УДК 621.396.96

ЗАДАЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЦЕПЕЙ САМОНАСТРОЙКИ АВТОКОМПЕНСАТОРОВ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ И ФОРМИРУЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ ИХ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

А.В. РОМАНОВ, А.Е. ОХРИМЕНКО, С.В. ШАЛЯПИН, П.Г. СЕМАШКО, И.С. ХРАПУН

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

Поступила в редакцию 20 августа 2007

Устанавливается, что задающим воздействием цепей самонастройки коэффициентов передачи задержанных каналов автокомпенсаторов мешающих отражений, подлежащим воспроизведению, является доплеровский набег фазы помехи за период повторения, пропорциональный скорости перемещения отражателей в пределах элемента разрешения по дальности. Обоснованы две модели задающего воздействия — случайная модель простого марковского процесса и детерминированная полиномиальная модель. Их изображения по Лапласу определяют передаточные функции формирующих фильтров, компромиссным вариантом которых является интегратор, исключающий динамическую ошибку воспроизведения задающего воздействия по положению, т.е. по средней скорости перемещения отражателей. Оценивается относительная динамическая ошибка формирования весовых коэффициентов, которая не превышает долей процента.

Ключевые слова: мешающие отражения, автокомпенсатор, цепь самонастройки, задающее воздействие, динамическая ошибка воспроизведения, интегратор, астатизм.

Эффективным методом исследования свойств твердых тел (как оптически прозрачных, так и не прозрачных) является неразрушающий метод линзовой акустической микроскопии. Теоретически задача взаимодействия ультразвуковой волны с напряженно-деформированной областью сводится к установлению зависимости параметров волны от уровня деформации решетки. Дефект кристаллической решетки радиуса r рассматривается нами как центр дилатации значительной области кристалла радиуса R. Под действием внешних факторов, например температуры, область решетки радиуса R изменяет свои энергетические и геометрические параметры. В связи с этим деформация кристалла может служить характеристикой энергии упругой деформации, так как высокий уровень запасенной свободной энергии приводит к деградации электрофизических параметров изделий электронной техники и, как следствие, к снижению их надежности.

Автокомпенсаторами мешающих отражений являются устройства их когерентной компенсации с цепями корреляционной обратной связи, формирующими оптимальные значения коэффициентов передачи задержанных каналов [1, 2]. В качестве базовой выберем двухканальную структуру устройства череспериодного вычитания (ЧПВ) с комплексной самонастройкой и весовыми коэффициентами α и β в задержанных каналах (рис. 1).

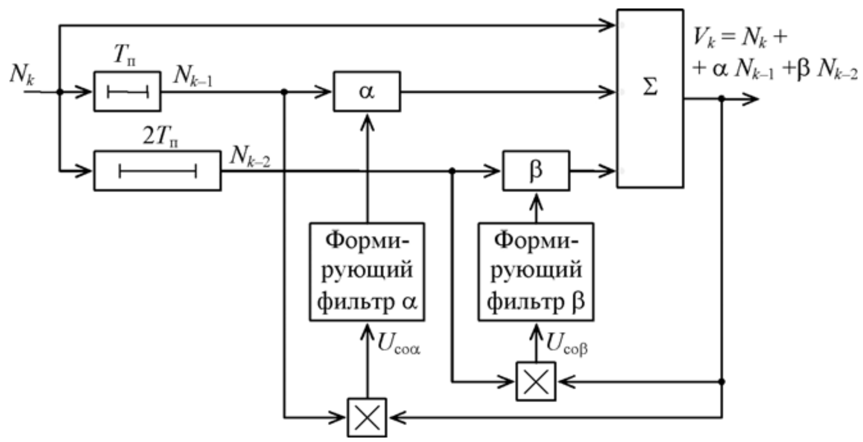

Рис. 1. Двухканальный автокомпенсатор мешающих отражений с комплексной самонастройкой весовых коэффициентов α и β

Алгоритм формирования остатков V_k в такой структуре определяется выражением:

$$V_k = N_k + \alpha N_{k-1} + \beta N_{k-2}, \tag{1}$$

где N_k, N_{k-1} и N_{k-2} — дискретные значения комплексной огибающей мешающих отражений для одного элемента разрешения по дальности в различных периодах повторения.

Отсюда следует удвоенная дисперсия остатков:

$$\overline{\left|V_k\right|^2} = \overline{\left|N_k + \alpha N_{k-1} + \beta N_{k-2}\right|^2}. \tag{2}$$

Оптимальные значения весовых коэффициентов α и β могут быть определены по критерию минимума дисперсии остатков путем дифференцирования по измеряемым параметрам функционала (квадрата модуля остатков) и приравнивания нулю соответствующих производных:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\left|V_k\right|^2}}{\partial \alpha} &= \overline{N^*_{k-1} V_k} = 0, \\ \frac{\partial \overline{\left|V_k\right|^2}}{\partial \beta} &= \overline{N^*_{k-2} V_k} = 0. \end{aligned} \tag{3}$$

Полученные уравнения фактически являются уравнениями самонастройки, определяющими алгоритмы формирования сигналов ошибок по измеряемым параметрам в цепях корреляционной обратной связи автокомпенсатора с оптимальными значениями весовых коэффициентов α и β:

$$\begin{aligned} U_{со\alpha} &= N^*_{k-1}\left(N_k + \alpha N_{k-1} + \beta N_{k-2}\right), \\ U_{со\beta} &= N^*_{k-2}\left(N_k + \alpha N_{k-1} + \beta N_{k-2}\right). \end{aligned} \tag{4}$$

Определим эти оптимальные значения для двух важных случаев корреляционных функций флуктуаций мешающих отражений [2, 3]:

экспоненциальной

$$\overline{N_k N_l^*} = 2\sigma_п^2 r_п^{|k-l|} e^{i(k-l)\Delta\psi}, \quad r_п = \exp\left(-T_п/\tau_п\right), \tag{5}$$

экспоненциально-параболической

$$\overline{N_k N_l^*} = 2\sigma_п^2 a^{|k-l|}\left(1 + |k-l|\frac{1-a^2}{1+a^2}\right) e^{i(k-l)\psi}, \quad a = \exp\left(-2T_п/\tau_п\right), \tag{6}$$

где $\sigma_{\text{п}}^2$ — мощность мешающих отражений; $\tau_{\text{п}}$ — время корреляции флуктуаций помехи; $\Delta\psi = \Omega_{\text{дп}} T_{\text{п}}$ — доплеровский набег фазы помехи за период повторения $T_{\text{п}}$.

Решая (3) с учетом (5) и (6), находим оптимальные значения весовых коэффициентов α и β:

для экспоненциальной корреляционной функции флуктуаций

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{опт}} &= -r_{\text{п}} e^{i\Delta\psi}, \\ \beta_{\text{опт}} &= 0, \end{aligned} \tag{7}$$

для экспоненциально-параболической корреляционной функции флуктуаций

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{опт}} &= -2ae^{i\Delta\psi}, \\ \beta_{\text{опт}} &= a^2 e^{i2\Delta\psi}. \end{aligned} \tag{8}$$

Из (4) с учетом оптимальных значений альтернативных весовых коэффициентов β и α следуют дискриминационные характеристики:

при экспоненциальной корреляционной функции флуктуаций мешающих отражений, когда $\beta_{\text{опт}} = 0$,

$$\overline{U_{\text{со}\alpha}} = \overline{N_{k-1}^*\left(N_k + \alpha N_{k-1} + \beta_{\text{опт}} N_{k-2}\right)} = 2\sigma_{\text{п}}^2\left(\alpha + R_N\right) = 2\sigma_{\text{п}}^2\left(\alpha - \alpha_{\text{опт}}\right) = 2\sigma_{\text{п}}^2 \Delta\alpha\,; \tag{9}$$

при экспоненциально-параболической корреляционной функции флуктуаций мешающих отражений

$$\overline{U_{\text{со}\alpha}} = \overline{N_{k-1}^*\left(N_k + \alpha N_{k-1} + \beta_{\text{опт}} N_{k-2}\right)} = R_1 + \alpha + \beta_{\text{опт}} R_1^* = 2\sigma_{\text{п}}^2\left(\alpha - \alpha_{\text{опт}}\right) = 2\sigma_{\text{п}}^2 \Delta\alpha\,, \tag{10}$$

$$\overline{U_{\text{со}\beta}} = \overline{N_{k-2}^*\left(N_k + \alpha_{\text{опт}} N_{k-1} + \beta N_{k-2}\right)} = R_2 + \alpha_{\text{опт}} R_1 + \beta = 2\sigma_{\text{п}}^2\left(\beta - \beta_{\text{опт}}\right) = 2\sigma_{\text{п}}^2 \Delta\beta\,, \tag{11}$$

где $R_1 = \overline{N_k N_{k-1}^*}$, $R_1^* = \overline{N_{k-1}^* N_{k-2}}$, $R_2 = \overline{N_k N_{k-2}^*}$ — корреляционные моменты дискретных значений комплексной огибающей мешающих отражений.

Таким образом, дискриминаторы сигналов ошибок в цепях корреляционной обратной связи автокомпенсаторов мешающих отражений с комплексной самонастройкой являются линейными: двумерные (комплексные) сигналы ошибок на их выходе пропорциональны двумерным (комплексным) рассогласованиям.

Полагая, что изменение во времени весовых коэффициентов (7), (8) происходит по причине изменения доплеровского набега фазы помехи за период повторения или доплеровского смещения частоты мешающих отражений

$$\Delta\psi(t) = \Omega_{\text{дп}}(t) T_{\text{п}} = 2\pi F_{\text{дп}}(t) T_{\text{п}}, \tag{12}$$

следует считать задающим воздействием, подлежащим воспроизведению во времени, доплеровское смещение частоты

$$F_{\text{дп}}(t) = \frac{2V_{r\,\text{п}}(t)}{\lambda}\,, \tag{13}$$

изменяющееся в связи с изменением скорости перемещения области отражателей под действием ветра, атмосферной турбулентности и гравитационного поля Земли.

В связи с этим могут рассматриваться две модели перемещения отражателей:

первая модель случайного простого марковского процесса

$$V_{r\,\text{п}}(t) = \overline{V_{r\,\text{п}}} + \Delta \mathrm{V}_{\text{в}}(t) \tag{14}$$

с корреляционной функцией скорости ветра в виде экспоненты

$$r_{\text{в}}(\tau)=\sigma_{\text{в}}^{2}\exp\left(-\frac{|\tau|}{\tau_{\text{в}}}\right), \tag{15}$$

где $\sigma_{\text{в}}$ и $\tau_{\text{в}}$ — соответственно, среднеквадратичное значение и время корреляции скорости ветра, имеющие порядок единиц м/с и секунд;

вторая модель детерминированной линейной функции времени:

$$V_{r\,\text{п}}(t)=V_{r\,\text{п}}+a_{r\text{п}}t\,, \tag{16}$$

где $a_{r\text{п}}$ — радиальное ускорение перемещения отражателей, имеющее порядок единиц м/с^2.

В первом случае энергетический спектр скорости ветра

$$S_{\text{в}}(\omega)=\frac{2\sigma_{\text{в}}^{2}\tau_{\text{в}}}{1+\omega^{2}\tau_{\text{в}}^{2}}\,, \tag{17}$$

изображение скорости ветра в операторной форме (по Лапласу)

$$V_{\text{в}}(\mathrm{t})=\frac{(2\sigma_{\text{в}}^{2}\tau_{\text{в}})^{1/2}}{1+p\tau_{\text{в}}}\,, \tag{18}$$

а передаточная характеристика формирующего фильтра для наилучшего воспроизведения задающего воздействия [4]

$$k_{\text{фф}}(\mathrm{p})=\frac{k_{\text{фф}}}{1+pT_{\text{фф}}}\,,\ T_{\text{фф}}=\tau_{\text{в}}, \tag{19}$$

где $k_{\text{фф}}$ — коэффициент усиления формирующего фильтра, выбираемый по минимуму среднего квадрата ошибки измерения.

Во втором случае изображение скорости ветра в операторной форме (по Лапласу)

$$\mathrm{V}_{\mathrm{p}}(p)=\frac{V_{r\text{п}}}{p}+\frac{a_{r\text{п}}}{p^{2}}\,, \tag{20}$$

а передаточная характеристика формирующего фильтра для наилучшего воспроизведения этого задающего воздействия

$$k_{\text{фф}}(p)=\frac{k_{0}}{p}+\frac{k_{1}}{p^{2}}\,. \tag{21}$$

Такой фильтр является композицией интегратора и двойного интегратора.

Недостатком первого фильтра является отсутствие у него астатизма, из-за чего появляется ошибка по положению (средней скорости перемещения отражателей). Недостатком второго фильтра является относительная сложность и условная устойчивость цепи корреляционной обратной связи автокомпенсатора, предполагающая необходимость использования специальных корректирующих фильтров. Его достоинствами являются отсутствие ошибок по положению (средней скорости перемещения отражателей $\overline{V_{r\,\text{п}}}$) благодаря астатизму 1-го порядка и по скорости (при наличии радиального ускорения перемещения отражателей $a_{r\text{п}}$) благодаря астатизму 2-го порядка.

Учитывая, что радиальные ускорения перемещения отражателей невелики (менее единицы м/с^2), хорошим компромиссом этих двух формирующих фильтров является фильтр с астатизмом первого порядка в виде интегратора, обеспечивающего отсутствие ошибки по положению, т.е. по средней скорости перемещения отражателей

$$k_{\text{фф}}(p)=k_{v}/p\,, \tag{22}$$

где k_{v} — коэффициент преобразования по скорости интегратора.

При этом средние квадраты динамических ошибок измерения скорости перемещения отражателей [5]:

при случайной модели задающего воздействия

$$\Delta^2_{\text{дин.в1}} = \frac{\sigma^2_{\text{в}}}{1 + k_v \tau_{\text{в}}}\,; \tag{23}$$

при детерминированной модели задающего воздействия

$$\Delta^2_{\text{дин.в2}} = \left(a_{r\text{п}} / k_v\right)^2, \tag{24}$$

которые, согласно (12) и (13), трансформируются в средние квадраты динамических ошибок воспроизведения доплеровского набега фазы мешающих отражений за период повторения

$$\Delta^2_{\text{дин}} = \overline{\left(\Delta\psi - \Delta\varphi\right)^2} = \left(\frac{4\pi}{\lambda} T_{\text{п}}\right)^2 \Delta^2_{\text{дин.в}}\,. \tag{25}$$

Примеры зависимости этих динамических ошибок от полосы автокомпенсации $\Delta f_{\text{ак}} = k_v/2$ при некоторых значениях $\sigma_{\text{в}}$, $\tau_{\text{в}}$, $a_{r\text{п}}$, λ и $T_{\text{п}}$ показаны на рис. 2, из которых следует, что относительные динамические ошибки воспроизведения задающих воздействий составляют доли процента.

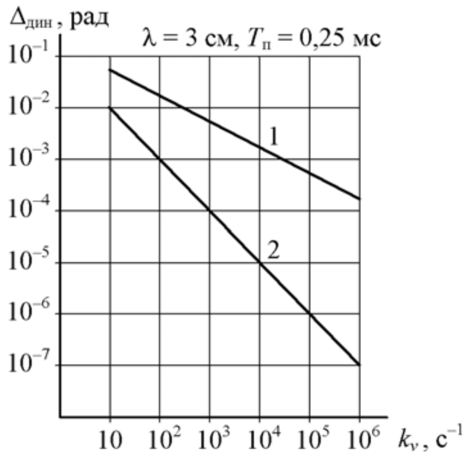

Рис. 2. Динамические ошибки воспроизведения задающих воздействий автокомпенсатора мешающих отражений с комплексной самонастройкой: *1* — $\sigma_{\text{в}}/\tau_{\text{в}} = 1$ м/с^2; *2* — $a_{r\text{п}} = 1$ м/с^2

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Задающим воздействием автокомпенсатора мешающих отражений с комплексной самонастройкой весовых коэффициентов являются изменения доплеровского смещения частоты или доплеровского набега фазы мешающих отражений за период повторения, пропорциональные изменениям радиальной составляющей скорости перемещения отражателей под действием ветра и гравитационного поля Земли.

2. В качестве формирующего фильтра воспроизведения задающих воздействий автокомпенсатора мешающих отражений наиболее целесообразно использовать интегратор, определяющий астатизм первого порядка цепей самонастройки весовых коэффициентов, благодаря чему исключается ошибка по положению, т.е. по средней скорости перемещения отражателей.

3. Относительные динамические ошибки воспроизведения типовых задающих воздействий автокомпенсатора составляют доли процента.

MASTER CONTROLS FOR SELF-ADJUSTMENT CIRCUITS OF TRACKING COMPENSATORS OF BACKGROUND RETURNS AND SHAPING FILTERS REPRODUCING THAT CONTROLS

A.V. ROMANOV, A.E. OKHRIMENKO, S.V. SHALIAPIN, P.G. SEMASHKO, I.S. KHRAPUN

Abstract

It is determined that reproducible master control for circuits self-adjusting gains of delay channels of tracking compensators of background returns is interference interperiod Doppler phase incursion proportional to velocity of scatterers within distance bin. Two models of master control are justified: stochastic model of simple Markovian process and deterministic polynomial model. Laplace representations of the models determine transfer functions of shaping filters. Compromise choice of the filter is integrator, which eliminates dynamic position error of reproducing of master control that is error of mean velocity of scatterers. It is estimated that relative dynamic error of forming weighting coefficients not exceeds fractions of a percent.

Литература

1. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. М., 2007.
2. *Охрименко А. Е.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. М., 1983. Ч. 1.
3. *Бакут П.А., Большаков И.А., Герасимов Б.М. и др.* Вопросы статистической теории радиолокации / Под ред. Г.П. Тартаковского. М., 1963. Т. 1.
4. *Первачев В.С.* Радиоавтоматика. М., 1981.