

УДК 621.396

В.Д. Карлов¹, Д.Б. Кучер², О.В. Струцинський³, О.В. Лукашук¹¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків² Національний університет «Одеська морська академія», Одеса³ Військова частина А0780

ДО ПИТАННЯ ПРО ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ МАЛОВИСОТНОЇ ЦІЛІ ПРИ ЇЇ РАДІОЛОКАЦІЇ В МЕЖАХ ТРОПОСФЕРНОГО ХВИЛЕВОДУ НАД МОРЕМ

В статті запропоновано алгоритм, який враховує наявність фазових флуктуацій відбитих від маловисотних цілей сигналів, які обумовлені середовищем поширення радіохвиль, а саме алгоритм оптимального оцінювання часу затримки сигналу при радіолокації маловисотних цілей в тропосферному хвилеводі за межами дальності прямої видимості. В роботі розглянута структурна схема пристрою, який реалізує запропонований алгоритм оцінювання часу затримки. Розрахунки, які наведені в статті, свідчать про те, що використання запропонованого вимірювача дальності дозволяє підвищити точність оцінювання дальності від 2 до 2,5 разів.

Ключові слова: вимірювач дальності, фазові флуктуації, кореляційна функція, дисперсія.

Постановка проблеми

Зазвичай, при роботі, розробці та проектуванні радіолокаційних станцій (РЛС) розвідки повітряного простору інженери намагаються зменшити вплив адитивних завад (шуми генераторів, активні завади і т.д.) на тактико-технічні характеристики РЛС. При цьому вплив мультиплікативних завад, обумовлених зміною рефракційних властивостей середовища поширення радіохвиль, на роботу РЛС не враховується. Цей факт не дозволяє в повній мірі реалізувати можливості РЛС по виявленню та супроводженню повітряних цілей з заданою точністю. Аналіз робіт [1; 2] показав, що для підвищення якості роботи РЛС приморського базування доцільно було б проводити оперативну діагностику умов поширення в зоні огляду РЛС. Відомо, що зміна виду рефракції може стати причиною як зменшення, так і збільшення дальності виявлення радіолокаційних засобів. За певних метеорологічних умов над поверхнею моря (великих водойм) виникають області простору з аномально малим коефіцієнтом згасання радіохвиль – тропосферні хвилеводи. Наявність на трасі поширення радіохвиль тропосферних хвилеводів (ТХВ) при певних умовах їх заживлення РЛС може значно збільшувати дальність дії радіотехнічних засобів, особливо приморського базування [3 – 5]. Однак, при локації цілей в ТХВ за межами дальності прямої видимості підвищуються помилки визначення просторових координат. Як свідчать експериментальні дані [6 – 11], при визначенні дальності цілі в межах ТХВ на кожний кілометр відстані до об'єкту

флуктуаційна помилка вимірювання дальності може сягати десятки метрів, що не дозволяє в повній мірі реалізувати можливості зенітних ракетних комплексів по знищенню маловисотних цілей.

Метою статті є побудова структурної схеми пристрою вимірювання дальності цілі при наявності на трасі розповсюдження радіохвиль ТХВ при умові, що флуктуації фази відбитих сигналів розподілені за нормальним законом, а кореляційна функція фазових флуктуацій описується експоненціальною функцією.

Основна частина

Як було встановлено в [7 – 11], флуктуації фази частотних компонент сигналу, відбитого від цілі, розподілені за нормальним законом. Це дозволило оптимізувати процес вимірювання дальності за критерієм максимуму логарифма відношення правдоподібності. За цим критерієм в роботах [12; 13] отримані співвідношення для вимірювання часу запізнення та дисперсії оцінки групового запізнення при використанні кореляційної функції фазових флуктуацій, яка задана у загальному вигляді.

Як показано в [12 – 14], оптимальна оцінка часу запізнення має наступний вигляд:

$$\hat{t}_3 = \int_{-\infty}^{\infty} y(\Omega) R(\Omega) d\Omega \cdot \left[\int_{-\infty}^{\infty} \Omega \operatorname{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right) R(\Omega) d\Omega \right]^{-1}, \quad (1)$$

де $y(\Omega) = x(\Omega) + n(\omega_0 + \Omega)$ – вхідний сигнал, що має вигляд суми сигналу, який очікується, $x(\Omega)$ та фазочастотного шуму $n(\omega_0 + \Omega)$;

$\Delta\Omega$ – ширина спектру зондуючого сигналу;
 ω_0 – несуча частота;
 $R(\Omega)$ – вагова функція.

Згідно з [12 – 14] співвідношення для дисперсії оцінки групового часу запізнення записується наступним чином:

$$\sigma_t^2 = \frac{144}{\Delta\Omega^6} \int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} \int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} \Omega\Omega_1\Phi(\Omega,\Omega_1)d\Omega d\Omega_1, \quad (2)$$

де $\Phi(\Omega,\Omega_1)$ – кореляційна функція фазових флуктуацій частотних компонент сигналу.

Оскільки при поширенні сигналу до цілі і назад дія середовища здійснюється на його частотні компоненти, обмежені шириною спектру $\Delta\Omega$, рівняння з ваговою функцією, в даному випадку, матиме вигляд:

$$\int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} \Phi(\Omega,\Omega_1)\text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right)R(\Omega_1,t_3) = x(\Omega). \quad (3)$$

У випадку, якщо фазові флуктуації частотних складових сигналу описуються експоненціальною кореляційною функцією:

$$\Phi(\Omega,\Omega_1) = \sigma_\phi^2 \exp\left\{-\frac{1}{\rho}|\Omega - \Omega_1|\right\}, \quad (4)$$

то інтегральне рівняння для знаходження вагової функції матиме вигляд:

$$\sigma_\phi^2 \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right) \int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} \exp\left\{-\frac{1}{\rho}|\Omega - \Omega_1|\right\} R(\Omega_1, t_3) = \Omega t_3 \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right). \quad (5)$$

Для його вирішення двічі продиференціюємо ліву і праву частині, приведемо подібні і, враховуючи, що $R(\Omega, t_3) = t_3 R(\Omega)$, отримаємо:

$$R(\Omega) = \frac{\rho}{2\sigma_\phi^2} \left\{ \frac{\Omega}{\rho^2} \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right) - \left(\frac{\Delta\Omega}{2\rho} + 1\right) \times \left[\delta\left(\Omega + \frac{\Delta\Omega}{2}\right) - \delta\left(\Omega - \frac{\Delta\Omega}{2}\right) \right] \right\}, \quad (6)$$

де $\delta\left(\Omega \pm \frac{\Delta\Omega}{2}\right)$ – дельта-функція.

Визначимо дисперсію оцінки оптимального вимірювання групового запізнення в даному випадку. Підставляючи (5) в (2), отримаємо:

$$\sigma_{t_{\text{опт}}}^2 = \frac{\sigma_\phi^2}{\Delta\Omega^2} \cdot \frac{12c}{1+3c+3c^2}. \quad (7)$$

Отримаємо вираз для алгоритму оптимального вимірювання групового запізнення (дальності до цілі). Скориставшись співвідношенням (5), відповідно отримаємо кінцеве співвідношення:

$$\hat{t}_3 = K_1 \int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} \Omega y(\Omega) d\Omega + K_2 \left[y\left(\frac{\Delta\Omega}{2}\right) - y\left(-\frac{\Delta\Omega}{2}\right) \right], \quad (8)$$

де K_1 та K_2 – вагові коефіцієнти.

Вагові коефіцієнти знаходяться за наступними виразами:

$$K_1 = 12 \left[\Delta\Omega^3 (1+3c+3c^2) \right]^{-1}; \quad (9)$$

$$K_2 = (3c+3c^2) \left[\Delta\Omega (1+3c+3c^2) \right]^{-1}. \quad (10)$$

Схема пристрою, що реалізує отриманий алгоритм (8), приведена на рис. 1.

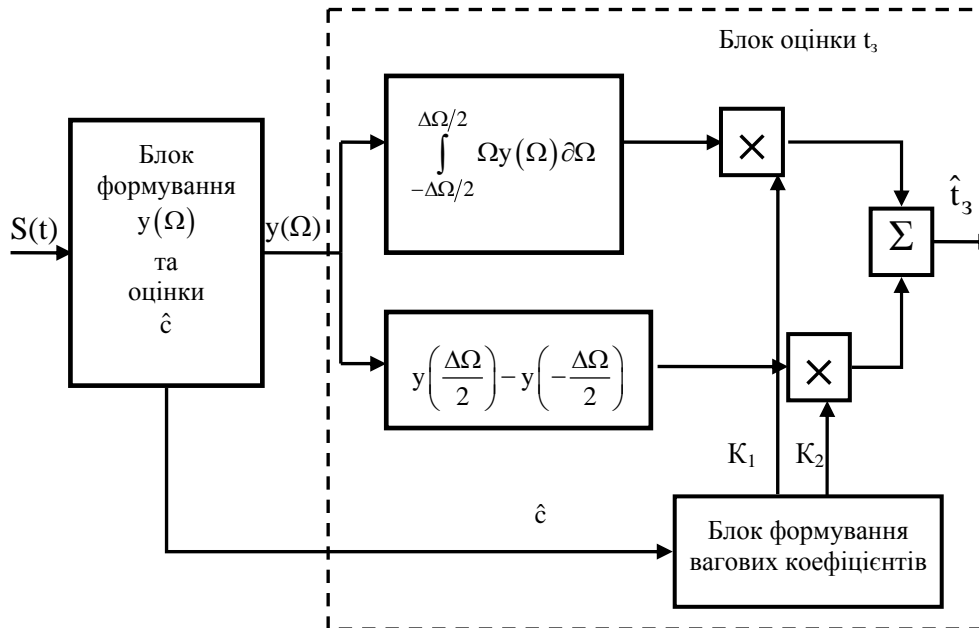


Рис. 1. Схема пристрою оцінювання t_3

Робота пристрою полягає в наступному. Прийнята реалізація радіолокаційного сигналу

$$S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\Omega) e^{j\left\{\Omega\left[t-\varphi'(\omega_0)\right]-n(\omega+\Omega)\right\}} d\Omega \cdot e^{j\omega_0\left[t-\frac{\varphi_0(\omega_0)}{\omega_0}\right]}$$

надходить на блок формування лінійного фазового набігу частотних складових сигналу (блок формування $y(\Omega)$). З виходу блоку реалізація фазового набігу $y(\Omega)$ поступає в блок оцінки групового запізнення. В цьому блоці, згідно алгоритму (8), формується оптимальна оцінка t_3 . Ваги κ_1 і κ_2 відповідають коефіцієнтам при доданках формули (8) і визначаються у блоці формування вагів, на який поступає оцінне значення відносного інтервалу кореляції фазових флуктуацій $\hat{c} = 2\hat{\rho}\Delta\Omega^{-1}$.

Порівняємо дисперсію помилки оптимального вимірювання групового запізнення алгоритму (8) з дисперсією помилки вимірювання t_3 по алгоритму, що не враховує кореляцію фазових флуктуацій.

Відповідно до (2), для дисперсії помилки вимірювання t_3 по алгоритму, оптимальному до некорельованих фазових флуктуацій, отримаємо співвідношення:

$$\sigma_t^2 = \frac{12\sigma_\varphi^2}{\Delta\Omega^2} \left\{ c - \frac{3}{2}c^2(1+c) \left[e^{-\frac{2}{c}} + 1 + c \left(e^{-\frac{2}{c}} - 1 \right) \right] \right\}. \quad (11)$$

Використовуючи співвідношення (11), оцінимо вираш (В) в точності вимірювання t_3 , який забезпечується використанням запропонованого оптимального алгоритму, за допомогою виразу:

$$B = \frac{\sigma_t^2}{\sigma_{t_{\text{опт}}}^2}. \quad (12)$$

Результати розрахунку В приведені на рис. 2.

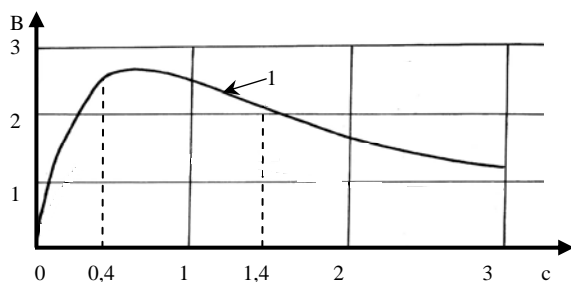


Рис. 2. Оцінка вирашу в точності вимірювання t_3

З даних, приведених на рис. 2, зрозуміло, що в інтервалі значень $c = 0,4 - 1,4$ вираш в точності складає від 2 до 2,5 разів.

Висновок

Отже особливістю вимірювання дальності до

цілі, лоцуюмої над морем в межах тропосферного хвилеводу на відстані, більшій дальності прямої видимості, є врахування разом з некорельованими і корельованих частотних складових фазових флуктуацій відбитого від цілі сигналу в частотній області. При цьому оцінка часу запізнення відбитого сигналу при припущенні про нормальний закон розподілу фазових флуктуацій в частотній області буде незміщеною.

Використовуючи отримані співвідношення для визначення часу запізнення та дисперсії оцінки групового запізнення, синтезовано вимірювач дальності цілі за умов радіолокації цілі в ТХВ за межами дальності прямої видимості для випадку, коли при кореляційна функція фазових флуктуацій описується експоненціальною функцією.

Запропонований алгоритм оптимальної оцінки та вимірювач дальності можуть бути використані при побудові перспективних РЛС приморського базування. Використання такого вимірювача може забезпечити підвищення точності вимірювання дальності цілі від 2 до 2,5 разів.

Список літератури

1. Хитни Г.В. Распространение радиоволн в тропосфере: Обзор / Г.В. Хитни, Ю.Х. Рихтер, Р.А. Панперт, К.Д. Андерсон, Дж.Б. Баумгартер // ТИИЭР. – 1985. – Т.73, №2. – С. 106-128.
2. Мыценко И.М. Использование отраженных от морской поверхности сигналов для диагностики условий распространения радиоволн сантиметрового диапазона / И.М. Мыценко, С.И. Хоменко // Радиофизика и электроника – Х.: ИРЭ НАН Украины, 2010. – Том 15, вып. 1. – С. 35-42.
3. Диагностика условий распространения УКВ в тропосфере / [Жуков Б.В, Кабанов В.А., Мыценко И.М. и др.]; под ред. Г.И. Хлопова. – К.: Наукова думка, 2010. – 264 с.
4. Мисайлов В.Л. Обнаружение маловысотных целей на загоризонтных дальностях над морским тропосферным волноводом / В.Л. Мисайлов, Н.Н. Петрушенко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2004. – Вып. 137. – С. 113-117.
5. Карлов В.Д. Особенности дислокации радиотехнических систем приморского базирования при локации маловысотных целей / В.Д. Карлов, Е.А. Меленти, Н.Н. Петрушенко, К.П. Квиткин // 11 науково-технічна конференції „Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах”, 8-9 вересня 2011 року: тези доповідей. – Феодосія: ДНВЦ МО України, 2011. – С. 140.
6. Карлов В.Д. Особенности измерения дальности целей, лоцируемых под малыми углами места над морем / В.Д. Карлов, О.Б. Котов, Н.Н. Петрушенко, Е.А. Меленти // Тези доповідей Восьмої наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил. – Харків: ХУ ПС. – 2012. – С. 293.
7. Степанов В.А. Статистические характеристики радиосигналов, распространяющихся в тропосферном волноводном канале над морской поверхностью [Текст] /

В.А. Степанов, С.И. Марухленко, М.Д. Бутаков // Тезиси докладов XVI Всеосоюз. конф. по распространению радиоволн. – Часть 2. – Харьков: ХПИ. – 1990. – С. 82.

8. Карлов В.Д. Аналіз флуктуації інформативних параметрів радіолокаційних сигналів при їх розповсюдженні над морем / В.Д. Карлов, М.М. Петрушенко, А.В. Челтанов // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2008. – № 4(16). – С. 122-126.

9. Карлов В.Д. Результати експериментальних досліджень параметрів ехо-сигналів в радіотехнічних системах приморського базування / В.Д. Карлов, Д.В. Карлов, М.М. Петрушенко, В.Л. Місайлов // Тези доповідей 10 науково-технічної конференції „Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах”. – Феодосія, 2-3 вересня 2010. – С. 288.

10. Карлов В.Д. Статистичні характеристики радіолокаційних сигналів, відбитих від місцевих предметів в умовах аномальної рефракції / В.Д. Карлов, Г.В. Певцов, Н.Н. Петрушенко, В.Л. Мисайлов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: науково-технічний журнал. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил. – 2011. – Вип. 1(5). – С. 69-72.

11. Карлов В.Д. До питання про зменшення флуктуаційних помилок виміру дальності до цілі радіотехнічними

засобами метрового діапазону хвиль / В.Д. Карлов, Д.В. Карлов, М.М. Петрушенко // Тези доповідей 10 науково-технічної конференції „Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах”. – Феодосія, 2-3 вересня 2010. – С. 288.

12. Карлов В.Д. Деякі аспекти локації маловисотних цілей за межами дальності прямої видимості над морем / В.Д. Карлов, С.О. Меленті, О.К. Шейгас, В.М. Петрушенко // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 1 (108). – С. 66-69.

13. Карлов В.Д. Особливості вимірювання дальності до цілі, яка здійснює політ в межах тропосферного хвилеводу над морем / В.Д. Карлов, С.О. Меленті, С.В. Кукобко, В.М. Петрушенко // Системи озброєння і військової техніки. – Х.: ХУПС, 2012. – № 3 (31). – С. 81-85.

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

Надійшла до редколегії 27.09.2016

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

К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ДАЛЬНОСТИ МАЛОВЫСОТНОЙ ЦЕЛИ ПРИ ЕЕ РАДИОЛОКАЦИИ В ПРЕДЕЛАХ ТРОПОСФЕРНОГО ВОЛНОВОДА НАД МОРЕМ

В.Д. Карлов, Д.Б. Кучер, О.В. Струцинський, Е.В. Лукашук

В статье предложен алгоритм, который учитывает наличие фазовых флуктуаций отраженных от маловысотных целей сигналов, которые обусловлены средой распространения радиоволн, а именно алгоритм оптимального оценивания времени запаздывания сигнала при радиолокации маловысотных целей в тропосферном волноводе за пределами дальности прямой видимости. В работе рассмотрена структурная схема устройства, реализующего предложенный алгоритм оценивания времени задержки. Расчеты, представленные в статье, свидетельствуют о том, что использование предложенного измерителя дальности позволяет повысить точность оценивания дальности от 2 до 2,5 раз.

Ключевые слова: измеритель дальности, фазовые флуктуации, корреляционная функция, дисперсия.

ON THE MEASUREMENT OF DISTANCE TO AIM, CARRYING OUT FLIGHT WITHIN THE LIMITS OF TROPOSPHERE WAVEGUIDE ABOVE SEA

V.D. Karlov, D.B. Kucher, O.V. Strusinskiy, E.V. Lukashuk

An algorithm that takes into account the fluctuations of the phase of the reflected signal from the low-altitude targets which are caused by radio wave propagation environment, namely the algorithm optimal estimation of the delay time of the signal at low-altitude radar targets in tropospheric waveguide beyond the range of direct visibility. The paper considers the structural diagram of the device that implements the proposed estimation algorithm delay. The calculations presented in the article suggest that the use of the proposed measuring range can improve the accuracy of estimating the range from 2 to 2.5 times.

Keywords: phase fluctuations, cross-correlation function, dispersion.