

УДК 621.396

М.М. Петрушенко

Головна інспекція Міністерства Збройних Сил України, Київ

ВИМІРЮВАЧ ДАЛЬНОСТІ МАЛОВИСОТНОЇ ЦІЛІ ПРИ ЇЇ РАДІОЛОКАЦІЇ В МЕЖАХ ТРОПОСФЕРНОГО ХВИЛЕВОДУ НАД МОРЕМ

В статті запропоновано алгоритм оптимального оцінювання часу затримки сигналу при радіолокації маловисотних цілей в тропосферному хвилеводі за межами дальності прямої видимості. Алгоритм враховує наявність фазових флуктуацій відбитих від маловисотних цілей сигналів, які обумовлені середовищем поширення радіохвиль. В роботі представлена структурна схема пристрою, який реалізує запропонований алгоритм оцінювання часу затримки. При цьому кореляційна функція фазових флуктуацій описується експоненціальною функцією. 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.

Вступ

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 ре-

фракційних 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 затухання 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 флюктуаційна помилка вимірювання дальності може сягати десяти метрів, що не дозволяє в повній мірі реалізувати можливості зенітних ракетних комплексів по знищенню маловисотних цілей.

Аналіз останніх публікацій показав, що при локації за межами дальності прямої видимості за наявності на трасі поширення ТХВ при використанні фазометричного методу вимірювання дальності збільшуються помилки вимірювання дальності такої цілі. Як показано в [8-11], це обумовлено появою разом з некорельованими і корельованих складових фазових флюктуацій сигналів, відбитих від маловисотних цілей, які знаходяться в тропосферному хвилеводі за межами дальності прямої видимості. Ряд робіт [8-13] стали теоретичним підґрунтям для оптимізації процесу вимірювання часу запізнення сигналу. В цих роботах процес оптимізації вимірювання дальності до цілі за умов надрелракції розглядається в припущенні, що флюктуації сигналів, відбитих від маловисотних цілей розподілені за нормальним законом, а кореляційна функція цих флюктуацій має довільний вигляд. В межах припущень отримані співвідношення для оптимальної оцінки часу запізнення відбитих сигналів.

Щоб реалізувати можливість підвищення точності визначення дальності повітряних об'єктів в межах ТХВ в конкретному зразку радіолокаційного озброєння, насамперед, необхідно мати адекватні структурні схеми вимірювачів дальності. В відомій літературі [] розглянуті схеми вимірювачів дальності для випадку, коли флюктуації фази сигналів, відбитих від цілей розподілені за нормальним законом, а кореляційна функція цих флюктуацій має довільний вигляд. В даній роботі запропоновано алгоритм оптимального оцінювання та пристрій, що реалізує даний алгоритм, для випадку, коли кореляційна функція фазових флюктуацій описується експоненціальною функцією.

Метою статті є побудова структурної схеми пристрою вимірювання дальності цілі при наявності на трасі розповсюдження радіохвиль ТХВ при умові,

що флюктуації фази відбитих сигналів розподілені за нормальним законом, а кореляційна функція фазових флюктуацій описується експоненціальною функцією.

Основна частина

Як було встановлено в [7 – 11], флюктуації 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 флюктуацій, яка задана у загальному вигляді.

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

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

де $y(\Omega) = x(\Omega) + n(\omega_0 + \Omega)$ – вхідний сигнал, що має вигляд суми сигналу, який очікується, $x(\Omega)$ та фазо-частотного шуму $n(\omega_0 + \Omega)$; $\Delta\Omega$ – ширина спектру зонduючого сигналу; ω_0 – несуча частота; $R(\Omega)$ – вагова функція.

Згідно з [12 – 14] співвідношення для дисперсії оцінки групового часу запізнення записується як

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

де $\Phi(\Omega, \Omega_1)$ – кореляційна функція фазових флюктуацій 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 флюктуації 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:

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

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

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

де $\delta(\Omega \pm \Delta\Omega/2)$ – дельта-функція.

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

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

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 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.

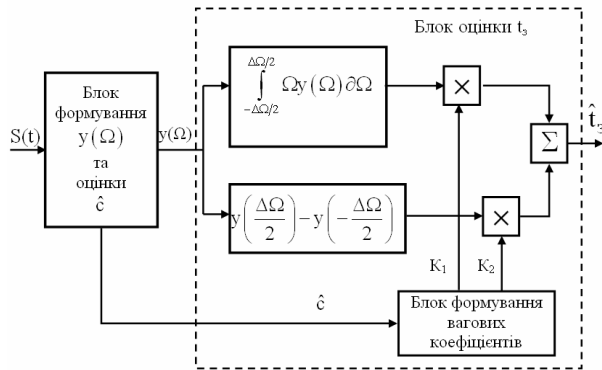


Рис. 1. Схема пристрою оцінювання t_3

Робота пристрою полягає в наступному. Прийнята реалізація радіолокаційного сигналу

$$S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\Omega) e^{j\Omega[t-\varphi(\omega_0)]-n(\omega+\Omega)} d\Omega \times \\ \times e^{j\omega_0[t-\varphi_0(\omega_0)/\omega_0]}$$

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 k_1 і k_2 відповідають коефіцієнтам при доданках формули (8) і ви-

значаються у блоці формування вагів, на який поступає оцінне значення відносного інтервалу кореляції фазових флуктуацій $\hat{c} = 2\hat{r}\Delta\Omega^{-1}$.

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 вигаш (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.

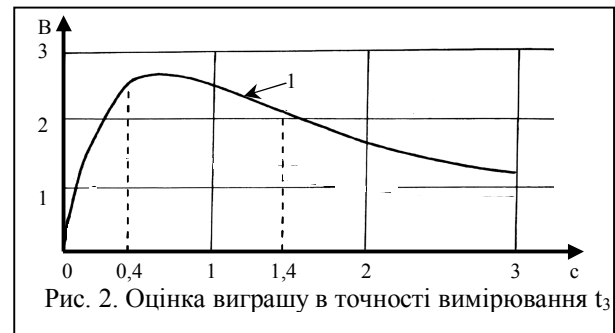


Рис. 2. Оцінка вигашу в точності вимірювання t_3

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

Висновок

Отже особливістю вимірювання дальності до цілі, лоцюємої над морем в межах тропосферного хвилеводу на відстані, більшій дальності прямої видимості, є врахування разом з некорельованих 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. Папперт, 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. Особенности дислокации радиотехнических систем приморского базирования при локации маловысотных целей / М.М. Петрушенко, В.Д. Карлов, С.О. Меленті, К.П. Квіткін // 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. Особенности измерения дальности целей, лоцируемых под малыми углами места над морем / Н.Н. Петрушенко, О.Б. Котов, В.Д. Карлов, Е.А. Меленті // Тези доповідей Восьмої наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: 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 // Тезисы докладов XVI Всесоюз. конф. по распространению радиоволн. – Часть 2. – Х.: ХПИ. – 1990. – С. 82.
8. Петрушенко М.М. Аналіз флуктуацій інформативних параметрів радіолокаційних сигналів при їх розповсюдженні над морем. / Петрушенко М.М., Челпанов А.В., Карлов В.Д. // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУ ПС, 2008. – Вып. 4(16). – С. 122-126.
9. Петрушенко М.М. Результати експериментальних досліджень параметрів ехо-сигналів в радіотехнічних системах приморського базування. / Петрушенко М.М., Карлов В.Д., Карлов Д.В., Мисайлов В.Л. //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 // Науково-технічний журнал. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х.: ХУ ПС, 2011. – Вып. 1(5). – С. 69-72.
11. Карлов В.Д. 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.
12. Карлов В.Д. Деякі аспекти локації маловисотних цілей за межами дальності прямої видимості над морем / В.Д. Карлов, Є.О. Меленті, О.К. Шейгас, В.М. Петрушенко // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2013. – Вып. 1 (108). – С. 66–69.
13. Особливості вимірювання дальності до цілі, яка здійснює політ в межах тропосферного хвильоводу над морем / В.Д. Карлов, Є.О. Меленті, С.В. Кукобко, В.М. Петрушенко // Системи озброєння і військової техніки. – Х.: ХУПС, 2012. – Вып. 3 (31) – С. 81–85.
14. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. – М.: Сов. радио, 1970. – 383 с.

Надійшла до редколегії 28.11.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ИЗМЕРИТЕЛЬ ДАЛЬНОСТИ МАЛОВЫСОТНОЙ ЦЕЛИ ПРИ ЕЕ РАДИОЛОКАЦИИ В ПРЕДЕЛАХ ТРОПОСФЕРНОГО ВОЛНОВОДА НАД МОРЕМ

Н.Н. Петрушенко

В статье предложен алгоритм оптимального оценивания времени запаздывания сигнала при радиолокации маловысотных целей в тропосферном волноводе за пределами дальности прямой видимости. Алгоритм учитывает наличие фазовых флуктуаций отраженных от маловысотных целей сигналов, которые обусловлены средой распространения радиоволн. В работе представлена структурная схема устройства, реализующего предложенный алгоритм оценивания времени задержки. При этом корреляционная функция фазовых флуктуаций описывается экспоненциальной функцией. 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.

MEASURING DEVICE OF DISTANCE OF LOW-LEVEL PURPOSE DURING ITS RADIO-LOCATION WITHIN THE LIMITS OF TROPOSPHERE WAVEGUIDE ABOVE SEA

M.M. Petruschenko

In the article the algorithm of optimum evaluation of time of delay of signal is offered during the radio-location of low-level targets in a troposphere waveguide outside distance of line-of-sight. An algorithm is taken into account by the presence of phase fluctuations of the signals which are conditioned the environment of distribution of radio waves reflected from low-level aims. The flow diagram of device, realizing the offered algorithm of evaluation of time of delay is in-process presented. Thus the cross-correlation function of phase fluctuations is described an exponential function. Calculations, presented in the article testify that the use of the offered measuring device of distance allows to promote exactness of evaluation of distance from 2 to 2,5 times.

Keywords: measuring device of distance, phase fluctuations, cross-correlation function, dispersion.