

УДК 621.396

В.Д. Карлов¹, А.М. Артеменко², О.В. Струцінський³, І.М. Пічугін¹¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків² Генеральний штаб Збройних Сил України, Київ³ Військова частина А0780

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ ДО 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 осцилюючою функцією. Розрахунки, які наведені в статті свідчать про те, що використання запропонованого вимірювача дальності дозволяє підвищити точність оцінювання дальності від 3 до 4 разів.

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

Вступ

Постановка проблеми. В нижніх шарах тропосфери при певних метеорологічних умовах над морем виникають області простору з аномально малим коефіцієнтом згасання радіохвиль – тропосферні радіохвилеводи (ТРХ) [1]. Для Азово-Чорноморського басейну заживлення ТРХ можливо при дислокації радіолокаційної станції (РЛС) на відстані до межі суходіл - море, що не перевищує 2000 м [2].

Використання ТРХ РЛС приморського базування може призвести до збільшення дальності виявлення маловисотних цілей (МЦ) в декілька разів [3, 4]. Проте при локації МЦ за межами дальності прямої видимості (ДПВ) відбувається зниження точності вимірювання просторових координат [2, 4, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз експериментальних даних [5, 6], показав, що при локації маловисотної цілі, 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 3 до 4 разів [7].

Причиною досить значного збільшення флуктуаційної помилки вимірювання дальності є флуктуації фази відбитого від цілі сигналу, обумовлені появою разом з некорельованими і корельованими фазових флуктуацій [7, 8]. В даній роботі запропоновано алгоритм оптимального оцінювання та пристрій, що реалізує даний алгоритм, для випадку, коли кореляційна функція фазових флуктуацій описується осцилюючою функцією.

Метою статті є побудова структурної схеми пристрою вимірювання дальності цілі при наявності на трасі розповсюдження радіохвиль ТХВ при умові, що флуктуації фази відбитих сигналів розподіле-

ні за нормальним законом, а кореляційна функція фазових флуктуацій описується осцилюючою функцією.

Основна частина

Як було встановлено в [6–8], флуктуації фази частотних компонент сигналу, відбитого від цілі, при її локації в межах тропосферного хвилеводу над морем, розподілені за нормальним законом. Це дозволило оптимізувати процес вимірювання дальності за критерієм максимуму логарифма відношення правдоподібності. За цим критерієм в роботах [9, 10] 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 [9–10], оптимальна оцінки часу запізнення має такий 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 [9–10] співвідношення для дисперсії оцінки групового часу запізнення записується таким чином:

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

де $\Phi(\Omega, \Omega_1)$ – кореляційна функція фазових 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 описується осцилюючою кореляційною функцією:

$$\Phi(\Omega, \Omega_1) = \exp\left\{-\frac{1}{\rho}|\Omega - \Omega_1|\right\} \times \left[\cos T(\Omega - \Omega_1) + \beta \cdot \sin T(\Omega - \Omega_1)\right], \quad (4)$$

то інтегральне рівняння для знаходження вагової функції матиме вигляд:

$$\sigma_{\Phi}^2 \int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} \exp\left\{-\frac{1}{\rho}|\Omega - \Omega_1|\right\} \times \left[\cos T(\Omega - \Omega_1) + \beta \sin T(\Omega - \Omega_1)\right] \times \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right) R(\Omega_1, t_3) d\Omega = \Omega t_3 \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right). \quad (5)$$

Для його вирішення двічі продиференціюємо ліву і праву частині, приведемо подібні і, враховуючи, що

$$R(\Omega, t_3) = t_3 R(\Omega),$$

отримаємо:

$$R(\Omega, t_3) = \frac{t_3}{2\sigma_{\Phi}^2(\rho^{-1} + \beta T)} \left\{ \left[\frac{(\rho^{-2} + T^2)^2}{k^2} \Omega - \frac{k\Delta\Omega\rho}{1 + \rho T\beta} + \frac{4}{k(1 - \rho T\beta)} \text{sh}k\Omega \right] \times \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right) - \left[T \cdot \frac{\left(\frac{T - \beta}{\rho}\right) \frac{\Delta\Omega}{2} \text{ch} \frac{k\Delta\Omega}{2}}{\left(\frac{1}{\rho} + T\beta\right) \text{ch} \frac{k\Delta\Omega}{2} + k \text{sh} \frac{k\Delta\Omega}{2}} - \frac{\left(\frac{T(1 + \beta^2)}{1 - \rho T\beta} + \beta k^2 \frac{\Delta\Omega}{4}\right) \frac{2}{k} \text{sh} \frac{k\Delta\Omega}{2}}{\left(\frac{1}{\rho} + T\beta\right) \text{ch} \frac{k\Delta\Omega}{2} + k \text{sh} \frac{k\Delta\Omega}{2}} \cdot T + \frac{\Delta\Omega}{2\rho} + 1 \right] \times \left[\delta\left(\Omega + \frac{\Delta\Omega}{2}\right) - \delta\left(\Omega - \frac{\Delta\Omega}{2}\right) \right], \quad (6)$$

де $k^2 = \frac{(\rho^{-2} + T^2)(\rho^{-1} + T\beta_1)}{\rho^{-1} - T\beta_1}$, $\beta_1 = \frac{n}{\rho T}$, T – період слідування радіоімпульсів.

Визначимо дисперсію оцінки оптимального вимірювання групового запізнення в даному випадку.

Підставляючи (5) в (2), отримаємо:

$$\sigma_{t_{\text{опт}}}^2 = \frac{2\sigma_{\Phi}^2(1-n)}{\Delta\Omega} \left\{ \frac{(1+c^2\gamma^2)^2}{6b^2c} - (n^2 + c^2\gamma^2) \frac{(1+n)^{-1} + 2c(1-n)^{-1}b^2}{(1+n)\text{ch}bc^{-1} + \text{bsh}bc^{-1}} \times \left[\text{ch}(bc^{-1}) - cb^{-1}\text{sh}(bc^{-1}) \right] + \frac{1}{2} \times [1+c + (c^2\gamma^2 - n)\text{ch} \frac{b}{c} - \frac{1c}{b} \left(\frac{n^2 + c^2\gamma^2}{1-n} + \frac{nb^2}{2c} \text{sh} \frac{b}{c} \right)] \right\}^{-1} + \frac{1}{(1+n)\text{ch} \frac{b}{c} + \text{bsh} \frac{b}{c}}, \quad (7)$$

де $b^2 = \frac{1+n}{1-n}(1+c^2\gamma^2)$,

$\gamma = 0,5\Delta\Omega T$ – відносний параметр осцилюючої кореляційної функції фазових флуктуацій.

Отримаємо вираз для алгоритму оптимального вимірювання групового запізнення (дальності до цілі).

Скориставшись співвідношенням (5), відповідно отримаємо кінцеве співвідношення:

$$\hat{t}_3 = k_1 \int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} y(\Omega) \cdot \Omega d\Omega - k_2 \int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} y(\Omega) \text{sh}k\Omega d\Omega + k_3 \left[y\left(\frac{\Delta\Omega}{2}\right) - y\left(-\frac{\Delta\Omega}{2}\right) \right], \quad (8)$$

де K_1, K_2, K_3 – вагові коефіцієнти.

Вагові коефіцієнти знаходяться за такими виразами:

$$k_1 = \frac{L}{\Delta\Omega^3} \frac{2(1+c^2\gamma^2)^2}{cb^2}; \quad (9)$$

$$k_2 = \frac{L}{\Delta\Omega^2} 2c\gamma^2 b \left(1 + \frac{n^2}{c^2\gamma^2} \right) \times \frac{(1+n)^{-1} + 2cb^{-2}(1-n)^{-1}}{(1+n)\text{ch}(bc^{-1}) + \text{bsh}(bc^{-1})}; \quad (10)$$

$$k_3 = \frac{L}{2\Delta\Omega} \times \left[1 + c + \frac{(c^2\gamma^2 - n)chbc^{-1} - 2cb^{-1}\left(\frac{c^2\gamma^2 + n^2}{1-n} + \frac{nb^2}{2c}\right)sh\frac{b}{c}}{(1+n)ch(bc^{-1}) + bsh(bc^{-1})} \right] \quad (11)$$

$$L^{-1} = \frac{(1+c^2\gamma^2)^2}{6b^2c} - (n^2 + c^2\gamma^2) \times \frac{(1+n)^{-1} + 2cb^{-2}(1-n)^{-1}}{(1+n)chbc^{-1} + shbc^{-1}} \times \left(chbc^{-1} + cb^{-1}shbc^{-1} \right) + \frac{1}{2} \left[1 + c + \frac{(c^2\gamma^2 - n^2)chbc^{-1}}{(1+n)chbc^{-1} + bshbc^{-1}} - \frac{2cb^{-1}\left(\frac{n^2 + c^2\gamma^2}{1-n} + \frac{nb^2}{2c}\right)sh\frac{b}{c}}{(1+n)chbc^{-1} + bshbc^{-1}} \right]$$

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

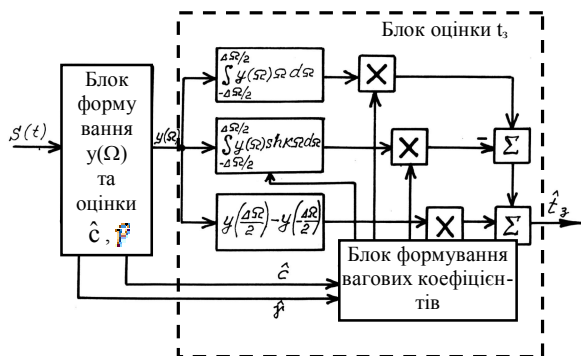


Рис. 1. Схема пристрою оцінювання t_3

Робота пристрою полягає в наступному. Прийнята реалізація радіолокаційного сигналу

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

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 $k_1 - k_3$ відповідають коефіцієнтам при доданках формули (8) і визначаються у блоці формування вагів, на який поступає оцінене значення відносного інтервалу кореляції фазових флуктуацій

$$\hat{c} = 2\hat{\rho}\Delta\Omega^{-1},$$

а також відносний параметр осцилюючої кореляційної функції фазових флуктуацій "γ".

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:

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

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

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

Результати розрахунку В приведені на рис. 2.

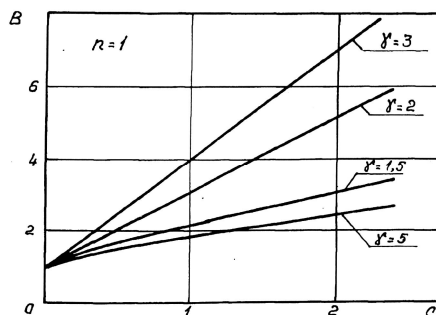


Рис. 2. Результати моделювання

З даних, приведених на рис. 2, зрозуміло, якщо $c = 1$, а "γ" змінюється у діапазоні від 2 до 3, виграш від застосування алгоритму забезпечить підвищення точності вимірювань від 3 до 4 разів.

Висновок

Отже особливістю вимірювання дальності до цілі, лоцуючої 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 3 до 4 разів.

Список літератури

1. Распространение ультракоротких радиоволн: Пер. с англ. [Текст] / Под ред. Б.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 564 с.
2. Петрушенко Н.Н. К вопросу о выборе позиции радиотехнической системы приморского базирования. / Петрушенко Н.Н., Карлов В.Д., Лукашук Е.В., Челпанов А.В. // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІНУ, 2008 – Вип. 2(6). – С. 10-14.
3. Лобкова Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью [Текст] / Л.М. Лобкова – М.: Радио и связь, 1991. – 256 с.
4. 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.: ХУПС, 2008. – Вип. 4(16). – С. 122-126.

5. Петрушенко Н.Н. Особенности измерения дальности целей, лоцируемых под малыми углами места над морем / Н.Н. Петрушенко, О.Б. Котов, В.Д. Карлов, Е.А. Меленти // Тези доповідей Восьмої наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил. – Харків: ХУПС. – 2012. – С. 293

6. 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.: ХУПС, 2008. – Вип. 4(16). – С. 122-126.

7. Петрушенко М.М. Результаты экспериментальных исследований параметров эхо-сигналов в радиотехнических системах приморского базирования. / 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.

8. 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.: Харківський університет Повітряних Сил – 2011. – Вип. 1(5). – С. 69-72.

9. 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. – Вип. 1 (108). – С. 66-69.

10. Карлов В.Д. Особливості вимірювання дальності до цілі, яка здійснює політ в межах тропосферного хвилеводу над морем / В.Д. Карлов, Є.О. Меленті, С.В. Кукобко, В.М. Петрушенко // Системи озброєння і військової техніки. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 3 (31) – С. 81-85.

Надійшла до редколегії 7.08.2017

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО ЦЕЛИ ПРИ ЕЕ РАДИОЛОКАЦИИ В ПРЕДЕЛАХ ТРОПОСФЕРНОГО ВОЛНОВОДА НАД МОРЕМ

В. Д. Карлов, А. Н. Артеменко, О.В. Струцинский, И.М. Пичугин

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 осциллирующей функцией. Расчеты, представленные в статье, свидетельствуют о том, что использование предложенного измерителя дальности позволяет повысить точность оценивания дальности от 3 до 4 раз.

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

OPTIMIZATION OF DIMENSIONAL MEASUREMENT TO THE PURPOSE AT ITS RADAR LOCATION UNDER THE TROPOSPHERIC WAVEGUIDE OVER THE SEA

V.D. Karlov, A.N. Artemenko, O.V. Strucinsky, I.M. Pichugin

The algorithm of optimal estimation of the signal delay time for the radar of low-altitude targets in the tropospheric waveguide beyond the range of line-of-sight is proposed. The algorithm takes into account the presence of phase fluctuations of signals reflected from low-altitude targets, which are caused by the propagation medium of radio waves. The paper presents a block diagram of a device that implements the proposed algorithm for estimating the delay time. In this case, the correlation function of phase fluctuations is described by an oscillating function. The calculations presented in the article indicate that the use of the proposed range meter makes it possible to increase the accuracy of the range estimation from 3 to 4 times.

Keywords: range meter, phase fluctuations, correlation function, variance.