

УДК 621.396

В.Д. Карлов¹, Є.О. Меленті¹, О.К. Шейгас¹, В.М. Петрушенко²¹ Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків² Військова частина А 3009, Севастополь

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ЛОКАЦІЇ МАЛОВИСОТНИХ ЦІЛЕЙ ЗА МЕЖАМИ ДАЛЬНОСТІ ПРЯМОЇ ВИДИМОСТІ НАД МОРЕМ

В роботі отримане співвідношення для дисперсії часового положення максимуму сигналу, відбитого від маловисотної цілі, лоцюємої в тропосферному хвилеводі за межами дальності прямої видимості над морем. Співвідношення враховує корельовані та некорельовані фазові флуктуації частотних складових прийнятих сигналів, викликані аномальними умовами поширення радіохвиль в нижніх шарах тропосфери. Проаналізований вплив відносного частотного інтервалу фазових флуктуацій і відносного параметру осциляцій кореляційної функції фазових флуктуацій на дисперсію часового положення відбитого сигналу.

Ключові слова: фазові флуктуації, кореляційна функція, дисперсія, частотні складові сигналу.

Вступ

Постановка проблеми та аналіз літератури. Однією зі складних задач, які виникають в радіолокації, є локація маловисотних цілей (МЦ). Складність вирішення такої задачі полягає в тому, що при польоті цілі на малих висотах особливо над рівнинною місцевістю, а також над морем час, який надається радіолокаційній станції для виявлення цілі, досить обмежений. Це обумовлено тим, що для реальних позицій дальність прямої видимості (ДПВ) МЦ невелика. Відомі методи збільшення ДПВ за рахунок збільшення висоти підйому антени не завжди можна реалізувати. Однак, в деяких випадках дальність виявлення МЦ може бути збільшена шляхом використання особливостей розповсюдження радіохвиль (РРХ) в нижніх шарах тропосфери.

Найчастіше аномальні умови РРХ виникають в приморських районах. Це обумовлено тим, що в нижніх шарах тропосфери при певних метеорологічних умовах над морем виникають області простору з аномально малим коефіцієнтом згасання радіохвиль – тропосферні радіохвилеводи (ТРХ) [1 – 3]. Як показано в [4], наприклад, для умов Азово-Чорноморського басейну, заживлення ТРХ можливо при дислокації радіолокаційної станції (РЛС) на відстані до межі суходіл-море, що не перевищує 2000 м. Розрахунки, результати яких представлені в [1 – 5], свідчить про те, що використання ТРХ РЛС

приморського базування може призвести до збільшення дальності виявлення маловисотних цілей (МЦ) в декілька разів. Проте, як показано [6 – 10], при локації МЦ за межами ДПВ відбувається зниження точності вимірювання просторових координат.

Зокрема, аналіз експериментальних даних, наведених в [7], показав, що при локації МЦ, яка знаходиться в межах ТРХ на віддалені від РЛС на 300 км, флуктуаційна помилка вимірювання дальності в порівнянні з локацією цілі в межах ДПВ збільшувалася від 2 до 3,7 разів [8, 9]. На думку авторів робіт [9, 10], причиною досить значного збільшення флуктуаційної помилки вимірювання дальності є флуктуації фази відбитого від цілі сигналу, обумовлені появою разом з некорельованими і корельованими фазовими флуктуаціями. Проте в відомій літературі вплив фазових флуктуацій на точність вимірювання дальності при локації маловисотних аеродинамічних цілей над морем висвітлений недостатньо. Для поповнення цієї прогалини і призначена дана стаття.

Метою статті є отримати співвідношення для дисперсії часового положення максимуму функції невизначеності за умов розповсюдження радіохвиль в тропосферних радіохвилеводах над морем.

Основна частина

Фазові спотворення сигналів, як відомо [11], призводять до спотворення форми сигналу і положення його максимуму (піку) в часі, що, у свою

чергу, призводить до появи флуктуаційних помилок вимірювання дальності. В процесі проведення експериментів [12] було встановлено, що флуктуації фаз частотних компонент сигналу змінюються по нормальному закону розподілу. У рамках виявлених в [12] закономірностей в даній роботі проаналізуємо вплив фазових спотворень сигналів на флуктуаційну помилку вимірювання дальності до цілі. Для простоти подальших розрахунків розгляд проведемо стосовно сигналу з прямокутним спектром.

Комплексну обвідну прийнятого сигналу представимо у вигляді інтеграла Фур'є:

$$\dot{U}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_o(\Omega) \cdot e^{a(\Omega) - j\varphi(\Omega)} \cdot e^{j\Omega t} d\Omega,$$

де $a(\Omega) = \ln \frac{|G(\Omega)|}{|G_o(\Omega)|}$ – рівень амплітуди спектральних компонент;

$G_o(\Omega)$ і $G(\Omega)$ – спектральна щільність комплексної обвідної зонduючого і відбитого сигналів від цілі, лоцуюемої в межах ТРХ над морем;

$\varphi(\Omega)$ – випадковий набіг фази у середовищі поширення.

У даному випадку спектральну щільність $G_o(\Omega)$ зонduючого сигналу визначимо співвідношенням:

$$G_o(\Omega) = \begin{cases} \frac{2\pi}{\Delta\Omega}, & \text{якщо } |\Omega| \leq \frac{\Delta\Omega}{2}, \\ 0, & \text{якщо } |\Omega| > \frac{\Delta\Omega}{2}, \end{cases}$$

де $\Delta\Omega$ – ширина спектра зонduючого сигналу.

Подальший розгляд проведено у припущенні, що середнє значення фази φ і її дисперсія σ_φ^2 не залежать від частоти в межах спектру зонduючого сигналу, а середнє значення випадкового набігу фази дорівнює $\varphi_0 = 0$. Для спрощення подальшого аналізу введемо узагальнений час $u = 0,5\Delta\Omega t$ і відносну частоту $x = 2\Omega\Delta\Omega^{-1}$. З урахуванням введених позначень інтеграл Фур'є перепишемо у вигляді:

$$\dot{U}(y) = 0,5 \int_{-1}^1 \exp\{a(x) - j[\varphi(x) - ux]\} dx. \quad (1)$$

Оскільки представляють інтерес лише фазові спотворення, то перепишемо співвідношення (1) у вигляді:

$$U(y) = 0,5 \int_{-1}^1 \exp\{j(ux - \varphi(x))\} dx. \quad (2)$$

Врахуємо, що при малих значеннях фазових флуктуацій при розкладанні функції $\exp\{-j\varphi(x)\}$ у ряд Тейлора можна обмежитися членами другого порядку малості. Тоді співвідношення (2) можна записати у вигляді:

$$\dot{U}(y) = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{c} \dot{U}_0(y) - \\ -j \int_{-1}^1 \varphi(x) \cdot e^{jyx} dx - \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \varphi^2(x) \cdot e^{jyx} dx \end{array} \right], \quad (3)$$

де $\dot{U}_0(y) = \int_{-1}^1 e^{jyx} dx$ – комплексна обвідна сигналу у відсутності фазових спотворень.

Зведемо співвідношення (3) в квадрат, враховуючи малість фазових помилок, і, вважаючи що $\sin(ux) = ux$, $\cos(ux) = 1 - 0,5u^2x^2$, знайдемо значення u_{\max} , для якого $|\dot{U}(y)|^2$ буде максимальним. Диференціюючи $|\dot{U}(y)|^2$ і прирівнюючи похідну до нуля, отримаємо:

$$u_{\max} = -\frac{3}{2} \int_{-1}^1 x\varphi(x) dx.$$

Тоді дисперсія положення піку сигналу в узагальненому часі буде:

$$\sigma_y^2 = \frac{9}{4} \iint_{-1 \dots 1} \overline{xx_1 \varphi(x)\varphi(x_1)} dx dx_1,$$

де $\overline{\varphi(x)\varphi(x_1)}$ – кореляційна функція фазових флуктуацій.

Візьмемо до уваги, що разом з корельованими фазовими флуктуаціями при локації цілі в межах ТХВ над морем обов'язково є присутніми і некорельовані шуми [9]. Тоді, підставивши співвідношення для узагальненого часу і відносної частоти, остаточно отримаємо вираз для дисперсії часового положення піку сигналу:

$$\sigma_t^2 = \frac{144}{\Delta\Omega^6} \times \int_{(-0,5 \dots 0,5) \cdot \Delta\Omega} \int_{(-0,5 \dots 0,5) \cdot \Delta\Omega} \Omega\Omega_1 \left[0,5N_0\delta(\Omega - \Omega_1) + \Phi(\Omega, \Omega_1) \right] d\Omega d\Omega_1, \quad (4)$$

де $0,5N_0\delta(\Omega - \Omega_1)$ – кореляційна функція білого шуму із спектральною щільністю N_0 ;

$\Phi(\Omega, \Omega_1)$ – частотна кореляційна функція, що описує корельовані складові фаз частотних компонент сигналу.

При аналізі експериментальних досліджень було встановлено, що корельовані складові частотних компонент сигналу, відбитого від маловисотної цілі, лоцуюемої в межах ТРХ над морем на відстанях більших ДПВ описуються кореляційною функцією, що має осцилюючий характер [9 – 12]. Осцилююча функція може бути апроксимована або експоненціальною, або осцилюючою функцією, а це і є фактично кореляційна функція $\Phi(\Omega, \Omega_1)$, але в частотній області. Для прикладу, візьмемо експоненціальну

кореляційну функцію $\Phi(\Omega, \Omega_1) = \sigma_\varphi^2 \exp\left\{\frac{|\Omega - \Omega_1|}{\rho}\right\}$ і

проаналізуємо випадок локації цілі за наявності корельованих і некорельованих фазових флуктуацій. У даному випадку співвідношення (4) перетвориться до вигляду:

$$\sigma_t^2 = \frac{144}{\Delta\Omega^6} \times \iint_{(-0,5 \dots 0,5) \cdot \Delta\Omega} \Omega \cdot \Omega_1 \left[0,5N_0\delta(\Omega - \Omega_1) + \sigma_\varphi^2 \exp((- \rho^{-1})|\Omega - \Omega_1|) \right] d\Omega d\Omega_1.$$

Формально завдання оцінки флуктуацій положення піку сигналу в часі аналогічне завданню оцінки флуктуацій напрямку головного максимуму діаграми спрямованості антени, розглянутої в [13].

Використовуючи ці результати, отримаємо:

$$\sigma_t^2 = \frac{12\sigma_\varphi^2}{\Delta\Omega^2} \times \left\{ \frac{c - 1,5c^2(1+c) \times \left[1 + \exp\left(-\frac{2}{c}\right) + c \exp\left(\left(-\frac{2}{c}\right) - 1\right) \right]}{+\alpha^{-1}} \right\}, (5)$$

де $c = 2\rho\Delta\Omega^{-1}$ – відносний частотний інтервал фазових флуктуацій;

$\alpha = 2\sigma_\varphi^2\Delta\Omega N_0^{-1}$ – параметр, що характеризує співвідношення інтенсивності корельованих і некорельованих флуктуацій.

Графіки функцій $\sigma_t^2 \Delta\Omega^2 \sigma_\varphi^{-2}$, побудовані на основі співвідношення (5) для різних α , приведені на рис. 1.

Моделювання проводилось для випадку $\alpha = 2; 5; \infty$. Розрахунки при $\alpha = \infty$ відповідають випадку відсутності некорельованих флуктуацій.

З графіків видно, що найбільший вплив на дисперсію положення піку сигналу, відбитого від мало-висотної цілі, лоцуючої над морем, здійснюють фазові флуктуації з інтервалом кореляції приблизно рівним $0,3\Delta\Omega$, а дисперсія положення піку сигналу може бути оцінена виразом:

$$\sigma_t^2 = \sigma_\varphi^2 \Delta\Omega^{-2} (2,5 + 12\alpha^{-1}).$$

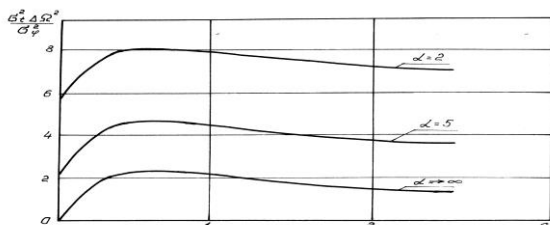


Рис. 1. Вигляд функції $\sigma_t^2 \Delta\Omega^2 \sigma_\varphi^{-2}$ для різних параметрів α

Розглянемо випадок, коли разом з некорельованими існують корельовані флуктуації частотних складових сигналу, відбитого від МЦ, лоцуючої над

морем в межах ТРХ а, корельовані флуктуації описуються експоненціальною кореляційною функцією $\Phi(\Omega, \Omega_1)$. Тоді вираз (4) матиме наступний вигляд:

$$\sigma_t^2 = \frac{144}{\Delta\Omega^6} \iint_{-1 \dots 1} \Omega \Omega_1 \left[\sigma_\varphi^2 \exp\left[-\frac{1}{\rho}|\Omega - \Omega_1|\right] \times \cos T(\Omega - \Omega_1) + \frac{N_0}{2} \delta(\Omega - \Omega_1) \right] d\Omega d\Omega_1. (6)$$

Використовуючи результати роботи [14], можна показати, що у випадку з $c \gg 1$ вираз (6) перетвориться до вигляду:

$$\sigma_t^2 = \frac{12\sigma_\varphi^2}{\Delta\Omega^2} \left(\frac{c}{1+c^2\gamma^2} + \frac{1}{\alpha} \right), (7)$$

де $\gamma = \frac{\Delta\Omega}{2} T$ – відносний параметр осциляції кореляційної функції фазових флуктуацій.

Із співвідношення (7) випливає, що при малих значеннях c ($c < 1$) і малих γ ($\gamma < 1$) дисперсія положення піку сигналу практично не залежить від γ . Після інтегрування в співвідношенні (6) отримаємо вираз для дисперсії положення піку сигналу σ_t^2 , використовуючи яке, були побудовані графіки залежності $\sigma_t^2 \Delta\Omega^2 \sigma_\varphi^{-2}$ від γ і c . Ці залежності (при умові $\alpha \rightarrow \infty$) приведені на рис. 2 а, б.

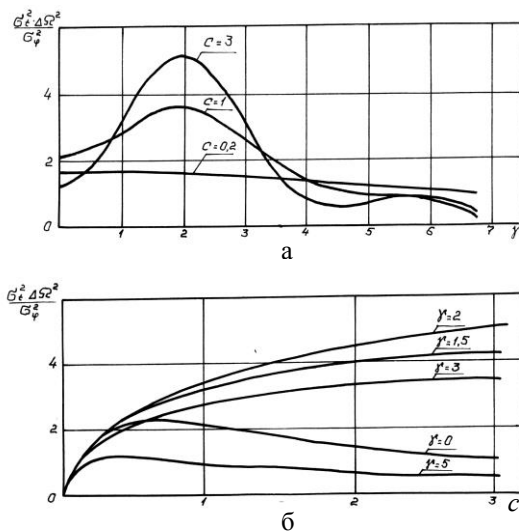


Рис. 2. Вигляд функції $\sigma_t^2 \Delta\Omega^2 \sigma_\varphi^{-2}$

для різних значень параметрів: а – для c ; б – для γ

Аналіз результатів розрахунків, представлених на рис. 2, а та 2, б показує, що при малих значеннях відносного частотного інтервалу фазових флуктуацій ($c < 1$) і малих значеннях відносного параметру осциляції кореляційної функції фазових флуктуацій ($\gamma < 1$) дисперсія положення піку сигналу, відбитого від МЦ, лоцуючої в межах ТРХ, практично не залежить від γ .

Висновок

Таким чином, встановлено, що найбільший вплив на дисперсію положення піку сигналу, відбитого від МЦ, лоцюємої над морем, здійснюють фазові флуктуації з інтервалом кореляції приблизно рівним $0,3$ ширини спектра зондуючого сигналу ($\Delta\Omega$).

Отримані співвідношення можуть бути використані для побудови оптимального алгоритму вимірювання дальності при умові існування на трасі поширення ТРХ.

Список літератури

1. Распространение ультракоротких радиоволн: Пер. с англ. [Текст] / Под ред. Б.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 564 с.
2. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн [Текст] / Ф.Б. Черный – М.: Сов. радио, 1972. – 463 с.
3. Красюк Н.П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС [Текст] / Н.П. Красюк, В.Л. Коблов, В.Н. Красюк – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
4. Петрушенко Н.Н. К вопросу о выборе позиции радиотехнической системы приморского базирования. / Н.Н. Петрушенко, В.Д. Карлов, Е.В. Лукашук, А.В. Челпанов // Системы управления, навигации та зв'язку. – К.: ДП «ЦНДІ НіУ», 2008. – Вип. 2(6). – С.10-14.
5. Лобкова Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью [Текст] / Л.М. Лобкова. – М.: Радио и связь, 1991. – 256 с.
6. Буров Н.И. Маловысотная радиолокация / Н.И. Буров. – М.: Воениздат, 1977. – 128 с.
7. Петрушенко М.М. Аналіз флуктуацій інформаційних параметрів радіолокаційних сигналів при їх розповсюдженні над морем / М.М. Петрушенко, А.В. Челпанов, В.Д. Карлов // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2008. – Вип. 4(16). – С. 122-126.
8. Петрушенко М.М. До питання про зменшення флуктуаційних помилок виміру дальності до цілі радіотехнічними засобами метрового діапазону хвиль / М.М. Петрушенко, В.Д. Карлов, Д.В. Карлов // Тези доповідей 10 науково-технічної конференції „Створення та

модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах”. – Феодосія, 2-3 вересня 2010. – С. 288.

9. Петрушенко М.М. Статистические характеристики сигналов, отраженных от объектов, лоцируемых за пределами радиогоризонта над морем / В.Д. Карлов, В.Л. Мисайлов, К.П. Квиткин // Съезда наукова конференція ХУПС ім. І. Кожедуба «Новітні технології-для захисту повітряного простору», 13-14 квітня 2011 року: тези доповідей. – Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2011. – С. 241.

10. Карлов В.Д. Результаты экспериментальных исследований статистических характеристик радиолокационных сигналов, отраженных от объектов в условиях аномальной рефракции / В.Д. Карлов, М.М. Петрушенко, Г.В. Певцов, В.Л. Мисайлов // Тези доповідей 11 науково-технічної конференції „Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах”. – Феодосія, 8-9 вересня 2011. – С. 143.

11. Петрушенко М.М. Результаты экспериментальных исследований параметров эхо-сигналов в радиотехнических системах приморского базирования / М.М. Петрушенко, В.Д. Карлов, Д.В. Карлов, В.Л. Мисайлов // Тези доповідей 10 науково-технічної конференції „Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах”. – Феодосія, 2-3 вересня 2010. – С. 288.

12. Петрушенко М.М. Оптимізація параметрів радіотехнічних систем приморського базирования / М.М. Петрушенко // Шоста наукова конференція ХУПС ім. І. Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору», 14-15 квітня 2010 року: тези доповідей. – Х.: ХУПС, 2010. – С. 211.

13. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин. – М.: Сов. радио, 1970. – 383 с.

14. Петрушенко Н.Н. Особенности измерения дальности целей, лоцируемых под малыми углами места над морем / Н.Н. Петрушенко, А.Б. Котов, В.Д. Карлов, Е.А. Меленти // Восьма наукова конференція ХУПС ім. І. Кожедуба «Новітні технології-для захисту повітряного простору»: тези доповідей, 18-19 квітня 2012 року. – Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2012. – С. 295.

Надійшла до редколегії 15.11.2012

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

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ЛОКАЦИИ МАЛОВЫСОТНЫХ ЦЕЛЕЙ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ДАЛЬНОСТИ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ НАД МОРЕМ

В.Д. Карлов, Е.А. Меленти, А.К. Шейгас, В.Н. Петрушенко

В работе получено соотношение для дисперсии временного положения максимума сигнала, отраженного от маловысотной цели, лоцируемой в тропосферном волноводе за пределами дальности прямой видимости над морем. Соотношение учитывает коррелированные и некоррелированные фазовые флуктуации частотных составляющих принятых сигналов, вызванные аномальными условиями распространения радиоволн в нижних слоях тропосферы. Проанализировано влияние относительного частотного интервала фазовых флуктуаций относительного параметра осцилляций корреляционной функции фазовых флуктуаций на дисперсию временного положения отраженного сигнала.

Ключевые слова: фазовые флуктуации, корреляционная функция, дисперсия, частотные составляющие сигнала.

SOME ASPECTS OF LOCATION OF LITTLEPITCH AIMS OUTSIDE DISTANCE TO LINE-OF-SIGHT ABOVE A SEA

V.D. Karlov, E.A. Melenty, A.K. Sheygas, V.M. Petrusenko

In the article correlation is got for dispersion of temporal position of a maximum of the signal, reflected from a littlepitch aim location outside distance of line-of-sight above a sea. Correlation takes into account the correlated and uncorrelated phase fluctuations, distributions of radio waves caused by anomalous terms in the understrata of troposphere. Influence of relative frequency interval of phase fluctuations is analyzed on dispersion of temporal position of the reflected signal.

Keywords: phase fluctuations, cross-correlation function, dispersion, frequency parts of the signal.