

УДК 621.396.96

ДИСКРИМИНАТОРЫ СИГНАЛОВ ОШИБОК ЦЕПЕЙ КОМПЛЕКСНОЙ САМОНАСТРОЙКИ АВТОКОМПЕНСАТОРОВ МЕШАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

И.С. ХРАПУН, А.Е. ОХРИМЕНКО, И.Н. ДАВЫДЕНКО

*Научно-производственное республиканское унитарное предприятие "Алевкурп"
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 10 ноября 2009

Показывается, что дискриминаторы сигналов ошибок автокомпенсаторов мешающих излучений с комплексной самонастройкой являются линейными звеньями в цепях корреляционной обратной связи автокомпенсаторов. Определяется эквивалентная спектральная плотность возмущающего воздействия цепей самонастройки, флуктуационные ошибки формирования весовых коэффициентов и их влияние на эффективность автокомпенсации мешающих излучений.

Ключевые слова: автокомпенсатор мешающих излучений, дискриминатор, ошибки.

Полученные в [1] уравнения самонастройки весовых коэффициентов (4) двухканального автокомпенсатора мешающих излучений фактически определяют место и общую структуру оптимальных дискриминаторов сигналов ошибок в цепях самонастройки. В них сигналы ошибок формируются путем перемножения сигналов компенсационных каналов F_{k-1} , F_{k-2} и остатков $V_k = F_k + \alpha F_{k-1} + \beta F_{k-2}$

$$\begin{aligned} U_{\text{CO}\alpha} &= N_{k-1}^* V_k, \\ U_{\text{CO}\beta} &= N_{k-2}^* V_k. \end{aligned} \quad (1)$$

Там же определены оптимальные значения весовых коэффициентов α и β , формируемые в цепях самонастройки в установившемся режиме при двух формах пространственной корреляционной функции флуктуаций мешающих излучений (ПКФМИ): экспоненциальной:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{opt}} &= -r_N e^{i\Delta\psi_N}, \\ \beta_{\text{opt}} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

экспоненциально-параболической:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{opt}} &= -2a_N e^{i\Delta\psi_N}, \\ \beta_{\text{opt}} &= a_N^2 e^{i2\Delta\psi_N}. \end{aligned} \quad (3)$$

В дальнейшем будем полагать значения альтернативных весовых коэффициентов α и β оптимальными [2].

При этом средние значения сигналов ошибок оказываются пропорциональными соответствующим комплексным рассогласованиям:

при экспоненциальной ПКФМИ

$$\overline{U_{co} \alpha} /_{\beta=0} = \overline{N_{k-1}^* N_k + \alpha N_{k-1} + \beta_{omn} N_{k-2}} = 2\sigma_N^2 \alpha + R_1 = 2\sigma_N^2 \alpha - \alpha_{omn} = 2\sigma_N^2 \Delta\alpha, \quad (4)$$

где $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_{omn}$ — рассогласование в цепи самонастройки весового коэффициента α ;
– при экспоненциально-параболической ПКФМИ

$$\begin{aligned} \overline{U_{co} \alpha} /_{\beta=\beta_{omn}} &= \overline{N_{k-1}^* N_k + \alpha N_{k-1} + \beta_{omn} N_{k-2}} = \\ &= 2\sigma_N^2 R_1 + \alpha + \beta_{omn} R_1^* = 2\sigma_N^2 \alpha - \alpha_{omn} = 2\sigma_N^2 \Delta\alpha, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \overline{U_{co} \beta} /_{\alpha=\alpha_{omn}} &= \overline{N_{k-2}^* N_k + \alpha N_{k-1} + \beta N_{k-2}} = \\ &= 2\sigma_N^2 R_2 + \alpha_{omn} R_1 + \beta = 2\sigma_N^2 \beta - \beta_{omn} = 2\sigma_N^2 \Delta\beta, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Delta\beta = \beta - \beta_{omn}$ — рассогласование в цепи самонастройки весового коэффициента β .

Следовательно, дискриминаторы сигналов ошибок в цепях корреляционной обратной связи автокомпенсаторов мешающих излучений с комплексной самонастройкой являются линейными: двумерные сигналы ошибок на их выходе пропорциональны двумерным рассогласованиям (рис. 1).

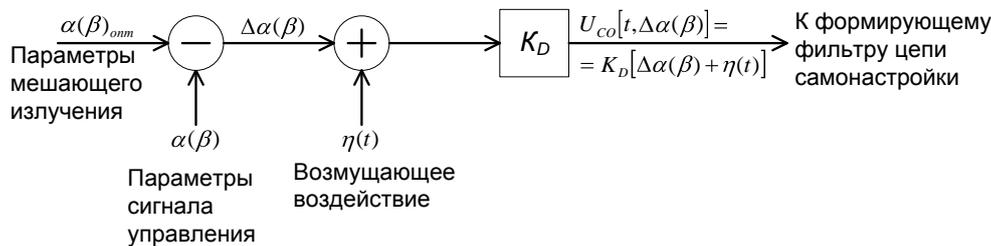


Рис. 1. Эквивалентная схема линейных дискриминаторов сигналов ошибок цепей комплексной самонастройки автокомпенсатора мешающих излучений

Учитывая (1), определим дисперсии сигналов ошибок для первой цепи самонастройки:

$$D_{Co\alpha} = \overline{N_{k-1}^* N_{k-1} V_k V_k^*} = \overline{N_{k-1}^* N_{k-1}} \cdot \overline{V_k V_k^*} + \overline{N_{k-1}^* V_k} \cdot \overline{N_{k-1} V_k^*} + \overline{N_{k-1}^* V_k^*} \cdot \overline{N_{k-1} V_k}. \quad (7)$$

Второе слагаемое в (7) представляет собой произведение средних значений сигнала ошибки цепи самонастройки весового коэффициента α (4), которые в установившемся режиме равны нулю:

$$\overline{N_{k-1}^* V_k} = \overline{N_{k-1} V_k^*} = 0, \quad \Delta\alpha = 0. \quad (8)$$

Третье слагаемое в (7) также равно нулю, поскольку корреляционные моменты некомплексно сопряженных сомножителей тождественно равны нулю:

$$\overline{N_{k-1}^* V_k^*} = \overline{N_{k-1} V_k} \equiv 0, \quad (9)$$

тогда выражение (7) с учетом (8), (9) примет вид

$$D_{Co\alpha} = \overline{N_{k-1}^* N_{k-1}} \cdot \overline{V_k V_k^*}. \quad (10)$$

Аналогично для второй цепи самонастройки

$$D_{Co\beta} = \overline{N_{k-2}^* N_{k-2}} \cdot \overline{V_k V_k^*}. \quad (11)$$

Таким образом, дисперсии сигналов ошибок цепей самонастройки пропорциональны дисперсиям остатков мешающих излучений:

при экспоненциальной ПКФМИ (16) [1]

$$D_{\text{coa}} = (2\sigma_N^2)^2 (1 - r_N^2) ; \quad (12)$$

при экспоненциально-параболической ПКФМИ (26) [1]

$$D_{\text{coa}} = D_{\text{co}\beta} = 2\sigma_N^2 \frac{1 - a_N^2}{1 + a_N^2} . \quad (13)$$

Поскольку ширина спектра сигналов ошибки определяется шириной спектра мешающего излучения, которая, как правило, согласована с шириной спектра модуляции зондирующего сигнала Δf_0 , находим приведенную к входам дискриминаторов эквивалентную спектральную плотность возмущающих воздействий $\eta(t)$ (см. рисунок):

при экспоненциальной ПКФМИ

$$S_{\text{экв.э}} = \frac{D_{\text{coa}}}{K_D^2 \Delta f_0} = \frac{1 - r_N^2}{\Delta f_0} ; \quad (14)$$

при экспоненциально-параболической ПКФМИ

$$S_{\text{экв.э/п}} = \frac{D_{\text{coa}\beta}}{K_D^2 \Delta f_0} = \frac{1 - a_N^2}{1 + a_N^2} \frac{1}{\Delta f_0} , \quad (15)$$

где $K_D = \frac{\partial U_{\text{co}}}{\partial \Delta\alpha, \Delta\beta} = 2\sigma_N^2$ — коэффициент передачи (крутизна дискриминационной характеристики) дискриминаторов сигналов ошибок.

Считая цепи корреляционной обратной связи для управления весовыми коэффициентами α и β автокомпенсатора непрерывными системами управления $T_{\text{об}} = T_n$, дисперсию флуктуационной ошибки формирования весовых коэффициентов можно представить произведением эквивалентной спектральной плотности возмущающего воздействия $S_{\text{экв.}}$ и полосы пропускания замкнутой цепи корреляционной обратной связи автокомпенсатора Δf_{AK} :

$$\sigma_{\text{фл.АК}}^2 = S_{\text{экв.}} \Delta f_{\text{AK}} . \quad (16)$$

Наличие ошибок формирования весовых коэффициентов должно привести к увеличению мощности остатков мешающих излучений и снижению эффективности их автокомпенсации. Представим весовые коэффициенты с учетом возможных ошибок. Так при экспоненциальной ПКФМИ согласно (2):

$$\alpha = -r_N e^{i\Delta\varphi_N} , \quad (17)$$

а при экспоненциально-параболической ПКФМИ согласно (3)

$$\begin{aligned} \alpha &= -2a_N e^{i\Delta\varphi_N} , \\ \beta &= a_N^2 e^{i2\Delta\varphi_N} , \end{aligned} \quad (18)$$

где $\Delta\varphi_N$ — фаза весового коэффициента, тогда $\Delta\psi_N - \Delta\varphi_N$ — ошибка формирования фазы весового коэффициента.

При этом средние квадраты остатков мешающего излучения (удвоенную мощность) можно представить в виде:

для экспоненциальной ПКФМИ

$$\overline{|V_k|^2} = \overline{|N_k - r_N e^{i\Delta\varphi_N} N_{k-1}|^2} = 2\sigma_N^2 [1 - 2r_N^2 \cos(\Delta\psi_N - \Delta\varphi_N) + r_N^2] ; \quad (19)$$

для экспоненциально-параболической ПКФМИ

$$\begin{aligned}
 \overline{|V_k|^2} &= \overline{\left| N_k - 2a_N e^{i\Delta\varphi_N} N_{k-1} + a_N^2 e^{i2\Delta\varphi_N} N_{k-2} \right|^2} = \\
 &= 2\sigma_N^2 \left[1 + 4a_N^2 + a_N^4 - \frac{8a_N^2}{1+a_N^2} \cos \Delta\psi_N - \Delta\varphi_N - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{8a_N^4}{1+a_N^2} \cos \Delta\psi_N - \Delta\varphi_N + \frac{2a_N^4}{1+a_N^2} \frac{3-a_N^2}{1+a_N^2} \cos 2 \Delta\psi_N - \Delta\varphi_N \right].
 \end{aligned} \tag{20}$$

Разлагая $\cos(x)$ в степенной ряд и ограничиваясь первыми двумя элементами ряда, получаем:

для экспоненциальной ПКФМИ

$$\overline{|V_k|^2} = 2\sigma_N^2 \left[1 - r_N^2 + r_N^2 \overline{\Delta\psi_N - \Delta\varphi_N}^2 \right]; \tag{21}$$

для экспоненциально-параболической ПКФМИ

$$\overline{|V_k|^2} = 2\sigma_N^2 \left[\frac{1-a_N^2}{1+a_N^2} + \frac{4a_N^2}{1+a_N^2} \frac{1-a_N^2}{1+a_N^2} \overline{\Delta\psi_N - \Delta\varphi_N}^2 \right]. \tag{22}$$

Определяя эффективность автокомпенсации как отношение мощности мешающего излучения на входе автокомпенсатора к мощности остатков мешающего излучения на его выходе

$$v_{AK} = \frac{2\sigma_N^2}{\overline{|V_k|^2}} \tag{23}$$

и учитывая дисперсию флуктуационной ошибки автокомпенсации (14), (15), (16), находим эффективность подавления мешающего излучения с учетом флуктуационных ошибок автокомпенсации:

для экспоненциальной ПКФМИ

$$v_{AKЭ} = \frac{\max v_{KKЭ}}{1 + r_N^2 \frac{\Delta f_{AK}}{\Delta f_0}}, \quad \max v_{KKЭ} = \frac{1}{1 - r_N^2}; \tag{24}$$

для экспоненциально-параболической ПКФМИ

$$v_{AKЭ/П} = \frac{\max v_{KKЭ/П}}{1 + \frac{4a_N^2}{1+a_N^2} \frac{1-a_N^2}{1+a_N^2} \frac{\Delta f_{AK}}{\Delta f_0}}, \quad \max v_{KKЭ/П} = \frac{1+a_N^2}{1-a_N^2}^3. \tag{25}$$

Таким образом, при экспоненциальной пространственной корреляционной функции флуктуаций мешающего излучения снижение эффективности автокомпенсации (плата за адаптацию) за счет флуктуационных ошибок составляет менее 1 дБ, если $\Delta f_{AK} < \Delta f_0/4$. При экспоненциально-параболической пространственной корреляционной функции флуктуаций мешающего излучения практически всегда обеспечивается максимальная эффективность автокомпенсации.

ERROR SIGNAL DISCRIMINATORS OF COMPLEX SELF-ADJUSTMENT CIRCUITRY OF JAMMING AUTOCANCELLERS

I.S. HRAPUN, A.E. OKHRIMENKO, I.N. DAVYDZENKA

Abstract

Error signal discriminators of jamming autocancellers with complex self-adjustment show are linear elements in complex self-adjustment circuitry. The equivalent spectral density perturbation actions of self-adjustment circuitry, fluctuation errors of weighting factors forming are defined.

Литература

1. Храпун И.С., Охрименко А.Е., Давыденко И.Н. // Докл. БГУИР. 2009. № 8. С. 5–12.
2. Бакут П.А., Большаков И.А., Герасимов Б.М. и др. Вопросы статистической теории радиолокации / Под ред. Тартаковского Г.П. М., 1963. Т. 1.