

УДК 621.396

Д.В. Карлов

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ МАЛОВИСОТНОЇ ЦІЛІ ПРИ ЇЇ ЛОКАЦІЇ НАД МОРЕМ

В статті запропоновано алгоритм оптимального оцінювання часу затримки сигналу при локації маловисотних цілей за межами дальності прямої видимості. Алгоритм враховує наявність фазових флуктуацій відбитих від маловисотних цілей сигналів, які обумовлені середовищем поширення радіохвиль. При цьому кореляційна функція фазових флуктуацій описується експоненціальною функцією. Розрахунки, які наведені в статті свідчать про те, що використання запропонованого алгоритму вимірювання дальності дозволяє підвищити точність оцінювання дальності від 2 до 2,5 разів.

**Ключові слова:** фазові флуктуації, кореляційна функція, дисперсія.

### Вступ

**Постановка проблеми.** При вирішенні задачі автоматизації процесу наведення винищувальної авіації на ціль, особливо в приморських районах, виникає ряд проблемних питань у вирішенні яких у ряді випадків не вдається здійснити традиційними методами.

До таких питань відноситься випадок, коли наведення винищувальної авіації необхідно здійснювати на маловисотну ціль. В умовах рівнинного узбережжя проблемним є забезпечення необхідною для прийняття рішення дальності. Однак, як показано в [1], у випадку коли якщо визначеним чином забезпечити дислокацію радіотехнічних систем на узбережжі, то за рахунок використання умов розповсюдження радіохвиль над морською поверхнею, що забезпечують виникнення областей простору з аномально малим коефіцієнтом затухання радіохвиль, можливо значно збільшити дальність дії радіотехнічних систем.

Однак, як свідчать результати експериментальних досліджень [2], в цьому випадку при використанні традиційних алгоритмів вимірювання дальності до цілі істотно зростають помилки вимірювання координат цілі, що не дозволяє вирішити задачу наведення винищувача на ціль.

**Аналіз останніх публікацій** показав, що при локації за межами дальності прямої видимості при використанні фазометричного методу вимірювання дальності збільшуються помилки вимірювання дальності такої цілі.

Як показано в [2], це обумовлено появою разом з некорельованими і корельованими складовими фазових флуктуацій сигналів, відбитих від маловисотних цілей, які лоцюються за межами дальності прямої видимості.

Ряд робіт [2, 3] стали теоретичним підґрунтям для оптимізації процесу вимірювання часу запіз-

нення сигналу. В цих роботах процес оптимізації вимірювання дальності до цілі, яка лицюється над морем, розглядається в припущенні, що флуктуації сигналів відбитих від маловисотних цілей розподілені за нормальним законом, а кореляційна функція цих флуктуацій має довільний вигляд.

В даній статті запропоновано алгоритм оптимального оцінювання для випадку, коли кореляційна функція фазових флуктуацій описується експоненціальною функцією.

**Метою статті** є синтез оптимального алгоритму вимірювання дальності цілі, яка лицюється над морем, при умові, що флуктуації фази відбитих сигналів розподілені за нормальним законом, а кореляційна функція фазових флуктуацій описується експоненціальною функцією.

### Основна частина

Оскільки, як показано в [2, 3], флуктуації фази частотних компонент сигналу, відбитого від цілі, яка лицюється над морем, розподілені за нормальним законом, то це дозволяє оптимізувати процес вимірювання дальності за критерієм максимуму логарифма відношення правдоподібності.

За цим критерієм в роботі [4] 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 [4], оптимальна оцінки часу запізнення має наступний вигляд:

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

де  $y(\Omega) = x(\Omega) + n(\omega_0 + \Omega)$  – вхідний сигнал, що

має вигляд суми сигналу, який очікується,  $x(\Omega)$  та фазочастотного шуму  $n(\omega_0 + \Omega)$ ;

$\Delta\Omega$  – ширина спектру зондуючого сигналу;

$\omega_0$  – несуча частота;

$R(\Omega)$  – вагова функція.

Згідно з [4] співвідношення для дисперсії оцінки групового часу запізнення записується наступним чином:

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

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:

$$\int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} \Phi(\Omega, \Omega_1) \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right) R(\Omega_1, t_3) dt_3 = x(\Omega). \quad (3)$$

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:

$$\sigma_\phi^2 \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right) \times \int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} \exp\left\{-\frac{1}{\rho}|\Omega - \Omega_1|\right\} R(\Omega_1, t_3) dt_3 = \Omega t_3 \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right). \quad (5)$$

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

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

отримаємо:

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

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:

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

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

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:

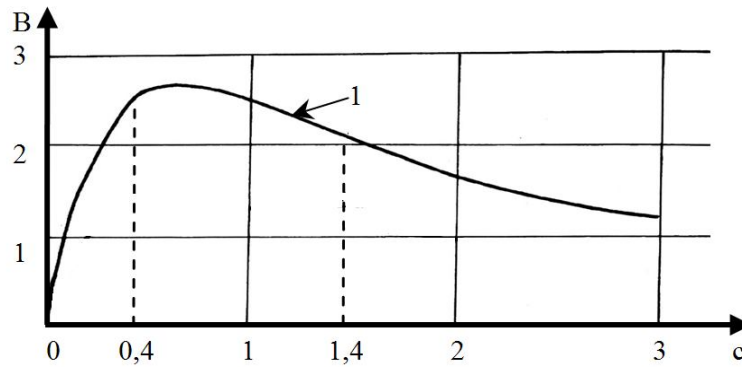
$$\sigma_t^2 = \frac{12\sigma_\phi^2}{\Delta\Omega^2} \times \left\{ c - \frac{3}{2}c^2(1+c) \left[ e^{-\frac{2}{c}} + 1 + c \left( e^{-\frac{2}{c}} - 1 \right) \right] \right\}. \quad (11)$$

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

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

Результати розрахунку значення В приведені на рис. 1.

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

Рис. 1. Оцінка виграшу в точності вимірювання  $t_3$ 

## Висновок

Отже особливістю вимірювання дальності до цілі, лоцуюмої 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.

Запропонований алгоритм оптимальної оцінки дальності може бути використаний при побудові перспективних РЛС приморського базування. Використання синтезованого алгоритму може забезпечити підвищення точності вимірювання дальності цілі від 2 до 2,5 разів.

## Список літератури

1. Особенности дислокации радиотехнических систем приморского базирования при локации маловысотных целей / Н.Н. Петрушенко, В.Д. Карлов, Е.О. Меленті, 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

Надійшла до редколегії 21.09.2015

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

## АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ МАЛОВЫСОТНОЙ ЦЕЛИ ПРИ ЕЕ ЛОКАЦИИ НАД МОРЕМ

Д.В. Карлов

В статье предложен алгоритм оптимального оценивания времени запаздывания сигнала при радиолокации маловысотных целей за пределами дальности прямой видимости. Алгоритм учитывает наличие фазовых флуктуаций отраженных от маловысотных целей сигналов, которые обусловлены средой распространения радиоволн. При этом корреляционная функция фазовых флуктуаций описывается экспоненциальной функцией. Расчеты, представленные в статье свидетельствуют о том, что использование предложенного алгоритма измерения дальности позволяет повысить точность оценивания дальности от 2 до 2,5 раз.

**Ключевые слова:** фазовые флуктуации, корреляционная функция, дисперсия.

## ALGORITHM OF OPTIMAL MEASURING OF DISTANCE OF IS AT LOCATION OF LOW-ALTITUDE TARGET ABOVE SEA

D.V. Karlov

In the article the algorithm of optimal evaluation of time of delay of signal is offered at location of low-altitude target outside distance of line-of-sight. An algorithm takes into account the presence of phase fluctuations of the signals removed from of low-altitude target, what distributions of radio waves conditioned by an environment. Thus the cross-correlation function of phase fluctuations is described by an exponential function. Calculations which over are brought in the article testify that the use of the offered algorithm of measuring of distance allows to promote exactness of evaluation of distance from 2 to 2,5 times.

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