

УДК 621.396

В.Д. Карлов¹, Є.О. Меленті¹, С.В. Кукобко¹, В.М. Петрушенко²

¹Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

²Військова частина А 3009, Севастополь

ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ ДО ЦІЛІ, ЯКА ЗДІЙСНЮЄ ПОЛІТ В МЕЖАХ ТРОПОСФЕРНОГО ХВИЛЕВОДУ НАД МОРЕМ

В статті розглядається можливість врахування фазових флуктуацій сигналів відбитих від маловисотних цілей, лоцюємих в тропосферному хвилеводі за межами дальності прямої видимості, при оптимізації процесу вимірювання часу запізнення сигналу. Процес оптимізації вимірювання дальності до цілі за умов надрелракції розглядається в припущенні, що флуктуації сигналів, відбитих від лоцюємих цілей розподілені за нормальним законом, а кореляційна функція цих флуктуацій має довільний вигляд. В межах припущень отримані співвідношення для оптимальної оцінки часу запізнення відбитих сигналів.

Ключові слова: фазові флуктуації, кореляційна функція, дисперсія.

Вступ

Постановка проблеми. Аналіз останніх військових конфліктів [1 – 3] показав, що основним засобом боротьби з зенітними ракетними комплексами (ЗРК) є протирадіолокаційні ракети (ПРР). Для ефективної

протидії ПРР необхідно мінімізувати робітний час радіолокаційної станції (РЛС) наведення ракет [4]. Це досягається збільшенням дальності виявлення РЛС розвідки повітряного простору та високою точністю видачі координат цілі при цілевказівки. В випадку дислокації РЛС розвідки повітряного простору на

узбережжі великих водойм (морів, океанів) для збільшення дальності виявлення маловисотних цілей (МЦ) можливо використовувати явище надрелракції, яке виникає в нижніх шарах тропосфери при певних метеорологічних умовах та призводить до виникнення тропосферних хвилеводів (ТХВ) [5 – 7]. Проте при локації МЦ в межах ТХВ за межами дальності прямої видимості значно зростають помилки визначення просторових координат [8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій [9, 10] свідчить, що при локації цілі в межах ТХВ для підвищення точності вимірювання дальності до цілі необхідно враховувати фазові флуктуації прийнятого сигналу, обумовлені впливом умов розповсюдження радіохвиль (РРХ). Проте в цих роботах не враховувався вид розподілу фазових флуктуацій прийнятого сигналу. В роботах [11, 12] встановлено, що фазові флуктуації сигналу з урахуванням умов поширення радіохвиль в ТХВ розподілені за нормальним законом.

Пропонується враховувати цей факт при оптимізації процесу вимірювання дальності до маловисотної цілі, яка здійснює політ в межах ТХВ. При цьому з'являються певні особливості вимірювання дальності до цілі, лоцуюмої в межах дальності прямої (ДПВ) видимості над морем.

Такі особливості при врахуванні того, що кореляційна функція фазових флуктуацій частотних складових відбитих від цілі сигналів має довільний вигляд, в відомій літературі розглянуті не досить повно. Даному питанню і присвячена ця стаття.

Метою статті є розгляд особливостей процесу вимірювання дальності до маловисотної цілі при наявності на трасі розповсюдження радіохвиль ТХВ при умові, що флуктуації фази відбитих сигналів розподілені за нормальним законом, а кореляційна функція фазових флуктуацій має довільний вигляд.

Основна частина

Розглянемо основні особливості вимірювання дальності до маловисотної цілі над морем з урахуванням флуктуацій фази частотних складових сигналу, обумовлених впливом середовища розповсюдження при локації цілі в межах ТХВ над морем [8, 13].

Нехай початковий зондуєчий сигнал має вигляд:

$$u(t) = \dot{U}(t) \cdot e^{j\omega_0 t},$$

де ω_0 – несуча частота.

При проходженні сигналу $u(t)$ до цілі і назад кожна його спектральна складова частоти ω отримує фазовий зсув $\varphi(\omega)$. Враховуючи те, що фазовий зсув $\varphi(\omega)$, у загальному випадку, є випадковою величиною, запишемо його у вигляді:

$$\varphi(\omega) = \varphi_0(\omega) + n(\omega),$$

де $\varphi_0(\omega)$ і $n(\omega)$ – регулярна і флуктуаційна складові фазового набігу.

Оскільки, ми розглядаємо поширення радіосигналів в тропосфері [14, 15], в якій дисперсійні спотворення відсутні, ми можемо обмежитися наближеним представленням $\varphi_0(\omega)$ в межах смуги частот у вигляді суми двох членів ряду по ступенях $\Omega = \omega - \omega_0$.

В цьому випадку:

$$\varphi_0(\omega) = \varphi_0(\omega_0) + \Omega \varphi_0'(\omega_0),$$

де $\varphi_0'(\omega_0)$ – перша похідна по частоті від $\varphi_0(\omega)$ для частоти, що дорівнює несучій.

Як відомо [16], при прийнятих допущеннях $\varphi_0'(\omega_0) = t_3$ – групове запізнення радіолокаційного сигналу.

З урахуванням зроблених допущень, сигнал на вході вимірювача дальності (групового запізнення) до цілі можна записати у вигляді:

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

З виразу (1) видно, що у фазовому набігу спектральних складових комплексної обвідної сигналу $S(t)$ є інформація про групове запізнення. Завдання, яке стоїть перед нами, полягає в оптимальному вимірюванні t_3 з урахуванням фазових флуктуацій $n(\omega)$, обумовлених впливом умовами РРХ в ТРХ над морем.

При рішенні задачі оптимального вимірювання t_3 будемо вважати, що вхідним сигналом $y(\Omega)$ вимірювача t_3 є реалізація набігу фази частотних складових радіолокаційного сигналу $S(t)$, яку можна представити в вигляді суми сигналу, який очікується $x(\Omega)$ і фазочастотного шуму $n(\omega_0 + \Omega)$:

$$y(\Omega) = x(\Omega) + n(\omega_0 + \Omega), \quad (2)$$

де $x(\Omega) = \Omega t_3 \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right)$;

а функція $\text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right)$ має вигляд прямокутної функції:

$$\text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right) = \begin{cases} 1, & \text{при } |\Omega| \leq \frac{\Delta\Omega}{2}, \\ 0, & \text{при } |\Omega| > \frac{\Delta\Omega}{2}. \end{cases}$$

Із співвідношення (2) виходить, що незалежно від природи флуктуацій вони, по відношенню до очікуваного сигналу $x(\Omega)$, є адитивною завадою, а, отже, відповідно до [17], байєсівська оцінка параме-

трів сигналу зводиться до оцінок по максимуму логарифма відношення правдоподібності.

Враховуючи, що, як показано в [18 – 20], розподіл фазових флуктуацій частотних складових сигналу, відбитого від цілі, лоцюємої в ТХВ за межами ДПВ близький до нормального закону, вираз для логарифма відношення правдоподібності можна представити у вигляді [17]:

$$\ln l[y(\Omega)] = \xi(\Omega, t_3) - \frac{1}{2} q^2(\Omega, t_3),$$

де ваговий інтеграл $\xi(\Omega, t_3)$ і параметр виявлення $q(\Omega, t_3)$ визначаються виразами:

$$\xi(\Omega, t_3) = \int_{-\infty}^{\infty} y(\Omega) R(\Omega, t_3) d\Omega;$$

$$q^2(\Omega, t_3) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\Omega) R(\Omega, t_3) d\Omega,$$

а вагова функція $R(\Omega, t_3)$ визначається співвідношенням:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega_0 + \Omega, \omega_0 + \Omega_1) R(\Omega_1, t_3) d\Omega_1 = x(\Omega), \quad (3)$$

де $\Phi(\omega_0 + \Omega, \omega_0 + \Omega_1)$ – частотна кореляційна функція фазових флуктуацій.

Таким чином, максимально правдоподібну оцінку \hat{t}_3 отримаємо шляхом рішення наступного рівняння:

$$\frac{\partial}{\partial t_3} \ln l[y(\Omega)] = 0, \quad \text{при } t_3 = \hat{t}_3. \quad (4)$$

Приймаючи до уваги, що згідно [17], вагова функція $R(\Omega, t_3) = t_3 R(\Omega)$, отримуємо, що умові (4) задовольняє оптимальна оцінка:

$$\hat{t}_3 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y(\Omega) R(\Omega) d\Omega}{\int_{-\infty}^{\infty} \Omega \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right) R(\Omega) d\Omega}, \quad (5)$$

де вагова функція $R(\Omega)$ знаходиться з рівняння:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\Omega, \Omega_1) R(\Omega_1) d\Omega_1 = \Omega \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right). \quad (6)$$

Знайдемо дисперсію оцінки групового запізнення. Підставляючи (2) в (5), отримаємо:

$$\hat{t}_3 = t_3 + \int_{-\infty}^{\infty} n(\omega_0 + \Omega) R(\Omega) d\Omega \times \left[\int_{-\infty}^{\infty} \Omega \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right) R(\Omega) d\Omega \right]^{-1}. \quad (7)$$

Оскільки дисперсія оцінки $\sigma_{\hat{t}_3}^2 = \left\langle (\hat{t}_3 - t_3)^2 \right\rangle$, а оцінка \hat{t}_3 є незміщеною, $\left\langle \hat{t}_3 \right\rangle = t_3$, то з врахуванням (7) отримаємо:

$$\sigma_{\hat{t}_3}^2 = \int \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\Omega, \Omega_1) R(\Omega_1) R(\Omega) d\Omega_1 d\Omega \times \left[\int_{-\infty}^{\infty} \Omega \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right) R(\Omega) d\Omega \right]^{-2}. \quad (8)$$

Причому якщо вимірювання дальності проводиться у присутності корельованих фазових флуктуацій, обумовлених впливом умов РРХ в ТРХ при локації цілі над морем, кореляційна функція яких $\Phi(\Omega, \Omega_1)$, по алгоритму, оптимальному по відношенню до некорельованих флуктуацій з частотною кореляційною функцією

$$\Phi(\Omega, \Omega_1) = 0,5 N_0 \delta(\Omega - \Omega_1),$$

то відповідно до (6) вираз для вагової функції буде мати вигляд:

$$R(\Omega) = \frac{2\Omega}{N_0} \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right). \quad (9)$$

Після підстановки (9) в (8) отримаємо в цьому випадку вираз для дисперсії оцінки часу запізнення у вигляді:

$$\sigma_{\hat{t}_3}^2 = \frac{144}{\Delta\Omega^6} \int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} \int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} \Omega \Omega_1 \Phi(\Omega, \Omega_1) d\Omega d\Omega_1. \quad (10)$$

Висновок

Таким чином 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.

Отримані співвідношення можуть бути використані при синтезі оптимальних вимірювачів дальності маловисотних цілей в тропосферних хвилеводах за межами дальності прямої видимості.

Список літератури

1. Слипченко В.Н. *Война будущего (прогностический анализ)* / В.Н. Слипченко // Академия военных наук РФ. – 2000. – С. 1-28.
2. Єрмошин М.О. *Борьба в повітрі: навч. посіб.* / М.О. Єрмошин, В.М. Федаї. – Х.: ХУПС, 2004. – 222 с.
3. Шутенко М. *В войнах шестого поколения приоритет будет отдан воздушно-космическим силам, а не*

танкам / М. Шутенко // Независимое военное обозрение. – 2004. – № 8. – С. 2-3.

4. Неупокоев Ф.К. Противовоздушный бой / Ф.К. Неупокоев. – М.: Воениздат, 1989. – 262 с.: ил.

5. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн [Текст] / Ф.Б. Черный. – М.: Сов. радио, 1972. – 463 с.

6. Буров Н.И. Маловысотная радиолокация / Н.И. Буров. – М.: Воениздат, 1977. – 128 с.

7. Распространение ультракоротких радиоволн: пер. с англ. / под ред. Б.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 564 с.

8. 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 наук. конф. Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – Х.: ХУ ПС, 2012. – С. 293.

9. 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. – Ч. 2. – Х.: ХПИ, 1990. – С. 82.

10. 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.: ХУ ПС, 2008. – Вип. 4(16). – С. 122-126.

11. Результаты экспериментальных исследований параметров эхо-сигналов в радиотехнических системах при морского 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. 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: наук.-техн. ж. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил. – 2011. – Вип. 1(5). – С. 69-72.

13. 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 допов. 10 наук.-техн. конф. „Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах”. – Феодосія, 2 – 3 вересня 2010. – С. 288.

14. Системи радіозв'язку: навч. посіб. / М.М. Петрушенко, О.О. Зеленський, В.Ф. Солодовник, В.Д. Карлов, Є.О. Мількевич. – Х.: ХУПС, 2007. – 250 с.: іл.

15. Петрушенко М.М. Завадостійкість радіоелектронних засобів: навч. посіб. / М.М. Петрушенко, В.І. Поляков, О.В. Єфімова. – Х.: ХУПС, 2009. – 148с.: іл.

16. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В.Л. Гинзбург. – М.: Наука, 1967. – 683 с.

17. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочн. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Я.Д. Ширман. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

18. Петрушенко М.М. Оптимізація параметрів радіотехнічних систем приморського базування. Шоста наук. конф. Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору», 14 – 15 квітня 2010 року: тези допов. – Х.: ХУПС, 2010. – С. 211.

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

20. Петрушенко М.М. Аналіз можливих шляхів збільшення дальності дії радіотехнічних систем приморського базування. / М.М. Петрушенко, В.Д. Карлов, В.Л. Мисайлов // Тези допов. 11 наук.-техн. конф. „Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах”. – Феодосія, 8 – 9 вересня 2011. – С. 141.

Надійшла до редколегії 31.08.2012

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

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО ЦЕЛИ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩЕЙ ПОЛЕТ В ПРЕДЕЛАХ ТРОПОСФЕРНОГО ВОЛНОВОДА НАД МОРЕМ

В.Д. Карлов, Е.А. Меленти, С.В. Кукобко, В.Н. Петрушенко

В статье рассматривается возможность учета фазовых флуктуаций сигналов отраженных от маловысотных целей, лоцируемых в тропосферном волноводе за пределами дальности прямой видимости, при оптимизации процесса измерения времени запаздывания сигнала. Процесс оптимизации измерения дальности до цели при условиях сверхрефракции рассматривается в предположении, что флуктуации сигналов, отраженных от лоцируемых целей распределены по нормальному закону, а корреляционная функция этих флуктуаций имеет произвольный вид. В пределах предположений получены соотношения для оптимальной оценки времени запаздывания отраженных сигналов.

Ключевые слова: фазовые флуктуации, корреляционная функция, дисперсия.

FEATURES OF MEASURING OF DISTANCE TO AIM, CARRYING OUT FLIGHT WITHIN THE LIMITS OF TROPOSPHERE WAVEGUIDE ABOVE SEA

V.D. Karlov, E.A. Melenty, S.V. Kukobko, V.M. Petrusenko

In the article possibility of account of phase fluctuations of signals reflected is examined from littlepitch aims location in a troposphere waveguide outside distance of line-of-sight, during optimization of process of measuring of time of delay of signal. The process of optimization of measuring of distance to the aim on conditions of superrefraction is examined in supposition, that fluctuations of the signals reflected from лоцируемых aims up-diffused on a normal law, and the cross-correlation function of these fluctuations has an arbitrary kind. Within the limits of suppositions got correlation for the optimal estimation of time of delay of the reflected signals.

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