_1 i\omega + \beta_2 i\omega^2 + \beta_3 i\omega^3 + \beta_4 i\omega^4} \right|^2 d\omega, \quad (28)$$

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

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

$$\sigma_{\Delta V_{\text{дин}}}^2 = \sigma_{W_{\text{зАд}}}^2 \frac{\omega_0^2 + K_{11}^2 + 2\alpha \left[K_{11} + \frac{K_{12}^2}{K_{11}\omega_0^2} + \frac{K_{12}K_{11}}{\omega_0^2} + 2\alpha \frac{K_{12}}{\omega_0^2} \right]}{1 + \frac{K_{11}^2}{\omega_0^2} + \frac{K_{12}^2}{\omega_0^4} - 2\frac{K_{12}}{\omega_0^2} + 2\alpha \left[\frac{K_{12}K_{11}}{\omega_0^4} + \frac{K_{11}}{\omega_0^2} + 2\alpha \frac{K_{12}}{\omega_0^4} \right]}. \quad (29)$$

Для монохроматического задающего воздействия ($\alpha \rightarrow 0$) дисперсия измерения скорости описывается выражением

$$\sigma_{\Delta V_{\text{дин}}}^2 = \sigma_{W_{\text{зАд}}}^2 \frac{\omega_0^2 + K_{11}^2}{1 + \frac{K_{11}^2}{\omega_0^2} + \frac{K_{12}^2}{\omega_0^4} - 2\frac{K_{12}}{\omega_0^2}}. \quad (30)$$

При выполнении условий $K_{12} \gg \omega_0^2$, $K_{11} \gg \omega_0$, $K_{12} \gg K_{11}\omega_0$ выражение (30) примет более простой вид:

$$\sigma_{\Delta V_{\text{дин}}}^2 \approx \sigma_{W_{\text{зАд}}}^2 \frac{\omega_0^4}{K_{12}^2} K_{11}^2 \left(1 + 2\alpha \frac{K_{12}}{K_{11}\omega_0^2} \right) = \sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2 K_{11}^2. \quad (31)$$

Флуктуационные ошибки самонастройки

Дисперсии флуктуационных ошибок фильтрации весового коэффициента и его скорости описываются выражениями

$$\sigma_{\Delta W_{\text{Фл}}}^2 = S_{W.\text{ЭКВ}} \Delta f_{0W} = S_{W.\text{ЭКВ}} \left(\frac{K_{11}}{2} + \frac{K_{12}}{2K_{11}} \right), \quad (32)$$

$$\sigma_{\Delta V_{\text{Фл}}}^2 = S_{W.\text{ЭКВ}} \Delta f_{0V} = S_{W.\text{ЭКВ}} \left(\frac{K_{12}^2}{2K_{11}} \right), \quad (33)$$

где $S_{w.ЭКВ}$ — эквивалентная спектральная плотность возмущающего воздействия измерителя весового коэффициента автокомпенсатора.

Анализ ошибок экстраполяции задающего воздействия

Предположим, что в момент времени $t = 0$ система измерения переходит в режим экстраполяции при размыкании обратной связи либо за счет прерывистого характера помехи либо за счет принудительного бланкирования сигнала ошибки на время действия передатчика и мощных ближайших мешающих отражений. Динамическую ошибку экстраполяции (составляющую ошибки экстраполяции, обусловленную динамическими ошибками фильтрации) можно записать в виде

$$\Delta W_{\text{дин.Э}} \approx \Delta W_{\text{дин}} 0 + \Delta V_{\text{дин}} 0 t_{\text{Э}}. \quad (34)$$

Для случайного задающего воздействия можно записать:

$$\Delta W_{\text{дин.Э}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g_w i\omega [K_{\text{ОШ}} j\omega + K_{\text{ОШ}V} j\omega t_{\text{Э}}] d\omega. \quad (35)$$

Соответственно дисперсия динамической ошибки экстраполяции

$$\sigma_{\Delta W_{\text{дин.Э}}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\alpha_{2\text{Э}} i\omega^2 + \alpha_{3\text{Э}} i\omega^3}{\beta_0 + \beta_1 i\omega + \beta_2 i\omega^2 + \beta_3 i\omega^3 + \beta_4 i\omega^4} \right|^2 d\omega, \quad (36)$$

где $\alpha_{2\text{Э}} = \alpha_{2V} t_{\text{Э}} + \alpha_2 = 1 + K_{11} t_{\text{Э}}$; $\alpha_{3\text{Э}} = \alpha_{3V} t_{\text{Э}} = t_{\text{Э}}$.

Используя выражение для интеграла Парсеваля, получим:

$$\sigma_{\Delta W_{\text{дин.Э}}}^2 = 1 + 2K_{11} t_{\text{Э}} \sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2 + \sigma_{\Delta V_{\text{дин}}}^2 t_{\text{Э}}^2. \quad (37)$$

С учетом (31) получим приближенное выражение для дисперсии динамических ошибок экстраполяции:

$$\sigma_{\Delta W_{\text{дин.Э}}}^2 \approx 1 + 2K_{11} t_{\text{Э}} \sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2 + \sigma_{\Delta V_{\text{дин}}}^2 K_{11}^2 t_{\text{Э}}^2 = \sigma_{\Delta W_{\text{дин}}}^2 (1 + K_{11} t_{\text{Э}})^2. \quad (38)$$

Дисперсию флуктуационных ошибки экстраполяции запишем в следующем виде:

$$\sigma_{\Delta W_{\text{ФЛЭ}}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{w.ЭКВ} |K j\omega + K_{0V} j\omega t_{\text{Э}}|^2 d\omega. \quad (39)$$

С учетом выражений (20) и (10) выражение (39) конкретизируется следующим образом:

$$\sigma_{\Delta W_{\text{ФЛЭ}}}^2 = S_{w.ЭКВ} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\alpha_{0\text{ФЛЭ}} + \alpha_{1\text{ФЛЭ}} i\omega}{\beta_0 + \beta_1 i\omega + \beta_2 i\omega^2 + \beta_3 i\omega^3 + \beta_4 i\omega^4} \right|^2 d\omega, \quad (40)$$

где $\alpha_{0\text{ФЛЭ}} = K_{12}$; $\alpha_{1\text{ФЛЭ}} = K_{11} + K_{12} t_{\text{Э}}$.

Выражение (40) можно получить в виде

$$\sigma_{\Delta W_{\text{ФЛЭ}}}^2 = \sigma_{\Delta W_{\text{ФЛ}}}^2 + \sigma_{\Delta V_{\text{ФЛ}}}^2 \left(t_{\text{Э}}^2 + 2 \frac{K_{11}}{K_{12}} t_{\text{Э}} \right). \quad (41)$$

Влияния ошибок измерения весового коэффициента на эффективность компенсации

Эффективность автокомпенсации, обусловленная 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:

$$v_{\Delta W} t_{\text{Э}} = \frac{\overline{|W_{\text{Зад}}|^2}}{|\Delta W t_{\text{Э}}|^2} = \frac{\sigma_{W_{\text{Зад}}}^2}{\sigma_{\Delta W_{\text{дин.Э}}}^2 + \sigma_{\Delta W_{\text{фл.Э}}}^2}. \quad (42)$$

Последнее выражение удобно представить в следующем виде:

$$\frac{1}{v_{\Delta W} t_{\text{Э}}} = \frac{1}{v_{\Delta W_{\text{дин.Э}}} t_{\text{Э}}} + \frac{1}{v_{\Delta W_{\text{фл.Э}}} t_{\text{Э}}} = \frac{\sigma_{W_{\text{дин.Э}}}^2}{\sigma_{W_{\text{Зад}}}^2} + \frac{\sigma_{W_{\text{фл.Э}}}^2}{\sigma_{W_{\text{Зад}}}^2}, \quad (43)$$

где $v_{\Delta W_{\text{дин.Э}}} t_{\text{Э}} = \sigma_{W_{\text{Зад}}}^2 / \sigma_{\Delta W_{\text{дин.Э}}}^2$ — составляющая эффективности автокомпенсации, обусловленная динамическими ошибками самонастройки; $v_{\Delta W_{\text{фл.Э}}} t_{\text{Э}} = \sigma_{W_{\text{Зад}}}^2 / \sigma_{\Delta W_{\text{фл.Э}}}^2$ — составляющая эффективности автокомпенсации, обусловленная флуктуационными ошибками самонастройки.

В частности, для расчета эффективности автокомпенсации, обусловленной динамическими ошибками самонастройки, с учетом выражений (26) и (38) можно рекомендовать следующее приближенное выражение:

$$v_{\Delta W_{\text{дин.Э}}} t_{\text{Э}} = \frac{\sigma_{W_{\text{Зад}}}^2}{\sigma_{\Delta W_{\text{дин.Э}}}^2} \approx \frac{K_{12}^2}{\omega_0^4 (1 + K_{11} t_{\text{Э}})^2 \left(1 + 2\alpha \frac{K_{12}}{K_{11} \omega_0^2} \right)}. \quad (44)$$

Заключение

Таким образом, получены выражения для ошибок самонастройки одноканального автокомпенсатора шумовых помех, реализующего второй порядок астатизма. 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 приводят к изменению ее фазы. Предложены выражения, позволяющие оценить влияние ошибок самонастройки на эффективность автокомпенсации шумовых помех.

SELF-ADJUSTMENT ERRORS OF JAMMING AUTOCANCELLER

I.S. HRAPYN, I.N. DAVYDZENKA, V.I. PAPUSHOI

Abstract

The analyzes are proposed for the errors of tracking and efficiency canceller of jammer under the influence scanning beam of main antenna. The shaping filter of the canceller consists of two integrators.

Литература

1. Охрименко А.Е. Основы обработки и получения информации. Минск, 1990.
2. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика. М., 1990.