

**ЭЛЕКТРОНИКА**

УДК 621.396.96

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОГЕРЕНТНАЯ АВТОКОМПЕНСАЦИЯ И  
ДЕКОРРЕЛЯЦИЯ МЕШАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ  
ОТ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ**

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

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

*Поступила в редакцию 4 сентября 2009*

Приведены синтез функционально-необходимой структуры и определение параметров (весовых коэффициентов) устройства когерентной компенсации и декорреляции мешающих излучений от нескольких источников.

*Ключевые слова:* автокомпенсатор, весовые коэффициенты, декорреляция.

**Введение**

Автокомпенсация мешающих излучений как значимое направление помехозащиты в радиолокации используется уже около четверти века [1, 2]. Обе стороны противоборства в постоянном соперничестве стремятся к совершенству. Сторона нападения повышает эффективность воздействия активных шумовых помех путем увеличения их спектральной плотности, постановки помех из нескольких точек пространства, введения нестационарности путем применения прерывистых во времени, скользящих по частоте, хаотически поляризованных помех. Сторона защиты совершенствует автокомпенсаторы, обеспечивая их структурную и параметрическую самонастройку.

Однако, несмотря на достигнутое широкое использование автокомпенсаторов мешающих излучений, остаются еще проблемные вопросы, ответы на которые способствовали бы более рациональному их применению. Самым главным из них является выбор функционально-необходимой (оправданной) структуры, более простой, чем оптимальная, но достаточно эффективной, чтобы можно было оправдать возможные упрощения. Сложность автокомпенсаторов — это, прежде всего, их многоканальность. Она определяется несколькими факторами:

- числом постановщиков мешающих излучений;
- кратностью пространственного дифференцирования, необходимой (достаточной) для декорреляции и подавления каждого мешающего излучения, которая зависит от формы его пространственной корреляционной функции флуктуаций;
- способностью автокомпенсатора к структурной и параметрической самонастройке, включающей изменение количества формируемых зон пространственной режекции, а также изменения кратности пространственного дифференцирования при формировании каждой зоны режекции. Эта способность к самонастройке количественно отражается числом заложенных в структуру автокомпенсатора степеней свободы [3], определяющих общее число операций дифференцирования, которые могут использоваться по-разному. Таким образом, в рамках принятых определений задача выбора функционально необходимой (оправданной) структуры

автокомпенсатора состоит в минимизации числа степеней свободы при сохранении достаточного уровня его эффективности.

### Синтез структуры автокомпенсатора мешающих излучений

Синтез функционально-необходимой (оправданной) структуры и определение параметров (весовых коэффициентов) устройства когерентной компенсации и декорреляции мешающих излучений от нескольких источников осуществим на базе двухканального устройства (рис. 1).

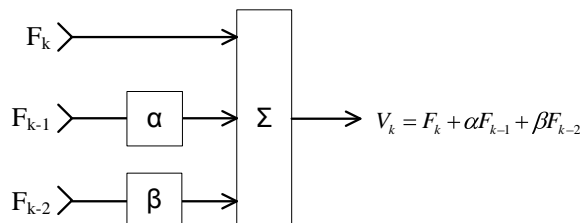


Рис. 1. Двухканальное устройство пространственной когерентной компенсации и декорреляции мешающих излучений

Алгоритм формирования выходного сигнала (остатков мешающих излучений) определяется выражением

$$V_k = F_k + \alpha F_{k-1} + \beta F_{k-2}, \quad (1)$$

где  $F_k$  — дискретные значения комплексных амплитуд мешающих излучений  $k$ -го канала приема;  $\alpha, \beta$  — весовые коэффициенты.

Оптимальные значения весовых коэффициентов передачи каналов приема можно найти, исследуя на экстремум мощность остатков мешающих излучений  $V_k$ . Полагая наличие на входе этого устройства мешающих излучений от двух источников

$$F_k = M_k + N_k, \quad (2)$$

мощность остатков определяется следующим образом:

$$2\sigma_{ост}^2 = \overline{|V_k|^2} = \overline{|F_k + \alpha F_{k-1} + \beta F_{k-2}|^2}. \quad (3)$$

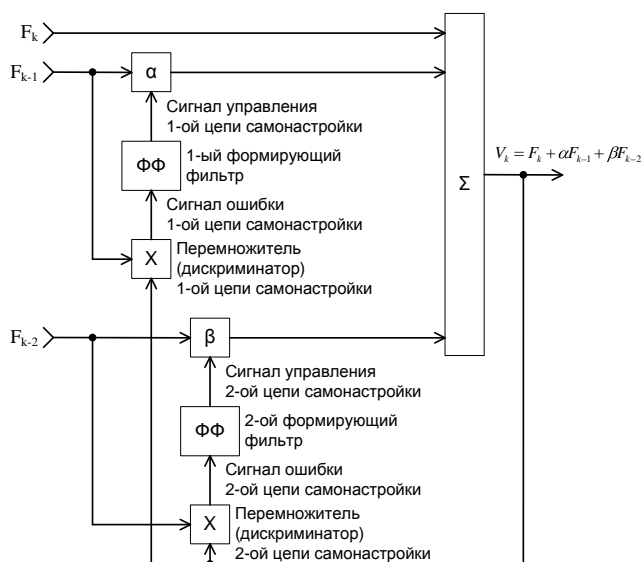


Рис. 2. Место и общая структура оптимальных дискриминаторов сигналов ошибок цепей самонастройки двухканального автокомпенсатора мешающих излучений

Продифференцировав (3) по  $\alpha$  и  $\beta$  и приравняв производные нулю, получим два уравнения самонастройки весовых коэффициентов, одновременно определяющих место и общую структуру оптимальных дискриминаторов сигналов ошибок в цепях самонастройки (рис. 2):

$$\begin{aligned} \overline{F_{k-1}^* F_k + \alpha F_{k-1} + \beta F_{k-2}} &= 0, \\ \overline{F_{k-2}^* F_k + \alpha F_{k-1} + \beta F_{k-2}} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Принимая во внимание, что для мешающих излучений от двух некоррелированных источников корреляционные моменты дискретных значений комплексных амплитуд

$$R[k-l, d] = \overline{F_k F_l^*} = \overline{M_k M_l^*} + \overline{N_k N_l^*} = 2\sigma_M^2 R_M[k-l, d] + 2\sigma_N^2 R_N[k-l, d], \quad (5)$$

где  $\sigma_M^2, \sigma_N^2$  — мощности  $M$ -го и  $N$ -го мешающих излучений,

$$\begin{aligned} R_M[k-l, d] &= r_M^{k,l} e^{i k-l \Delta\Psi_M}, \\ R_N[k-l, d] &= r_N^{k,l} e^{i k-l \Delta\Psi_N}, \end{aligned} \quad (6)$$

— нормированные корреляционные моменты комплексных амплитуд мешающих излучений  $M$ -го и  $N$ -го источников;  $r_M^{k,l}, r_N^{k,l}$  — нормированные корреляционные моменты флуктуаций комплексных амплитуд мешающих излучений  $M$ -го и  $N$ -го источников,

$$\begin{aligned} \Delta\Psi_M &= \Omega_{\Delta M} d, \\ \Delta\Psi_N &= \Omega_{\Delta N} d, \end{aligned} \quad (7)$$

— поканальные набег фазы мешающих излучений от  $M$ -го и  $N$ -го источников,

$$\begin{aligned} \Omega_{\Delta M} &= \frac{2\pi}{\lambda} \sin \Theta_M, \\ \Omega_{\Delta N} &= \frac{2\pi}{\lambda} \sin \Theta_N, \end{aligned} \quad (8)$$

— пространственные частоты мешающих излучений от  $M$ -го и  $N$ -го источников, расположенных под углами  $\Theta_M, \Theta_N$  от нормали к раскрытию приемной антенны;  $d$  — интервал между каналами приема. Обозначая

$$R_1 = R(d), R_2 = R(2d), \quad (9)$$

решая систему уравнений (4)

$$\begin{aligned} R_1 + \alpha R_0 + \beta R_1^* &= 0, \\ R_2 + \alpha R_1 + \beta R_0 &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

получаем значения весовых коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , при которых дисперсия остатков мешающих излучений (3) минимальна:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{R_1^* R_2 - R_1 R_0}{R_2^2 - R_0 - R_1 R_1^*}, \\ \beta &= \frac{R_1^2 - R_2 R_0}{R_2^2 - R_0 - R_1 R_1^*}. \end{aligned} \quad (11)$$

Далее рассмотрим эволюцию весовых коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , структуры устройств когерентной компенсации, а также процессы подавления и декорреляции мешающих излучений для двух важных форм корреляционных функций любых случайных процессов естественного происхождения (мешающие отражения, флуктуационные явления в автогенераторах, флуктуационные процессы при распространении и рассеянии радиоволн от блуждающих неоднородностей в атмосфере, тропосфере, ионосфере и т.п.), в том числе мешающих излучений [4–7]:

– экспоненциальной

$$r_{M,N}^{k,l} = r_{M,N}^{|k-l|}, \quad (12)$$

где  $r_{M,N} = \exp\left(-\frac{d}{\Delta L_{M,N}}\right)$  — коэффициенты междуканальной корреляции мешающих

излучений  $M$ -го и  $N$ -го источников,  
– экспоненциально-параболической

$$r_{M,N}^{k,l} = a_{M,N}^{|k-l|} \left(1 + |k-l| \frac{1 - a_{M,N}^2}{1 + a_{M,N}^2}\right), \quad (13)$$

где  $a_{M,N} = \exp\left(-\frac{2d}{\Delta L_{M,N}}\right)$  — базовые коэффициенты, определяющие коэффициенты междуканальной корреляции мешающих излучений  $M$ -го и  $N$ -го источников

$$r_{M,N} = \frac{2a_{M,N}}{1 + a_{M,N}^2},$$

$\Delta L_{M,N}$  — интервалы (радиусы) пространственной корреляции мешающих излучений  $M$ -го и  $N$ -го источников.

В случае (12)  $R(0)$ ,  $R_1$  и  $R_2$ , входящие в (11), определяются выражениями:

$$\begin{aligned} R_0 &= 2\sigma_M^2 + 2\sigma_N^2, \\ R_1 &= 2\sigma_M^2 r_M e^{i\Delta\Psi_M} + 2\sigma_N^2 r_N e^{i\Delta\Psi_N}, \\ R_2 &= 2\sigma_M^2 r_M^2 e^{i2\Delta\Psi_M} + 2\sigma_N^2 r_N^2 e^{i2\Delta\Psi_N}. \end{aligned} \quad (14)$$

При наличии одного источника (например,  $N$ -го) оптимальные значения весовых коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  оказываются равными:

$$\begin{aligned} \alpha_{opt} &= -r_N e^{i\Delta\Psi_N}, \\ \beta_{opt} &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Минимальная мощность остатков (3) равна:

$$2\sigma_{ocm}^2 = \overline{|V_k|^2} = 2\sigma_N^2 (1 - r_N^2). \quad (16)$$

Эффективность когерентной компенсации мешающих излучений оказывается пропорциональной скважности энергетического спектра пространственных частот:

$$V_{kk} = \frac{2\sigma_N^2}{2\sigma_{ocm}^2} = \frac{1}{1 - r_N^2} = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{2d}{\Delta L_N}\right)} \approx \frac{\Delta L_N}{2d} \approx \frac{F_{\text{Ипросп}}}{4\Delta F_{\text{Нпросп}}}, \quad (17)$$

где  $\Delta F_{N_{\text{просп}}} = \frac{1}{2\Delta L_N}$  — ширина энергетического спектра пространственных частот,

$F_{\text{Ппросп}} = \frac{1}{d}$  — пространственная частота повторения, а междуканальная корреляция остатков отсутствует:

$$\begin{aligned} \overline{V_k V_{k-1}^*} &= \overline{N_k + \alpha_{\text{omn}} N_{k-1}} \overline{N_{k-1}^* + \alpha_{\text{omn}}^* N_{k-2}^*} = \\ &= \overline{N_k N_{k-1}^*} + \alpha_{\text{omn}}^* \overline{N_k N_{k-2}^*} + \alpha_{\text{omn}} \overline{N_{k-1} N_{k-1}^*} + \alpha_{\text{omn}} \alpha_{\text{omn}}^* \overline{N_{k-1} N_{k-2}^*} = \\ &= 2\sigma_N^2 e^{i\Delta\Psi_N} (r_N - r_N^3 - r_N + r_N^3) \equiv 0 \end{aligned} \quad (18)$$

Таким образом, в рассмотренном частном случае одного источника мешающего излучения с экспоненциальной пространственной корреляционной функцией флуктуаций двухканальная структура устройства когерентной компенсации оказывается избыточной, весовой коэффициент второго канала  $\beta$  (11) оказывается равным нулю (15), что свидетельствует о том, что для подавления (17) и декорреляции (18) мешающего излучения с такой пространственной корреляционной функций (12) достаточно однократного междуканального вычитания (пространственного дифференцирования).

Чтобы выявить количественные закономерности, лежащие в основе формирования весовых коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , подавления и декорреляции мешающих излучений от двух источников, а также определить эффективность их когерентной компенсации, ограничимся только экспоненциальной пространственной корреляционной функцией их флуктуаций (12).

Не нарушая общности, ограничимся ради упрощения анализа случаем равенства мощностей обоих источников мешающего излучения  $2\sigma_N^2 = 2\sigma_M^2 = 2\sigma_{II}^2$ , и согласно (11) найдем оптимальные значения весовых коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  в максимально компактной форме:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{R_M^2 + R_N^2}{4 - R_M + R_N} \frac{R_M^* + R_N^*}{R_M^* + R_N^*} - 2 \frac{R_M + R_N}{R_M^* + R_N^*}, \\ \beta &= \frac{R_M + R_N}{4 - R_M + R_N} \frac{R_M^2 + R_N^2}{R_M^* + R_N^*}, \end{aligned} \quad (19)$$

где  $R_M = r_M e^{i\Delta\Psi_M}$ ,  $R_N = r_N e^{i\Delta\Psi_N}$ .

Используя (19), находим (3) для (12) после ряда группирований слагаемых по признакам подобия:

$$\begin{aligned} 2\sigma_{\text{ост}}^2 &= \left| M_k + N_k + \alpha M_{k-1} + N_{k-1} + \beta M_{k-2} + N_{k-2} \right|^2 = \\ &= 2\sigma_{II}^2 \frac{4 \left[ 2 - r_M^2 + r_N^2 \right] 1 - r_M r_N}{4 - r_M + r_N} \end{aligned} \quad (20)$$

Полагая коэффициенты междуканальной корреляции мешающих излучений одинаково близкими к единице,  $r_M = r_N = r \rightarrow 1$ , получим

$$2\sigma_{\text{ост}}^2 = 2\sigma_{II}^2 2(1 - r^2). \quad (21)$$

Сравнивая полученный результат с дисперсией остатков мешающих излучений для одного источника (16), приходим к простому, но очень значимому выводу: дисперсия остатков мешающих излучений от нескольких источников равна сумме дисперсий остатков мешающих излучений от каждого из них, что равносильно выполнению принципа суперпозиции.

Очевидно, что эту закономерность можно распространить на произвольную форму пространственной корреляционной функции флуктуаций.

Далее рассмотрим аналогичные вопросы для второй, практически наиболее важной, формы пространственной корреляционной функции флуктуаций мешающих излучений (13) [2]. Начнем, как и в предыдущем случае, с упрощенного варианта мешающего излучения от одного источника  $F_k=N_k$ . При этом значения  $R(0)$ ,  $R_1$  и  $R_2$ , входящие в (11), определяются выражениями:

$$\begin{aligned} R(0) &= 2\sigma_N^2, \\ R_1 &= 2\sigma_N^2 r_N d e^{i\Delta\Psi_N} = 2\sigma_N^2 \frac{2a_N}{1+a_N^2} e^{i\Delta\Psi_N}, \\ R_2 &= 2\sigma_N^2 r_N 2d e^{i2\Delta\Psi_N} = 2\sigma_N^2 \frac{a_N^2 (3-a_N^2)}{1+a_N^2} e^{i2\Delta\Psi_N}; \end{aligned} \quad (22)$$

оптимальные значения весовых коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , согласно, (11) равны:

$$\begin{aligned} \alpha_{opt} &= -2a_N e^{i\Delta\Psi_N}, \\ \beta_{opt} &= a_N^2 e^{i2\Delta\Psi_N}; \end{aligned} \quad (23)$$

минимальная мощность остатков мешающего излучения (3) равна:

$$2\sigma_{ост}^2 = \overline{|V_k|^2} = 2\sigma_N^2 \frac{1-a_N^2}{1+a_N^2}; \quad (24)$$

эффективность когерентной компенсации мешающего излучения оказывается пропорциональной кубу скважности энергетического спектра пространственных частот

$$\nu_{KK} = \frac{2\sigma_N^2}{2\sigma_{ост}^2} = \frac{1+a_N^2}{1-a_N^2} \approx \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta L_N}{2d} \right)^3 \approx \frac{1}{4} \left( \frac{F_{Простр}}{4\Delta F_{Нпростр}} \right)^3, \quad (25)$$

где  $\Delta F_{Нпростр} = \frac{1}{2\Delta L_N}$  — ширина энергетического спектра пространственных частот, а междуканальная корреляция остатков отсутствует:

$$\begin{aligned} \overline{V_k V_{k-1}^*} &= \overline{N_k + \alpha N_{k-1} + \beta N_{k-2} \quad N_{k-1} + \alpha N_{k-2} + \beta N_{k-3}^*} = \\ &= 2\sigma_N^2 e^{i\Psi_N} \frac{4a_N^5 - 2a_N^7 - 2a_N^3 + 8a_N^3 - 6a_N^3 + 2a_N^5 - 6a_N^5 + 2a_N^7}{1+a_N^2} \equiv 0. \end{aligned} \quad (26)$$

Таким образом, в случае (13) весовые коэффициенты (23) определили необходимость и достаточность двукратного междуканального вычитания (дифференцирования) для полной декорреляции мешающего излучения от одного источника (26) и наиболее полного их подавления с максимально возможной эффективностью компенсации, пропорциональной кубу скважности энергетического спектра пространственных частот (25).

### Заключение

Обобщая полученные результаты, можно сделать окончательный вывод о том, что многоканальный автокомпенсатор мешающих излучений от  $n$  источников должен обладать  $2n$  степенями свободы, обеспечивая функционально-необходимое число операций пространственного дифференцирования, не менее  $2n$  (рис. 3).

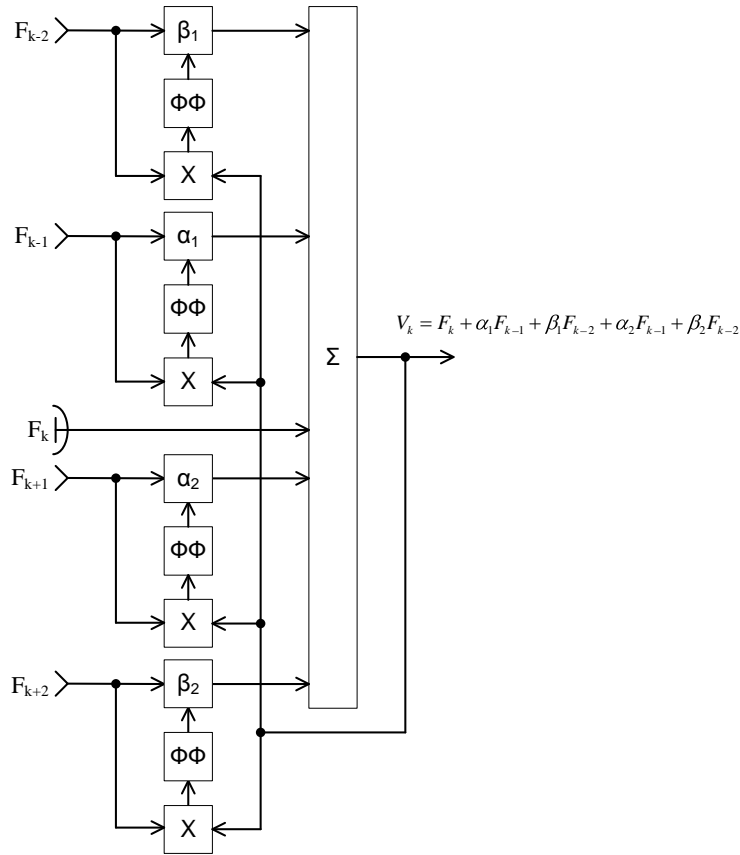


Рис. 3. Функционально-необходимая структура четырехканального автокомпенсатора мешающих излучений от двух источников

При меньшем числе существующих источников мешающих излучений  $m < n$ , механизм структурной самонастройки приведет к функционированию только  $2m$  операций пространственного дифференцирования, исключив из процесса компенсации лишние  $2(n-m)$  операций.

При большем числе существующих источников мешающих излучений  $m > n$ , компенсация наиболее сильных мешающих излучений  $m_{\text{сил}}$  будет осуществляться путем двукратного пространственного дифференцирования с использованием  $2m_{\text{сил}}$  степеней свободы. Компенсация оставшихся мешающих излучений  $m - m_{\text{сил}}$  будет осуществляться по остаточному принципу, т.е. путем однократного пространственного дифференцирования. При этом уровень их когерентной компенсации будет определяться выражением (16), что с учетом коэффициента междуканальной корреляции мешающего излучения с экспоненциально-параболической корреляционной функцией флуктуаций (13) соответствует мощности остатков мешающих излучений

$$2\sigma_{\text{Nocm}}^2 = 2\sigma_N^2 (1 - r_N^2) = 2\sigma_N^2 \left( \frac{1 - a_N^2}{1 + a_N^2} \right)^2 \quad (27)$$

и эффективности их компенсации, пропорциональной хотя и не кубу, но все-таки квадрату, а не первой степени скважности спектра пространственных частот

$$v_{\text{KK}} = \frac{2\sigma_N^2}{2\sigma_{\text{Nocm}}^2} = \left( \frac{1 + a_N^2}{1 - a_N^2} \right) \approx \left( \frac{F_{\text{Простр}}}{4\Delta F_{\text{Нпростр}}} \right)^2 \quad (28)$$

# SPATIAL COHERENT AUTOCANCELLATION AND DECORRELATION JAMMING FROM SEVERAL JAMMERS

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

## Abstract

Synthesis of the functional-necessary structure and characterization (weighting factors) canceller with coherent cancellation and decorrelation jamming have been performed.

## Литература

1. Справочник "Радиоэлектронные системы" (основы построения и теория) / Под ред. Я.Д. Ширмана. М., 2007.
2. *Охрименко А.Е.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч. 1. Основы радиолокации. М., 1983.
3. *Охрименко А.Е.* Основы обработки передачи информации. Минск, 1990.
4. *Горелик Г.С.* // Радиотехника и электроника. 1956. Т. 1, № 6. С. 695–703.
5. *Вайнштейн А.А., Зубаков В.Д.* Выделение сигналов на фоне случайных помех. М., 1960.
6. *Бакут П.А., Большаков И.А., Герасимов Б.М. и др.* Вопросы статистической теории радиолокации / Под ред. Г.П. Тартаковского. М., 1963. Т. 1.
7. *Андреанов В.А., Арманд Н.А.* // Радиотехника и электроника. 1976. Т. 22, № 9. С. 1816–1822.