

УДК 621.396

В.Д. Карлов, О.Б. Котов, І.М. Пічугін, Д.В. Карлов

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

АЛГОРИТМ ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ НАВЕДЕННЯ ВІНИЩУВАЛЬНОЇ АВІАЦІЇ НА МАЛОВИСОТНУ ЦІЛЬ НАД МОРЕМ

В статті розглядається можливість врахування фазових флуктуацій сигналів, відбитих від маловисотних цілей, лоцюємих над морем за межами дальності прямої видимості, при оптимізації процесу вимірювання часу запізнення сигналу, що дозволяє використовувати отриману інформацію в автоматизованих системах наведення авіації на ціль. Процес оптимізації вимірювання дальності до цілі, що лоцюється над морем, розглядається в припущенні, що флуктуації сигналів, відбитих від маловисотних цілей, розподілені за нормальним законом, а кореляційна функція цих флуктуацій має довільний характер. В межах припущень отримано алгоритм для оптимальної оцінки часу запізнення відбитих сигналів.

Ключові слова: фазові флуктуації, кореляційна функція, дисперсія.

Вступ

Постановка проблеми. Аналіз основних військових конфліктів [1 – 3] останніх років показує, що без рішення задачі автоматизованого наведення винищувачів на ціль вирішити проблему перехоплення маловисотних цілей, що особливо здійснюють політ над морською поверхнею, неможливо. Це обумовлено тим, що дальність прямої видимості маловисотної цілі не дозволяє навести винищувач на ціль внаслідок її малості [4]. Вказана обставина, як свідчать матеріали робіт [5 – 7], може бути виправлена за рахунок використання особливостей розповсюдження радіохвиль в приморських районах. Результати робіт [5 – 7] свідчать про те, що при відповідному виборі місця дислокації радіотехнічних систем на узбережжі моря можливо збільшення дальності виявлення маловисотних цілей в 4 – 6 разів. Проте, як впливає з [8], зростає флуктуаційна помилка виміру дальності. Проте у відомій літературі алгоритмів оцінки такої помилки до теперішнього часу не приведено, відсутні так само і алгоритми оптимального виміру дальності до маловисотних цілей на дальностях тих, що перевищують дальність прямої видимості над морем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій [9, 10] свідчить, що при локації маловисотних цілей над морською поверхнею для підвищення точності вимірювання дальності 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 над морською поверхнею на відстанях, які перевищують дальність прямої видимості, розподілені за нормальним законом. В даній статті пропонується враховувати цей факт при оптимізації

процесу вимірювання дальності до маловисотної цілі, яка здійснює політ над морською поверхнею. При цьому з'являються певні особливості вимірювання дальності до цілі, лоцюємої в межах дальності прямої видимості над морем. Такі особливості в відомій літературі розглянуті не досить повно. Даному питанню і присвячена ця стаття.

Мета статті. Метою статті є синтез алгоритму вимірювання дальності до маловисотної цілі, що здійснює політ над морем в інтересах її використання в системах автоматизованого наведення винищувача на ціль, у рамках пропозицій про те, що флуктуації фази відбитих сигналів розподілені за нормальним законом, а кореляційна функція фазових флуктуацій має довільний вид.

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 зондуючий 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 радіосигналу в тропосфері [13, 14], в якій дисперсійні спо-

творення 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 [15], 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:

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

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 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 $x(\Omega) = \Omega t_3 \text{rect}(\Omega / \Delta\Omega)$; а функція $\text{rect}(\Omega / \Delta\Omega)$ має вигляд прямокутної функції:

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

Із співвідношення (2) виходить, що незалежно від природи флуктуацій вони, по відношенню до очікуваного сигналу $x(\Omega)$, є адитивною завадою, а, отже, відповідно до [16], баєсівська оцінка параметрів сигналу зводиться до оцінок по максимуму логарифма відношення правдоподібності.

Враховуючи, що розподіл фазових флуктуацій близький до нормального закону, вираз для логарифма відношення правдоподібності можна представити у вигляді [16]:

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

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 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 [16], вагова функція $R(\Omega, t_3) = t_3 R(\Omega)$, отримуємо, що умові (4) задовольняє оптимальна оцінка:

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

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 є $\sigma_{\hat{t}_3}^2 = \left\langle (\hat{t}_3 - t_3)^2 \right\rangle$,

а оцінка \hat{t}_3 є незміщеною, $\left\langle \hat{t}_3 \right\rangle = t_3$, то з врахуванням (7) отримаємо:

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

Причому якщо вимірювання дальності проводиться у присутності корельованих фазових флуктуацій, обумовлених впливом умов РРХ при локації цілі над морем, кореляційна функція яких $\Phi(\Omega, \Omega_1)$, по алгоритму, оптимальному по відношенню до некорельованих флуктуацій з частотною кореляційною функцією $\Phi(\Omega, \Omega_1) = 0,5N_0\delta(\Omega - \Omega_1)$, 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) отримуємо вираз для дисперсії оцінки часу запізнення у вигляді:

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

ВИСНОВОК

Таким чином, особливістю вимірювання дальності до цілі, лоцуюмої над морем на відстані, більшій дальності прямої видимості, є врахування разом з некорельованих і корельованих складових фазових флуктуацій відбитого сигналу в частотній області. При цьому оцінка часу запізнення відбитого сигналу при припущенні про нормальний закон розподілу фазових флуктуацій в частотній області буде незміщеною, що дозволяє використовувати отриману інформацію в автоматизованих системах наведення винищувачів на ціль.

Список літератури

1. Слипченко В.Н. Война будущего (прогностический анализ) / В.Н. Слипченко // АВН РФ. – 2000. – С. 1-28.
2. Єрмошин М.О. Борьба в повітрі: навчальний посібник / М.О. Єрмошин, В.М. Федай. – Х.: ХУПС, 2004.
3. Шутенко М. В войнах шестого поколения приоритет будет отдан воздушно-космическим силам, а не танкам // 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. – М.: Воениздат, 1977. – 128 с.
7. Распространение ультракоротких радиоволн: Пер. с англ. [Текст] / Под ред. Б.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 564 с.
8. 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 наук. конф. Харк. ун-ту Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 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. – Часть 2. – Х.: ХПИ, 1990. – С. 82.

10. Петрушенко М.М. Анализ флуктуаций информативных параметров радиолокационных сигналов при их распознавании над морем / М.М. Петрушенко, А.В. Челпанов, В.Д. Карлов // Системы озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2008. – Вып. 4(16). – С. 122-126.

11. Петрушенко М.М. 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.

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

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

14. Петрушенко М.М. Завадостійкість радіоелектронних засобів: навчальний посібник / М.М. Петрушенко, В.І. Поляков, О.В. Єфімова. – Х.: ХУПС, 2009. – 148с.: іл.

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

16. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: Справочни. / Я.Д. Ширман. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

Надійшла до редколегії 11.08.2015

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

АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ НАВЕДЕНИЯ ИСТРЕБИТЕЛЬНОЙ АВИАЦИИ НА МАЛОВЫСОТНУЮ ЦЕЛЬ НАД МОРЕМ

В.Д. Карлов, А.Б. Котов, И.М. Пичугин, Д.В. Карлов

В статье рассматривается возможность учета фазовых флуктуаций сигналов отраженных от маловысотных целей, обнаруживаемых над морем за пределами дальности прямой видимости, при оптимизации процесса измерения времени запаздывания сигнала, что позволяет использовать полученную информацию в автоматизированных системах наведения авиации на цель. Процесс оптимизации измерения дальности к цели, обнаруживаемой над морем, рассматривается в предположении, что флуктуации сигналов, отраженных от маловысотных целей, распределены по нормальному закону, а корреляционная функция этих флуктуаций имеет произвольный характер. В пределах предположений получен алгоритм для оптимальной оценки времени опоздания отраженных сигналов.

Ключевые слова: фазовые флуктуации, корреляционная функция, дисперсия.

ALGORITHM OF MEASURING OF DISTANCE IN CASS AIMING FIGHTER AIRCRAFT ON LITTLEPITCH AIM ABOVE SEA

V.D. Karlov, A.B. Kotov, I.M. Pichugin, D.V. Karlov

In the article possibility of account of phase fluctuations of signals removed is examined from littlepitch aims, лоцируемых above a sea outside distance of line-of-sight, during optimization of process of measuring of time of delay of signal, that allows to use obtained information in CASS of aiming of aviation on an aim. Process of optimization of measuring of distance to the aim, that лоцируется above a sea, examined in supposition, that fluctuations of signals, removed from littlepitch aims up-diffused on a normal law, and the cross-correlation function of these fluctuations has arbitrary character. Within the limits of suppositions an algorithm is got for the optimal estimation of time of delay of the removed signals.

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