

УДК 621.3

Д.П. Пашков

ДП “Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління”, Київ

## АНАЛІЗ СМУГОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТУРБУЛЕНТНОГО ТРОПОСФЕРНОГО РАДІОКАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

У статті представлені результати проведеного дослідження смугових властивостей неоднорідного середовища тропосферного шару для передачі інформації в радіоканалі. Це дало можливість виділити певні турбулентні властивості та аналітичну модель компенсації неоднорідностей для підвищення якості прийому радіосигналів.

**Ключові слова:** аналіз, смугові властивості, турбулентність, тропосфера, радіоканал.

### Вступ

На поточний момент у світі при передачі інформації в тропосферні шари Землі активно використовуються надвисокочастотні (НВЧ) і крайневисокочастотні діапазони довжин (КВЧ), які мають ряд переваг і надають можливість підвищити якість функціонування радіотехнічних систем і комплексів (РТС і К) [1]. Зокрема РТС і К із застосуванням НВЧ і КВЧ дозволяють [1 – 3]:

створювати більш вузькі спрямовані пучки випромінювання в РТС і К, що дає можливість підвищити завадостійкість прийому радіосигналів;

здійснювати передачу сигналів у більшій смузі частот, ніж системи з більш довгими радіохвилями, що істотно збільшує швидкість і обсяг передачі інформації;

вирішувати питання зменшення потужності радіопередавача РТС і К завдяки концентрації енергії у вузькому діапазоні кутів та інші.

Хоча для РТС і К, які використовують НВЧ і КВЧ діапазон довжин хвиль, є обмеження, пов'язані з особливостями поширення радіохвиль у тропосферному шарі Землі. Це зумовлено впливом тропосферних ефектів, одним з яких є смугові властивості тропосфери.

**Аналіз літератури.** Аналітичний огляд літератури [2÷5] показав, що тропосферні ефекти призводять до зміни АЧХ і ФЧХ радіосигналу, що впливає на якість функціонування РТС і К. Крім цього тропосферний канал зв'язку задовільно описується лінійною моделлю з постійними або повільно змінюються в часі параметрами. Тому знання імпульсної перехідної функції або передавальної функції каналу зв'язку є необхідною і достатньою умовою для розрахунку форми сигналу на виході.

**Мета статті.** Метою статті являється провести аналіз літератури для пошуку рішення оптимального прийому радіосигналу на основі побудови аналітичної моделі обліку флуактаційних властивостей тропосферного шару Землі.

### Викладення основного матеріалу

Під час дослідження смугових властивостей реальних радіоканалів НВЧ і КВЧ діапазонів хвиль суттєвим є питання про ступінь когерентності сигналів на різних частотах. Величина частотного рознесення, при якій флуктуації амплітуди і фази стають некорельованими, є найважливішою характеристикою радіоканалу, визначаючи по суті максимальну ширину смуги пропускання сигналу, який може бути переданий без спотворень.

Кореляційна флуктуація амплітуди і фази двох монохроматичних сигналів, що поширюються в неоднорідному середовищі, вивчалася в роботах [4, 5]. Проте прийнята авторами цих робіт модель випадкових неоднорідностей з гауссовим спектром не дозволяє застосовувати отримані ними результати безпосередньо до поширення хвиль в реальних умовах. Дійсно, спектр флуктуацій показника заломлення в турбулентній тропосфері в широкій області масштабів неоднорідностей має степеневий характер. Тому для реальних умов, як правило, неможливо ввести поняття про характерний масштаб неоднорідностей. У [6] наведено ґрунтовний аналіз кореляційних і спектральних характеристик частотно-рознесених сигналів у випадково-неоднорідному середовищі в припущенні, що спектральна щільність діелектричної проникності має степений характер

$$\Phi(\alpha) = 0,033 \cdot C_\epsilon^2 (\alpha_0^2 + \alpha^2)^{-11/3} \exp(-\alpha^2/\alpha_m^2),$$

де  $C_\epsilon$  – структурна постійна флуктуацій  $\epsilon$ ;  $\alpha_0$  і  $\alpha_m$  – внутрішній і зовнішній масштаби турбулентності, якщо поле турбулентних пульсацій в інтервалі  $\alpha_0 \ll \alpha \ll \alpha_m$  описується законом двох третин Колмогорова-Обухова.

Корелятори флуктуацій рівня  $\chi_j = \text{Re}\psi_j$  і фази  $S_j = \text{Im}\psi_j$  сигналів на частотах  $\omega_1$   $\omega_2$  виражаються через дві комплексні кореляційні функції  $R_1 = \langle \psi_1, \psi_2^* \rangle$  і  $R_2 = \langle \psi_1, \psi_2 \rangle$  співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} R_\chi &= \langle \chi_1, \chi_2 \rangle \\ R_S &= \langle S_1, S_2 \rangle \end{aligned} \right\} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[R_1 \pm R_2],$$

$$\left. \begin{aligned} R_{\chi S} &= \langle \chi_1, S_2 \rangle \\ R_{S\chi} &= \langle S_1, \chi_2 \rangle \end{aligned} \right\} = \frac{1}{2} \operatorname{Im}[R_2 \mp R_1],$$

де  $\psi_j$  – флуктуації комплексної фази хвильового поля частоти  $\omega_j$  ( $j = 1, 2$ ) на відстані від передачі.

В роботі [6] отримані вирази для кореляції рівня і фази в загальному вигляді, однак, основний інтерес для інтерпретації результатів вимірювань представляють розглянуті там окремі випадки:

1. Дальня зона відносно великомасштабних неоднорідностей

$$d_0 \gg 1 \quad (d_m \gg \gamma^2); \quad d_0 = \frac{\alpha_0^2 L}{k}; \quad \gamma = \frac{\alpha_0}{\alpha_m}; \quad k = \frac{\omega}{C}, \quad (1)$$

де  $d_0$ ,  $d_m$ ,  $\gamma$ ,  $k$  – хвильові параметри;  $L$  – протяжність траси;  $C$  – швидкість світла у вакуумі.

2. Середня (проміжна) зона

$$\gamma^2 \ll d_0 \ll 1; \quad (1 \ll d_m \ll \gamma^2),$$

коли поперечний розмір зони Френеля більший порівняно із зовнішнім масштабом турбулентності і в той же час значно перевищує внутрішній масштаб.

3. Близня зона відносно дрібномасштабних неоднорідностей

$$d_m \ll 1 \quad (d_0 \ll \gamma^2).$$

Відповідно до зазначеного розбиття області для хвильових параметрів  $d_0$ ,  $d_m$  приведена асимптотична оцінка інтервалів [4]. Показано, що отримані результати збігаються з аналогічними в роботі [3] для дисперсії рівня, розрахованими при  $\alpha=0$ . В середній і ближній зоні флуктуації амплітуди, як і слід було очікувати, нечутливі до виду великомасштабної частини спектра неоднорідностей і визначається в основному лінійними розмірами порядку зони Френеля в області 2 і порядку  $\alpha_m^{-1}$  – в області геометричної оптики 3. Флуктуації фази, навпаки, пов'язані тільки з великомасштабними неоднорідностями з розмірами  $\cong \alpha_0^{-1}$  і не залежить від виду спектра дрібномасштабних неоднорідностей. З цієї причини навіть у поздовжньому випадку геометричної оптики коефіцієнт кореляції амплітудних і фазових флуктуацій зв'язується в міру малості параметра  $\gamma$ , тобто в міру відмінності великих розмірів, визначальних флуктуації фази, і малих, що визначають флуктуації амплітуди, неоднорідностей. При однопараметричному спектрі неоднорідностей, коли  $\alpha_m \cong \alpha_0$ , коефіцієнт кореляції  $K_{\chi S}$  в ближній зоні має порядок 1. Наприклад, для гауссового спектра  $K_{\chi S} = 0,57$ .

Особливий інтерес представляє дослідження кореляції флуктуації рівня  $K_\chi$  і фази  $K_S$  при частотному рознесенні. З теорії випливає, що в далекій зоні  $d_0 \gg 1$  в інтервалі малих частотних рознесення відмінність коефіцієнта кореляції від 1 має порядок  $\sim \Omega^2$ , при цьому

$$\Omega = (\omega_2 - \omega_1) / (\omega_2 + \omega_1), \quad \omega_2 \geq \omega_1 \text{ і } 0 < \Omega < 1.$$

При збільшенні частотного рознесення параболічна залежність змінюється майже лінійною  $\Omega^{5/6}$ . Істотне спадання функції кореляції відбувається лише при  $d_0 \Omega \gg 1$ .

Таким чином, в дальній зоні інтервал частотної кореляції рівня і фази збігається і дорівнює за порядком величини  $\Omega_k \sim 1/d_0$ .

Якісно такий результат виходить і для Гауссового спектра неоднорідностей. Наближена оцінка інтервалу частотної кореляції в дальній зоні може бути отримана наступним способом.

Так як кутова широта суттєвою для розсіювання області має  $\sim 1/(kl)$  (де  $l$  – характерний розмір неоднорідностей), то різниця хода, незначна при поширенні в середовищі за рахунок розсіювання, має порядок  $\sim 1/(kl)^2$ , а відповідна їм часова затримка

$\Delta\tau = L / (C(kl)^2)$ . Ширина смуги  $\Delta\omega$  пов'язана з часом багатопроменевості  $\sigma\tau$  (яка характеризує розпливання  $\sigma_{\text{инс}}$  при поширенні) співвідношенням невідзначеностей  $\Delta\omega\Delta\tau \geq 1$ , звідки і слідує оцінка

$$\Omega \cong \Delta\omega/\omega \cong kl^2/L \sim d_0^{-1},$$

(якщо в якості характерного лінійного розміру неоднорідностей прийняти  $l \approx \alpha_0^{-1}$ ).

В середній зоні ( $\gamma^2 \ll d_0 \ll 1$ ) функція кореляції  $K_\chi$  не залежить від характерних масштабів неоднорідностей ( $\alpha_0^{-1}$  і  $\alpha_m^{-1}$ ), а визначається лише показником  $\rho$  посилення спектра в області  $\alpha_0 \ll \alpha \ll \alpha_m$ . Для тропосфери, наприклад, ця область являється дуже широкою, так як характерні розміри  $\alpha_0$  і  $\alpha_m$  відрізняються на декілька порядків [ $\alpha_m \sim (1 \div 10) \text{ см}^{-1}$ ,  $\alpha_0 = (10^{-2} \div 10^{-3}) \text{ м}^{-1}$ ]. Тому практично по всім питанням, пов'язаних з впливом тропосфери на поширення дециметрових і більш коротких радіохвиль, поперечні розміри зони Френеля потрапляють в інтервал між зовнішніми і внутрішніми масштабами турбулентності і для функції частотної кореляції флуктуації амплітуди справедлива універсальна формула

$$K_\chi = \left(1 - \Omega_R^{\rho/2-1}\right) / \left(1 - \Omega_R^2\right)^{(\rho-2)/4}.$$

де  $\Omega_R$  – частотне рознесення;  $\rho$  – показник посилення спектра. Що стосується функції кореляції фази, то при вказаних частотах розсіювання  $\gamma^2 \ll d_0 \Omega \ll 1$  вона відрізняється від одиниці на малу  $\sim d_0^{\rho/2-1}$ .

Зокрема, при  $\Omega \ll 1$  маємо

$$K_S \cong 1 - \frac{1}{2} C_\sigma (d_0 \Omega_R)^{\rho/2-1},$$

де  $C_\sigma$  – структурна постійна.

В ближній зоні  $d_m \ll 1$  флуктуації рівня і фази на різних частотах виявляються корельованими: відмінність  $K_\chi$  і  $K_S$  від одиниці не перевищує величини  $(d_m \Omega)^2 \gamma^{\rho-2} \ll 1$ .

Розглянемо спектральні характеристики рівня і фази в рамках моделі, розкритої у роботі [2,7]. Оскільки основний інтерес для поширення сигналів НВЧ і КВЧ діапазонів довжин хвиль представляє випадок

$$\gamma^2 \ll d_0 \ll 1; \\ 1 \ll d_m \ll \gamma^{-2}.$$

Розглянемо не дуже великі частотні рознесення, також при цьому, розміри зони Френеля на кожній із частот  $\omega_j$  потрапляють в інтервал між внутрішнім і зовнішнім масштабом турбулентності. При цьому для спектра неоднорідностей зручно прийняти наступну формулу

$$\Phi(\omega) \cong 0,033 C_\epsilon^2 \omega^{-p}. \quad (1)$$

Відмітимо, що приймаючи спектр неоднорідностей у виді (1), ми вже не зможемо рахувати флукутації фази стаціонарним процесом. Дійсно, заміна вихідного спектра в формулі (1) відповідає граничному переходу  $\alpha_0 \rightarrow 0, \alpha_m \rightarrow \infty$ . При цьому дисперсія флукутації бази  $\rightarrow \infty$  і введення функції кореляції стає неможливим. Однак, перші прирости фази і в цьому випадку є стаціонарними, так що спектральну щільність  $W_s$  можливо розглядати як перетворення Фур'є від структурної функції. Що стосується  $W_\chi$ , то вона залишається кінцевою при  $f \rightarrow 0$  і, відповідно, флукутації амплітуд сигналу як і раніше є стаціонарними.

При відсутності частотного рознесення ( $\Omega=0$ ) спектр флукутації амплітуди  $W_\chi^{(0)}$  і фази  $W_s^{(0)}$  на частоті  $f$  рівний

$$W_{\chi,s}^{(0)}(f) = C_\sigma < \chi^2 > v_0^{-1} f^{-8/3} [S_{(0)} \mp S(f^2)],$$

де  $C_\sigma = 0,68$  – для плоскої хвилі і  $C_\sigma = 0,17$  – для сферичної хвилі;  $v_0 = v\sqrt{K/L}$  – частота, обернена на часу прольоту неоднорідностей через зону Френеля.

Введемо функцію когерентності флукутації рівня і фази частотно-рознесених сигналів:

$$\Gamma_\chi^2(\Omega, f) = |W_\chi|^2 / (W_\chi^{(1)} W_\chi^{(2)}); \quad (2)$$

$$\Gamma_s^2(\Omega, f) = |W_s|^2 / (W_s^{(1)} W_s^{(2)}). \quad (3)$$

Тут через  $W_{\chi,s}^i$  позначаємо спектри флукутації  $\chi$  і  $s$  для сигналу частоти  $\omega_i$  ( $i = 1, 2$ ), яка визначається по формулам (2) і (3).

Скориставшись асиметричним розкладанням для функції когерентності в ідеальному випадку ( $f^2 \Omega \ll 1$ ) флукутації маємо

$$\Gamma_\chi \approx \frac{(1 - \Omega^{1/3})}{(1 - \Omega^2)^{2/3}}; \quad \Gamma_s = 1.$$

Відзначимо, що повільні флукутації фаз частково-рознесених сигналів виявляються повністю коге-

рентними, в той час як флукутації когерентності амплітудних флукутацій при  $f \rightarrow 0$  прагнуть до кінцевої величини, меншої одиниці. Пов'язано це з тою обставиною, що достатньо повільна флукутація фаз навіть при великих частотних рознесеннях є наслідком одних і тих же великомасштабних неоднорідностей з лінійним розміром  $l$ .

Флукутації ж амплітуди і раніше визначаються, в основному, неоднорідностями з характерним масштабом порядку зони Френеля, які вважаються різними для сигналів з рознесеними частотами. Мірою цієї відмінності і є часткова некогерентність амплітудних флукутацій на низьких частотах.

У зворотному граничному випадку високочастотних флукутацій ( $f^2 \Omega \gg 1$ ) функція когерентності швидко спадає до нуля  $\sim 1/f^3$ .

## Висновки

Аналіз показав, що флукутації параметрів каналу зв'язку в часі форми сигналу до тих пір, поки вони є повільними в порівнянні з тривалістю самих повідомлень. Ці флукутації призводять до енергетичних втрат на прийомі і описуються існуючими при оцінці точності вимірювання прийомами запізнення. У зазначеному каналі вони не обмежують можливості передачі широкосмугових повідомлень. У стаціонарній тропосфері флукутації фази НВЧ сигналів кореляції в широкому діапазоні частот. Коефіцієнт кореляції рівня в широкому діапазоні частот визначається емпіричною залежністю

Встановлені закономірності впливу, розглянуті у тропосферних ефектах, на якість функціонування РТС і К, дають можливість виявити найбільш істотні серед них. У зв'язку з цим слід зауважити, що зростання послаблених, рефракційних і дисперсійних властивостей тропосфери викликає збільшення спотворення і вплив на прийом радіосигналу.

Слід зазначити, що першочерговим облік впливу властивостей тропосфери на функціонування прийомних пристроїв РТС і К дозволить поліпшити прийом радіосигналу і виробити механізми боротьби з його флукутацією.

## Список літератури

1. Быстров Р.П. Миллиметровые волны в системах связи / Р.П. Быстров, А.В. Петров, А.В. Соколов // Радиоэлектроника. – 2000. – № 5. – С. 73–85.
2. Пашков Д.П. Анализ влияния атмосферы Земли на распространение радиосигналов сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн / Д.П. Пашков, В.В. Ляхов, А.Н. Ларионов // Моделирование та інформаційні технології: зб. наук. праць. – К.: ІПМЕ НАНУ, 2008. – Вып. 48. – С. 84–88.
3. Красюк Н.П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н.П. Красюк, В.Л. Коблов, В.Н. Красюк. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
4. Распространение радиоволн в тропосфере: Обзор / Г.В. Хитни, Ю.Х. Рихтер, Р.А. Папперт [и др.] // ТИИЭР. – 1985. – Т. 73, № 2. – С. 106–128.

5. Пашков Д.П. Особенности формирования сигналов для радиоканала с постоянными параметрами / Д.П. Пашков, А.Н. Ларионов // Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. праць. – К.: ЦНДІ НУ, 2009. – Вип. 1(9). – С. 200-203.

6. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1 / Исимару А. – М.: Мир, 1981. – 426 с.

7. Кравцов Ю.А. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли / Ю.А. Кравцов, З.И. Фейзулин, А.Г. Виноградов. – М.: Радио и связь, 1983. – 224 с.

Надійшла до редколегії 7.03.2014

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

### АНАЛИЗ ПОЛОСОВЫХ СВОЙСТВ ТУРБУЛЕНТНОГО ТРОПОСФЕРНОГО РАДИОКАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Д.П. Пашков

*В статье представлены результаты проведенного исследований полосовых свойств неоднородной среды тропосферного слоя для передачи информации в радиоканале. Это дало возможность выделить определенные турбулентные свойства и аналитическую модель компенсации неоднородностей для повышения качества приема радиосигналов.*

**Ключевые слова:** анализ, полосовые свойства, турбулентность, тропосфера, радиоканал.

### ANALYSIS BANDPASS PROPERTIES TURBULENT TROPOSPHERIC RADIO COMMUNICATION OF INFORMATION

D.P. Pashkov

*The article presents the results of studies of band properties of an inhomogeneous medium tropospheric layer for transmission of information in the channel. This made it possible to select certain turbulent properties of the analytical model and compensation irregularities to improve reception radio signals.*

**Keywords:** analysis, bandpass properties, turbulence, troposphere, radio.