

УДК 621.391.26

Н.Н. Минервин<sup>1</sup>, Д.В. Карлов<sup>1</sup>, В.Л. Мисайлов<sup>1</sup>, Е.В. Лукашук<sup>2</sup><sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков<sup>2</sup>ОАО «АО НИИРИ» НКАУ, Харьков

**ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ ВНЕШНЕЙ ПОМЕХИ  
ПРИ ОПТИМАЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКЕ  
ПРИНИМАЕМЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА И ПОМЕХИ,  
ПОДВЕРГШИХСЯ СЛУЧАЙНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ**

*В статье получены формулы для оценивания предельно достижимого ослабления помехового сигнала, подвергшихся случайному воздействию среды распространения. Полученные соотношения позволяют оценить предельные возможности компенсации помеховых колебаний, поскольку рассмотрение проведено применительно к случаю их прохождения через оптимальные устройства обработки по критерию максимума отношения сигнал/помеха. Применительно к случаю воздействия одной помехи, в условиях, когда радиус корреляции фазовых флуктуаций значительно больше размеров антенны, получено выражение для комплексной амплитуды пространственной весовой функции. Оценено предельное ослабление мощности помехи, подвергшейся случайному воздействию среды распространения.*

**Ключевые слова:** полезный сигнал, помеха, фазовые флуктуации, радиус корреляции.

### Введение

**Постановка проблемы.** При прохождении радиоволн через флуктуирующую атмосферу или при их отражении от подстилающей поверхности с неоднородным рельефом происходит уменьшение пространственной когерентности и в результате ухудшение накопления полезного сигнала и компенсации помеховых колебаний. Ослабление полезного сигнала в этих случаях рассмотрено в литературе подробно [1]. Ухудшение компенсации помехи рассмотрено недостаточно, особенно, если учесть, что на отношение сигнал/помеха оно сказывается значительно сильнее ослабления полезного сигнала. Настоящая статья имеет целью внести вклад в прояснения этих вопросов.

**Цель статьи:** получить аналитические выражения позволяющие оценить предельные возможности ослабления помеховых колебаний в устройствах осуществляющих оптимальную пространственную обработку принимаемых реализаций полезного сигнала и помехи, подвергшихся случайному воздействию среды распространения.

### Основная часть

Для оценки предельных возможностей компенсации помехи рассмотрим ее для наиболее благоприятных условий: источник помехи один; из пространственных флуктуаций учитываются только фазовые; режим установившийся; радиус корреляции фазовых флуктуаций значительно больше размера антенны; пространственная обработка прини-

маемых реализаций сигнала и помехи оптимальна по критерию максимума отношения сигнал/помеха. При отличающихся условиях результаты компенсации помехи должны быть только хуже. Это позволяет считать оценки, сделанные при принятых условиях предельными. В подавляющем большинстве случаев пространственная и временная обработки принимаемых реализаций осуществляется отдельно. Амплитудно-фазовое распределение на апертуре антенны (которую для простоты мы будем полагать линейной) определяется интегральным уравнением комплексной амплитуды  $\dot{R}(s)$  пространственной весовой функции [2]:

$$\operatorname{Re} \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} \Phi(x, s) \dot{R}(s) ds = \operatorname{Re} \dot{U}(x). \quad (1)$$

Здесь  $\dot{U}(x)$  – распределение комплексных амплитуд полезного сигнала вдоль антенны (далее будем полагать, что нормаль к антенне направлена на цель и  $\dot{U}(x) = \operatorname{const}$ );  $\Phi(x, s)$  – взаимная корреляционная функция в пределах апертуры комплексных амплитуд помеховых напряжений в точках  $x$  и  $s$  антенны;  $L$  – размер антенны.

При учете флуктуаций только фазы помеховой волны в [1] получено:

$$\Phi_1(x, s) = \sigma^2 \exp \left\{ -\sigma_\varphi^2 [1 - r(x, s)] + jb(x-s) \right\}, \quad (2)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия напряжения внешней помехи;  $\sigma_\varphi^2$  – дисперсия флуктуации фазы;  $r$  – коэффициент корреляции этих флуктуаций;  $b = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta$  – регулярное изменение фазы на единичной длине апертуры антенны;  $\lambda$  – длина волны;  $\theta$  – угол между нормалью к антенне и направлением прихода помеховой волны. Для описания фазового коэффициента корреляции будем использовать кусочно-линейную функцию:

$$r(x, s) = \begin{cases} 1 - \frac{|x-s|}{\rho_\varphi}, & \text{если } |x-s| \leq L; \\ 0, & \text{если } |x-s| > L, \end{cases} \quad (3)$$

где радиус корреляции фазы  $\rho_\varphi > L$ . Выбор такого закона обусловлен двумя соображениями. Плавность изменения корреляции соответствует поставленной цели получения предельных оценок. Важно, что для такого закона удастся получить аналитические выражения, наглядно иллюстрирующие влияющие факторы и возможности компенсации внешней помехи.

При описании внутренних шумов будем использовать известную [2] модель «белого» шума:

$$\Phi_2(x, s) = N_0 \delta(x-s), \quad (4)$$

где  $N_0$  – пространственная спектральная плотность мощности собственных шумов;  $\delta(x-s)$  – дельта-функция Дирака.

Вследствие независимости внутренних шумов и внешней помехи:

$$\Phi(x, s) = \Phi_1(x, s) + \Phi_2(x, s). \quad (5)$$

При принятых корреляционных функциях интегральное уравнение пространственной весовой функции приобретает вид:

$$\operatorname{Re} \left\{ \dot{R}(x) + \frac{\sigma^2}{N_0} \int_{-L/2}^{L/2} \exp[-\tilde{a}|x-s| + jb(x-s)] \dot{R}(s) ds \right\} = \operatorname{Re} \frac{2\dot{U}}{N_0}, \quad (6)$$

где  $\tilde{a} = \sigma_\varphi^2 / \rho_\varphi$ .

Не останавливаясь на процедуре решения этого интегрального уравнения (она может быть различной), укажем на возможность его замены дифференциальным уравнением:

$$\frac{d^2 \dot{R}}{dx^2} - j2b \frac{d\dot{R}}{dx} - (\tilde{a}^2 + b^2 + 2\tilde{a}\sigma^2 / N_0) \dot{R} = -(\tilde{a}^2 + b^2) \frac{2\dot{U}}{N_0}. \quad (7)$$

Решением уравнений и (6) и (7) в пределах антенны является выражение:

$$\dot{R}(x) = \frac{2\dot{U}}{N_0} \frac{\tilde{a}^2 + b^2}{\tilde{a}^2 + b^2 + 2\tilde{a}\sigma / N_0} \times \left[ 1 - F(a, \psi) \cdot A(a, \chi) \cdot \operatorname{ch}(\tilde{\gamma}x) e^{jbx} \right], \quad (8)$$

где  $\psi = bL/2$  – обобщенный угол прихода внешней помехи, отсчитываемый от нормали к антенне;

$a = \tilde{a}L/2 = \sigma_\varphi^2 L / (2\rho_\varphi)$  – параметр, обобщающий влияние основных решающих факторов (ниже будет показано, что он определяет предельные возможности ослабления внешней помехи);

$F(\psi, a) = (\psi \sin \psi - a \cos \psi) / (\psi^2 + a^2)$  – функция, учитывающая влияние обобщенного угла прихода помехи;  $\chi = \sigma^2 L / N_0$  – отношение мощностей внешней помехи и собственного шума на антенне;

$$\tilde{\gamma} = \sqrt{\tilde{a}^2 + 2\tilde{a} \cdot \sigma^2 / N_0}; \quad \gamma = \tilde{\gamma}L/2 = \sqrt{a^2 + a\chi};$$

$A(\chi, a) = \chi / (\operatorname{ch}\gamma + (\gamma/a) \cdot \operatorname{sh}\gamma)$  – функция, учитывающая влияние относительной мощности внешней помехи.

Справедливость решения (8) подтверждает его подстановка в исходное уравнение (6).

При отсутствии флуктуаций фронта помеховой волны  $a = 0$  и решение (8) переходит в полученное ранее [2] для этих условий соотношение:

$$\dot{R}(x) = \frac{2\dot{U}}{N_0} \left( 1 - \frac{\sin \psi}{\psi} \frac{\chi}{1 + \chi} e^{jbx} \right). \quad (9)$$

Постоянные множители перед квадратной скобкой в (8) далее будут отбрасываться, так как они сокращаются в рассматриваемых далее сравнительных оценках эффективности подавления внешней помехи.

Выражение (8) для оптимального амплитудно-фазового распределения вдоль антенны четко выделяет два параллельных канала пространственной обработки, функциональная схема которой изображена на рис. 1.

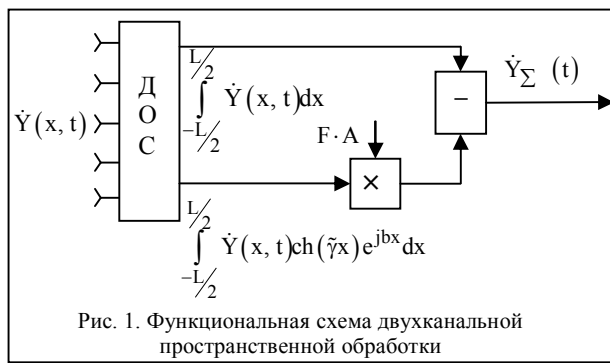


Рис. 1. Функциональная схема двухканальной пространственной обработки

На рис. 1 показаны: система идентичных элементов приемной линейной антенны; распределение комплексных амплитуд  $\hat{Y}(x, t)$  напряжения на этих элементах; диаграммообразующая схема (ДОС), реализующая амплитудно-фазовые распределения, описываемые уменьшаемым и вычитаемым разности в решении (8); умножающие и вычитающие устройства, завершающие оптимальную пространственную обработку, на выходе которой образуется напряжение с комплексной амплитудой  $\hat{Y}_\Sigma$ . Это напряжение далее используется для согласованной временной обработки. В верхнем канале рис. 1 используется равномерное амплитудно-фазовое распределение (с точностью до постоянных множителей  $R = 1$ ) при совпадении нормали к антенне с направлением прихода полезного сигнала.

Для произвольного угла прихода помеховой волны  $\theta$  нормирована дополнительно по  $L$  комплексная амплитуда напряжения на выходе антенны этого канала записывается в виде:

$$\hat{U}(\theta) = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} e^{j[bx + \varphi(x)]} dx, \quad (10)$$

где угол  $\psi$  – отсчитывается от нормали к антенне, а  $\varphi(x)$  – флуктуационная составляющая фазы.

Ее дисперсия с использованием методики и результатов [1] для фазового коэффициента корреляции (3) определяется соотношением:

$$\sigma^2 = \frac{1}{L^2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} e^{-\tilde{a}|x+s| + jb(x-s)} dx ds = e^{-2a} F^2(\psi, a) + \frac{2a - e^{-2a}}{2(\psi^2 + a^2)} + \frac{\psi^2 - a^2}{2(\psi^2 + a^2)^2}. \quad (11)$$

В нижнем канале (рис. 1) используется неравномерное амплитудное распределение, пропорциональное  $\text{ch}\tilde{\gamma}x$ , и линейное фазовое распределение  $-bx$ , обеспечивающее совпадение главного максимума характеристики направленности антенны этого канала с направлением на источник внешней помехи. В этом состоит формальное отличие схемы рис. 1 и рассмотренных ранее [2], при таком же нормировании, как и (10), комплексная амплитуда напряжения на выходе этого канала записывается в виде:

$$\hat{U}_1 = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \text{ch}\tilde{\gamma}x e^{j\varphi(x)} dx, \quad (12)$$

а ее дисперсия определяется аналогично предыдущему соотношением:

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{L^2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} \text{ch}\tilde{\gamma}s \cdot \text{ch}\tilde{\gamma}e^{-\tilde{a}|x-s|} dx ds = \frac{1}{\chi} \times \left[ \frac{e^{-a}}{A(\chi, a)} \left( \frac{\gamma}{a} \text{sh}\tilde{\gamma} \cdot \text{ch} a - \text{ch}\tilde{\gamma} \text{sh} a \right) - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\text{sh} 2\gamma}{2\gamma} \right) \right]. \quad (13)$$

Взаимная функция корреляции нормированных комплексных амплитуд напряжений на выходах рассмотренных выше антенных каналов определяется соотношением:

$$K = \frac{1}{L^2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} \text{ch}\tilde{\gamma}s \cdot e^{-\tilde{a}|x-s| + jbx} dx ds = \frac{e^{-a}}{\chi} \left( \frac{\gamma}{a} \text{sh}\tilde{\gamma} \cdot \text{ch} a - \text{ch}\tilde{\gamma} \cdot \text{sh} a \right) \times F(\psi, a) + \frac{a}{a^2 + \psi^2} \frac{\gamma \text{sh}\tilde{\gamma} \cdot \cos \psi + \psi \text{ch}\tilde{\gamma} \cdot \sin \psi}{\gamma^2 + \psi^2}. \quad (14)$$

Нормированное значение комплексной амплитуды помехового напряжения на выходе оптимальной пространственной обработки в соответствии с формулой (8) и рис. 1 определяется соотношением

$$\hat{U}_\Sigma = \hat{U} - F \cdot A \cdot U_1, \quad (15)$$

его дисперсия (мощность)

$$\sigma_\Sigma^2 = \sigma^2 + F^2 A^2 \sigma_1^2 - 2F \cdot A \cdot K, \quad (16)$$

а коэффициент ослабления мощности помехи

$$\eta = \frac{\sigma_\Sigma^2}{\sigma^2} = 1 + F^2 A^2 \frac{\sigma_1^2}{\sigma^2} - 2F \cdot A \frac{K}{\sigma^2}. \quad (17)$$

Вспомним, что эта оценка предельного ослабления помехи получена для оптимальной обработки по критерию максимума отношения сигнал/помеха. В литературе такая оценка рассмотрена и по критерию просто минимума дисперсии напряжения внешней помехи на выходе обработки принимаемых реализаций. При таком подходе в [2] получено

$$\eta = \sigma_\Sigma^2 / \sigma^2 = 1 - K^2 / (\sigma^2 \cdot \sigma_1^2). \quad (18)$$

Полученные соотношения позволяют делать точные оценки предельного ослабления мощности внешней помехи. Наряду с этими точными оценками имеет смысл получить их упрощенные приближения, учитывающие возможные значения используемых параметров и позволяющие более наглядно выявить основные закономерности.

При дальнейших оценках будем полагать

$$a = \left( \sigma_\varphi^2 / \rho_\varphi \right) \cdot (L/2) \ll 1. \quad (19)$$

Это связано не только с тем, что в большинстве практических ситуаций выполняется это условие. Ниже убедимся, что при невыполнении этого условия, теряет смысл сама задача компенсации внешней помехи. Условие  $a \ll \psi$  исключает случай совпадения углов прихода помехи и полезного сигнала. Условие  $\chi = \sigma_L^2 / N_0 \gg 1$  очевидно при наличии внешней помехи.

При выполнении этих условий

$$\sigma^2 \cong \left( \frac{\sin \psi}{\psi} \right)^2 (1 + 2\text{arctg}^2 \psi); \quad (20)$$

$$\sigma_1^2 \cong (1-a) \left( \frac{\gamma \text{sh} \gamma}{\chi a} \right)^2; \quad (21) \quad K \cong (1-a) \frac{\sin \psi}{\psi} \frac{\gamma \text{sh} \gamma}{\chi a}. \quad (22)$$

Подстановка этих приближенных соотношений как в (17), так и в (18) приводит к одному и тому же простому и физически обоснованному выражению для коэффициента ослабления мощности внешней помехи:

$$\eta = \frac{\sigma_{\Sigma}^2}{\sigma^2} = a \frac{1 + 2\text{ctg}^2 \psi}{1 + 2\text{arctg}^2 \psi}. \quad (23)$$

Зависимость от обобщенного угла  $\psi$  прихода помеховой волны физически обоснована. Наибольшее ослабление  $\eta = a$  имеет место для максимумов боковых лепестков диаграммы направленности основной антенны ( $\text{ctg} \psi = 0$ ). Для нулевых значений этой диаграммы направленности ( $\text{ctg}^2 \psi = \infty$ ) ослабление отсутствует ( $\eta = 1$ ), так как отсутствует и сама внешняя помеха.

Влияние основных факторов, определяющих предельное ослабление помеховой волны, описывается параметром  $a = \sigma_{\phi}^2 L (2\rho_{\phi})^{-1}$ , обобщающим влияние дисперсии  $\sigma_{\phi}^2$  и пространственного радиуса корреляции  $\rho_{\phi}$  фазовых флуктуаций, а так же размера  $L$  антенны. Параметры  $\sigma_{\phi}^2$  и  $\rho_{\phi}$  пространственных фазовых флуктуаций в основном определяются условиями распространения волн. Например, флуктуациями диэлектрической проницаемости тропосферы при прямом распространении или

неровностями рельефа подстилающей поверхности при использовании отраженных волн. Имеется значительное количество публикаций, содержащих теоретические и экспериментальные оценки параметров  $\sigma_{\phi}^2$  и  $\rho_{\phi}$  (например, [3, 4]).

### Выводы

Предварительные оценки [5, 6] влияния условий распространения радиоволн на возможности ослабления воздействия внешних помех показывают существенность такого влияния даже для сравнительно небольших антенн.

### Список литературы

1. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин. – М.: Сов. радио, 1970. – 384 с.
2. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 410 с.
3. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля / С.М. Рытов, Ю.А. Кравцов, В.И. Татарский. – М.: Наука, 1978. – 254 с.
4. Кравцов Ю.А. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли / Ю.А. Кравцов, З.И. Фейзулин, А.Г. Виноградов. – М.: Радио и связь, 1983. – 345 с.
5. Минервин Н.Н. Влияние случайных искажений в тропосфере фронта помеховой волны на эффективность ее подавления корреляционным компенсатором / Н.Н. Минервин // Радиотехника: всеукр. научно-техн. сб. – Х.: ХНУРЕ, 2006. – Вып. 147. – С. 149-156.
6. Кузнецов О.Л. Влияние умов поширення активних маскувальних завод на заводозахисність радіолокаційних станцій радіотехнічних військ / О.Л. Кузнецов, В.А. Таршин, М.М. Мінервін // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2008. – Вип. 4 (16). – С. 67-69.

Поступила в редколлегию 10.09.2009

Рецензент д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ГРАНИЧНІ МОЖЛИВОСТІ ОСЛАБЛЕННЯ ЗОВНІШНЬОЇ ПЕРЕШКОДИ ПРИ ОПТИМАЛЬНІЙ ПРОСТОРОВІЙ ОБРОБЦІ ПРИЙНЯТИХ РЕАЛІЗАЦІЙ КОРИСНОГО СИГНАЛУ І ПЕРЕШКОДИ, ЩО ПІДДАЛИСЯ ВИПАДКОВІЙ ДІЇ СЕРЕДОВИЩА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ

М.М. Мінервін, Д.В. Карлов, В.Л. Місайлов, О.В. Лукашук

У статті отримані формули для оцінювання гранично досяжного ослаблення помехового сигналу, що піддалися випадковій дії середовища розповсюдження. Отримані співвідношення дозволяють оцінити граничні можливості компенсації помехових коливань, оскільки розгляд проведений стосовно випадку їх проходження через оптимальні пристрої обробки по критерію максимуму відношення сигнал/перешкода. Стосовно випадку дії однієї перешкоди, в умовах, коли радіус кореляції фазових флуктуацій значно більше розмірів оцінки, отриманий вираз для комплексної амплітуди просторової вагової функції. Використовуючи цей вираз, розроблена функціональна схема каналів просторової обробки і оцінено ослаблення потужності перешкоди запропонованим пристроєм.

**Ключові слова:** корисний сигнал, перешкода, фазові флуктуації, радіус кореляції.

### MAXIMUM POSSIBILITIES OF EXTERNAL NOISE WEAKENING AT THE OPTIMAL SPATIAL TREATMENT OF THE ACCEPTED REALIZATIONS OF THE USEFUL SIGNAL AND NOISE EXPOSED TO ACCIDENTAL INFLUENCE OF DISTRIBUTION ENVIRONMENT

N.N. Minervin, D.V. Karlov, V.L. Misaylov, E.V. Lukashuk

In article formulas for estimation extremely achievable easing interfering a signal, subject to casual influence of the environment of distribution are received. The received parities allow to estimate limiting indemnification possibilities interfering fluctuations as consideration is spent with reference to a case of their passage through processing devices in which the signal/hindrance is optimum by criterion of a maximum of the relation. With reference to a case of influence of one hindrance, in conditions when radius of correlation of phase fluctuations much more the sizes of an estimation, expression for complex amplitude of spatial weight function is received. Using this expression, the function chart of channels of spatial processing is developed and easing of capacity of a hindrance by the offered device is estimated.

**Keywords:** Useful signal, noise, phase fluctuations, correlation radius.