

УДК 621.391.26

М.М. Минервин¹, В.Д. Карлов¹, М.М. Петрушенко², О.Я. Луковський¹¹Харьковський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків²Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця

ГРАНИЧНІ МОЖЛИВОСТІ ПОСЛАБЛЕННЯ ЗОВНІШНЬОЇ ЗАВАДИ ПРИ ОПТИМАЛЬНІЙ ПРОСТОРОВІЙ ОБРОБЦІ РЕАЛІЗАЦІЙ КОРИСНОГО СИГНАЛУ І ЗАВАДИ, ЩО ПРИЙМАЮТЬСЯ, В РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ ПРИМОРСЬКОГО БАЗУВАННЯ

У статті оцінений вплив тропосфери і підстилаючої поверхні з неоднорідним рельєфом на якість компенсації завадових коливань радіотехнічних системах приморського базування. Отримані співвідношення дозволяють оцінити бокові можливості компенсації завадових коливань, оскільки розгляд проведений стосовно випадку їх проходження через пристрої обробки в яких є оптимальною по критерію максимуму відношення сигнал/завада. Стосовно випадку дії однієї завади, 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 завади запропонованим пристроєм.

Ключові слова: завадові коливання, корисний сигнал, компенсація амплітуди, просторова вагова функція, амплітудно-фазовий розподіл, дисперсія, кореляційний момент.

Вступ

Постановка проблеми: Питання компенсації завадових коливань присвячено значне число робіт, перелік яких досить повно представлений в [1]. У відомих роботах придушення завадових коливань забезпечувалося за рахунок використання інформації про їх просторову когерентність [2]. Типову схему кореляційного компенсатора розглянутого в [2, 3] яка забезпечувала тим більше придушення завадового коливання, що оцінюється по критерію максимуму дисперсії зовнішньої завади на вході схеми обробки реалізацій, що приймаються, чим вище ступінь кореляції завадових коливань в основному і в допоміжному каналах [2]. Як наголошувалося в [4] ослаблення кореляції цих коливань може відбуватися за рахунок спотворень фронту завадової хвилі в турбулентній атмосфері або при віддзеркаленні від підстилаючої поверхні з неоднорідним рельєфом. Найбільш істотними такі спотворення виявляються [5, 6] у разі локації цілей над морем, особливо в умовах існування тропосферних радіохвильоводів [6]. Про це свідчать результати експериментальних досліджень в процесі проведення яких виявлено, що при локації цілей над морем в коливаннях, що приймаються, зафіксовано істотне (в порівнянні з локацією над сушею) зменшення їх просторової когерентності. Вказаний вплив приводить до погіршення накопичення корисного сигналу і компенсації завадових коливань. Разом з тим у відомій літературі аналізу граничних можливостей ослаблення завадових коливань при оптимальній просторовій обробці по критерію максимуму відношення сигнал/завада приділена недостатня увага. Дана стаття вносить

певний внесок до прояснення цих питань.

Мета статті: отримати аналітичні вирази ослаблення завадових коливань, що дозволяють оцінити граничні можливості, в пристроях тих, що здійснюють оптимальну просторову обробку по критерію максимуму відношення сигнал/завада.

Основна частина

Для оцінки бокових можливостей компенсації завади розглянемо її для найбільш сприятливих умов: джерело завади один; з просторових флуктуацій враховуються тільки фазові; режим сталий; радіус кореляції фазових флуктуацій значно більше розміру антени; просторова обробка реалізацій сигналу і завади, що приймаються, оптимальна по критерію максимуму відношення сигнал/завада. За умов, що відрізняються, результати компенсації завади повинні бути тільки гірше. Це дозволяє рахувати оцінки, зроблені за прийнятих умов боковими.

У переважній більшості випадків просторова і тимчасова обробки реалізацій, що приймаються, здійснюється роздільно. Амплітудно-фазовий розподіл на апертурі антени (яку для простоти ми будимо вважати лінійною) визначається інтегральним рівнянням комплексної амплітуди $\dot{R}(s)$ просторової вагової функції [2]:

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

Тут $\dot{U}(x)$ – розподіл комплексних амплітуд корисного сигналу уздовж антени (далі будимо вважати, що нормаль до антени направлена на ціль і

$\dot{U}(x) \cdot U = \text{const}$ в межах апертури); $\Phi(x, s)$ – взаємна кореляційна функція комплексних амплітуд завадових напруг в точках x і s антени; L – розмір антени.

При обліку флуктуацій тільки фази завадової хвилі в [3] отримано:

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

де σ^2 – дисперсія напруги зовнішньої завади; σ_φ^2 – дисперсія флуктуації фази; r – коефіцієнт кореляції цих флуктуацій; $b = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta$ – регулярна зміна фази

на одиничній довжині апертури антени; λ – довжина хвилі; θ – кут між нормаллю до антени і напрямом приходу завадової хвилі. Для опису фазового коефіцієнта кореляції будимо використовувати куочно-лінійну функцію:

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

де радіус кореляції фази $\rho_\varphi > L$. Вибір такого закону обумовлений двома міркуваннями. Плавність зміни кореляції відповідає поставленій меті отримання граничних оцінок. Можливо що для такого закону вдається отримати аналітичні вирази, наочно ілюструючи впливаючі чинники і можливості компенсації зовнішньої завади.

При описі внутрішніх шумів будемо використовувати відому [2] модель білого шуму:

$$\Phi_2(x, s) = N_0 \sigma(x-s),$$

де N_0 – просторова спектральна щільність потужності власних шумів; $\sigma(x-s)$ – дельта-функція Дірака.

Унаслідок незалежності внутрішніх шумів і зовнішньої завади:

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

При прийнятих кореляційних функціях інтегрального рівняння просторової вагової функції набуває вигляд:

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

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

Не зупиняючись на процедурі вирішення цього інтегрального рівняння (вона може бути різною), вкажемо на можливість його заміни диференціальним рівнянням:

$$\frac{d\dot{R}}{dx^2} - j2b \frac{d\dot{R}}{dx} - (\tilde{a}^2 + b^2 + 2\tilde{a}\sigma^2 / N_0) \dot{R} = -(\tilde{a} + b^2) \frac{2\dot{U}}{N_0}. \quad (3)$$

Вирішенням рівнянь (2) і (3) в межах антени є

вираз:

$$\dot{R}(x) = \frac{2\dot{U}}{N_0} \frac{\tilde{a}^2 + b^2}{\tilde{a}^2 + b^2 + 2\tilde{a}\sigma / N_0} \times \left[1 - F(a, \psi) \cdot A(a, \chi) \cdot \text{ch}(\tilde{\gamma}x) e^{j\beta x} \right]. \quad (4)$$

Тут $\psi = bL/2$ – узагальнений кут приходу зовнішньої завади, відлічуваний від нормалі до антени; $a = \tilde{a}L/2 = \frac{\sigma_\varphi^2 L}{2\rho_\varphi}$ – параметр, узагальнений вплив

основних вирішальних чинників (нижче буде показано, що він визначає граничні можливості ослаблення зовнішньої завади); $F(\psi, a) = \frac{\psi \sin \psi - a \cos \psi}{\psi^2 + a^2}$ –

функція, що враховує вплив узагальненого кута приходу завади; $\chi = \sigma^2 L / N_0$ – відношення потужностей завади і власного шуму на антені:

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

$A(\chi, a) = \frac{\chi}{\text{ch}\gamma + \frac{\gamma}{a} \text{sh}\gamma}$ – функція, що враховує вплив

відносної потужності зовнішньої завади.

Справедливість рішення (4) підтверджує його підстановка в початкове рівняння (2).

За відсутності флуктуацій фронту завадової хвилі $a=0$ і рішення (4) переходить в отримане раніше [2] для цих умов, співвідношення:

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

Постійні множники перед квадратною дужкою в (4) далі будуть відкидатися, оскільки вони скорочуються в порівняльних оцінках ефективності придушення зовнішньої завади, що розглядаються далі.

Вираз (4) для оптимального амплітудно-фазового розподілу уздовж антени чітко виділяє два паралельні канали просторової обробки, функціональна схема якої зображена на рис. 1.

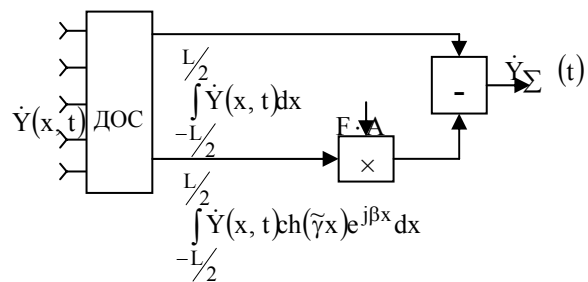


Рис. 1. Функціональна схема

На рисунку показані: система ідентичних елементів приймальної лінійної антени; розподіл комплексних амплітуд $\dot{Y}(x, t)$ напруга на цих елемен-

тах; діаграмоутворююча схема (ДУС), що реалізує амплітудно-фазовий розподіл, описувані зменшуваним і таким, що віднімається різниці в рішенні (4); помножуючі і віднімаючі пристрої, що завершують оптимальну просторову обробку, на вході якої утворюється напруга з комплексною амплітудою \dot{Y}_Σ . Ця напруга далі використовується для узгодженої тимчасової обробки.

У верхньому каналі рис.1 використовується рівномірний амплітудно-фазовий розподіл (з точністю до постійних множників $R = 1$) при збігу нормалі до антени з напрямом приходу корисного сигналу.

Для довільного кута приходу завадової хвилі θ нормована додатково L комплексна амплітуда напруги на вході антени цього каналу записується у вигляді:

$$\dot{U}(\theta) = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} e^{j[\beta x + \varphi(x)]} dx, \quad (5)$$

де кут ψ відлічується від нормалі до антени, а $\varphi(x)$ – флуктуація складова фази.

Її дисперсія з використанням методики і результатів [3] для фазового коефіцієнта кореляції (1) визначається співвідношенням:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{1}{L^2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} e^{-a|x+s|+j\beta(x-s)} dx ds = \\ &= e^{-2a} F^2(\psi, a) + \frac{2a - e^{-2a}}{2(\psi^2 + a^2)} + \frac{\psi^2 - a^2}{2(\psi^2 + a^2)^2}. \end{aligned}$$

У нижньому каналі рис. 1 використовується нерівномірний амплітудний розподіл, пропорційний $\text{ch}\gamma x$ і лінійний фазовий розподіл $-\beta x$ що забезпечує збіг головного максимуму характеристики спрямованості антени цього каналу з напрямом на джерело зовнішньої завади. При такому ж нормуванні, як і (5), комплексна амплітуда напруги на вході цього каналу записується у вигляді:

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

а її дисперсія визначається аналогічно попередньому співвідношенням

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

Взаємна функція кореляції нормативних комплексних амплітуди напруги на входах розглянутих вище антенних каналів визначається співвідношенням

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{L^2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} \text{ch}\gamma s \cdot e^{-a|x-s|+j\beta x} dx ds = \\ &= \frac{e^{-a}}{\chi} \left(\frac{\gamma}{a} \text{sd}\gamma \cdot \text{ch} a - \text{ch}\gamma \cdot \text{sh} a \right) \times \\ &\times F(\psi, a) + \frac{a}{a^2 + \psi^2} \frac{\gamma \text{sh}\gamma \cdot \cos \psi + \psi \text{ch}\gamma \cdot \sin \psi}{\gamma^2 + \psi^2}. \end{aligned}$$

Нормоване значення комплексної амплітуди завадової напруги на вході оптимальної просторової обробки відповідно до формули (4) і рис. 1 визначається співвідношенням

$$\dot{U}_\Sigma = \dot{U} - F \cdot A \cdot U_1,$$

його дисперсія (потужність)

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

а коефіцієнт ослаблення потужності завади

$$\eta = \frac{\sigma_\Sigma^2}{\sigma^2} = 1 + F^2 A^2 \frac{\sigma_1^2}{\sigma^2} - 2F \cdot A \frac{K}{\sigma^2}. \quad (6)$$

Пригадаємо, що ця оцінка граничного ослаблення завади отримана для оптимальної обробки по критерію максимуму відношення сигнал/завада. У літературі така оцінка розглянута і по критерію просто мінімуму дисперсії напруги зовнішньої завади на вході схеми обробки реалізацій, що приймаються. При такому підході в [2] отримано

$$\eta = \frac{\sigma_\Sigma^2}{\sigma^2} = 1 - \frac{K}{\sigma_1^2}. \quad (7)$$

Отримані співвідношення дозволяють робити точні оцінки граничного ослаблення потужності зовнішньої завади. Разом з цими точними оцінками має сенс отримати їх спрощені наближення, що враховують можливі значення використовуваних параметрів і що дозволяють наочніше виявити основні закономірності.

При подальших оцінках будимо вважати

$$a = \frac{\sigma_\varphi^2}{\rho_\varphi} \frac{1}{2} \ll 1.$$

Це пов'язано не тільки з тим, що в більшості практичних ситуацій виконується ця умова. Нижче переконаємося, що при невиконанні цієї умови, втрачає сенс саме завдання компенсації зовнішньої завади.

Умова приходу завади і корисного сигналу.

Умова $\chi = \sigma_L^2 / N_0 \gg 1$ очевидно за наявності зовнішньої завади.

При виконанні цих умов:

$$\sigma^2 \cong \left(\frac{\sin \psi}{\psi} \right)^2 (1 + 2 \arctg^2 \psi); \quad \sigma_1^2 \cong (1 - a) \left(\frac{\gamma \text{sh}\gamma}{\chi a} \right)^2;$$

$$K \cong (1 - a) \frac{\sin \psi}{\psi} \frac{\gamma \text{sh}\gamma}{\chi a}.$$

Постановка цих наближених співвідношень як в (6), так і в (7) приводить до одного і того ж прос-

того і фізично обґрунтованого виразу для коефіцієнта ослаблення потужності зовнішньої завади

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

Залежність від узагальненого кута ψ приходу завадової хвилі фізично обґрунтована. Найбільше ослаблення $\eta = a$ має місце для максимумів бічних пелюсток діаграми спрямованості основної антени ($\text{ctg} \psi = 0$). Для нульових значень цієї діаграми спрямованості ($\text{ctg}^2 \psi = \infty$) ослаблення відсутнє ($\eta = 1$) оскільки відсутня і сама зовнішня завада.

Вплив основних чинників, що визначають граничне ослаблення завадової хвилі, описується пара-

метром $a = \frac{\sigma_{\Phi}^2 L}{2\rho_{\Phi}}$ узагальнений вплив дисперсії σ_{Φ}^2 і просторового радіуса кореляції ρ_{Φ} фазових флуктуацій, а так само розміру L антени.

Параметри σ_{Φ}^2 і ρ_{Φ} просторових фазових флуктуацій, в основному визначаються умовами розповсюдження хвиль. Наприклад, флуктуаціями діелектричної проникності тропосфери при прямому розповсюдженні або нерівностями рельєфу підстилаючої поверхні при використанні відбитих хвиль. Є значна кількість публікацій, що містять теоретичні і експериментальні оцінки параметрів σ_{Φ}^2 і ρ_{Φ} (наприклад [7, 8]).

Попередні оцінки [4, 9] впливу умов розповсюдження радіохвиль на можливості ослаблення дії зовнішніх завад показують істотність такого впливу навіть для порівняно великих антен.

Список літератури

1. *Радіоелектронні системи. Основи побудови і теорія: довідник / Під ред. Я.Д. Ширмана.* – М.: Радіоелектроніка, 2007 – 510 с.
2. *Ширман Я.Д. Теорія і техніка обробки інформації радіолокації на тлі перешкод / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос.* – М.: Радіо і зв'язок, 1981. – 350 с.
3. *Шифрін Я.С. Питання статистичної теорії антен / Я.Д. Ширман.* – М.: Сов. радіо, 1970. – 410 с.
4. *Мінервін Н.Н. Вплив випадкових спотворень в тропосфері фронту помехової хвилі на ефективність її придушення кореляційним компенсатором / Н.Н. Мінервін // Радіотехніка: всеукр. науково-технічна збірка.* – Х.: ХНУРЕ, 2006. – Вип. 147. – С. 149-156.
5. *Експериментальне дослідження параметрів тропосферних радіохвильоводів над морем / В.Д. Карлов, Н.Н. Петрушенко, Е.В. Лукашук, А.В. Челпанов // Системи управління, навігації та зв'язку.* – К.: ЦНДІ НУ, 2008. – Вип. 3 (7). – С. 54-57.
6. *До питання про вибір позиції радіотехнічної системи приморського базування / В.Д. Карлов, Н.Н. Петрушенко, Е.В. Лукашук, А.В. Челпанов // Системи управління, навігації та зв'язку.* – К.: ЦНДІ НУ, 2008. – Вип. 2 (6). – С. 10-14.
7. *Рітов С.М. Введення в статистичну радіофізику. Частина II Випадкові поля / С.М. Рітов, Ю.А. Кравцов, В.І. Татарський.* – М.: Наука, 1978. – 280 с.
8. *Кравцов Ю.А. Проходження радіохвиль через атмосферу Землі / Ю.А. Кравцов, З.І. Фейзулін, А.Г. Віноградов.* – М.: Радіо і зв'язок, 1983. – 187 с.
9. *Мінервін Н.Н. Вплив флуктуацій фронту хвилі помехового сигналу на ефективність його придушення / Н.Н. Мінервін, К.С. Васюта, І.Е. Шумейко // Радіотехніка: всеукр. науково-технічна збірка.* – Х.: ХНУРЕ, 2004. – Вип. 136. – С. 95-101.

Надійшла до редколегії 6.02.2009

Рецензент: д-р техн наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

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

Н.Н. Минервин, В.Д. Карлов, Н.Н. Петрушенко, О.Я. Луковский

В статье оценено влияние тропосферы и подстилающей поверхности с неоднородным рельефом на качество компенсации помеховых колебаний радиотехнических системах приморского базирования. Полученные соотношения позволяют оценить предельные возможности компенсации помеховых колебаний, поскольку рассмотрение проведено применительно к случаю их прохождения через устройства обработки в которых является оптимальной по критерию максимума отношения сигнал/помеха. Применительно к случаю воздействия одной помехи, в условиях когда радиус корреляции фазовых флуктуаций значительно больше размеров оценки, получено выражение для комплексной амплитуды пространственной весовой функции. Используя это выражение, разработана функциональная схема каналов пространственной обработки и оценено ослабление мощности помехи предложенным устройством.

Ключевые слова: помеховые колебания, полезный сигнал, компенсация амплитуды, пространственная весовая функция, амплитудно-фазовое распределение, дисперсия, корреляционный момент.

MAXIMUM POSSIBILITIES OF WEAKENING OF EXTERNAL NOISE AT OPTIMUM SPATIAL TREATMENT OF THE ACCEPTED REALIZATION OF USEFUL SIGNAL AND HINDRANCE, IN THE RADIO ENGINEERING SYSTEMS OF THE SEASHORE BASING

N.N. Minervin, V.D. Karlov, N.N. Petrusenko, O.Y. Lukovskiy

In the article influence of troposphere and laying surface is appraised with heterogeneous relief on quality of indemnification of pomekhovoy vibrations radio engineering systems of the seashore basing. The got correlations allow to estimate possibilities of indemnification of pomekhovoy vibrations, as consideration is conducted as it applies to the case of their passing through the devices of treatment in which is optimum on the criterion of a maximum of relation signal/hindrance. As it applies to the case of influence of one hindrance, in terms when radius of correlation of phase fluctuations considerably anymore sizes of estimation, expression for complex amplitude of spatial gravimetric function is got. Utilizing this expression, the functional diagram of ductings of spatial treatment is developed and weakening of power of hindrance is appraised by the offered device.

Keywords: check vibrations, useful signal, indemnification of amplitude, spatial gravimetric function, gain-phase distributed, dispersion, correlation moment.