

УДК 621.396

В.Д. Карлов¹, О.Б. Котов¹, Ю.Б. Ситнік², А.О. Радюков¹¹ Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків² Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету, Кіровоград

ПІДХІД ДО РІШЕННЯ ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО ВИМІРУ ДАЛЬНОСТІ ДО ЛІТАКА-НОСІЯ ВИСОКОТОЧНОЇ ЗБРОЇ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЙОГО ЛОКАЦІЇ В ТРОПОСФЕРНОМУ РАДІОХВИЛЕВОДІ

В статті розглядається можливість врахування фазових флуктуацій сигналів відбитих від літака-носія високоточної зброї, лоцуючого в тропосферному хвилеводі за межами дальності прямої видимості, при оптимізації процесу вимірювання часу запізнення сигналу. Процес оптимізації вимірювання дальності до цілі за умов надрефракції розглядається в припущенні, що флуктуації сигналів, відбитих від 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. На думку вітчизняних [1, 2] та зарубіжних [3] військових фахівців, при проведенні військових конфліктів основне зусилля для досягнення поставленої мети буде покладено на повітряні сили. При цьому особлива роль буде відведена носіям високоточної зброї (ВТЗ) [4, 5].

Аналіз особливостей ведення повітряної розвідки при організації боротьби з ВТЗ, проведений в [4, 5], дозволив сформулювати основні напрями вдосконалення системи управління та оцінювання якості повітряної розвідки, що у свою чергу, дозволило обґрунтувати необхідність розробки методів прогнозування якості повітряної розвідки, що відповідають вимогам системного підходу, при обов'язковому обліку функцій інформаційної системи. При цьому оскільки оцінка якості повітряної розвідки по розкриттю носіїв ВТЗ вирішуватиметься при віддзеркаленні удару повітряного супротивника до початку застосування ними засобів ВТЗ, то метою дій сил повітряної розвідки є виявлення носіїв, що входять в зону інформаційної системи повітряного розвідника. Ці завдання, як випливає з [4, 5], вирішуватимуться силами повітряної розвідки, що мають бортовий радіолокатор, при цьому для забезпечення гарантованого виявлення носія ВТЗ, необхідно забезпечити виявлення носія ВТЗ бортовим радіолокатором літака-розвідника на максимальній дальності виявлення. Як показано в [4, 5], з метою забезпечення максимальної дальності виявлення [4, 5] носія ВТЗ, що здійснює політ на малих висотах над морською, водною та рівнинною поверхнями, можна використовувати тропосферні радіохвилеводи [6]. Проте оскільки в даному випадку і носій ВТЗ, і літак-розвідник знаходяться в межах тропосферного радіохвилеводу, то за рахунок впливу тропосферних неоднорідностей відбувається збіль-

шення помилок виміру дальності [7] носія ВТЗ бортовим радіолокатором літака-розвідника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій [6, 7] свідчить, що при локації цілі в межах тропосферного радіохвилеводу (ТХВ), для підвищення точності вимірювання дальності до цілі необхідно враховувати фазові флуктуації прийнятого сигналу, обумовлених впливом умов розповсюдження радіохвиль (РРХ). Проте в цих роботах не враховувався вид розподілу фазових флуктуацій прийнятого сигналу. В роботах [6, 7] 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 літака-носія високоточної зброї, який здійснює політ в межах ТХВ. При цьому з'являються певні особливості вимірювання дальності до цілі, лоцуючої за межами дальності прямої видимості (ДПВ) над морською, водною та рівнинною поверхнями. 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 стаття.

Метою статті є розгляд особливостей процесу вимірювання дальності до літака-носія високоточної зброї при наявності на трасі розповсюдження радіохвиль ТХВ при умові, що флуктуації фази відбитих сигналів розподілені за нормальним законом, а кореляційна функція фазових флуктуацій довільна.

Основна частина

Розглянемо основні особливості вимірювання дальності до літака-носія високоточної зброї над морською, водною та рівнинною поверхнями, з урахуванням флуктуацій фази частотних складових сигналу, обумовлених впливом середовища розпо-

всюдження при локації цілі в межах ТХВ над морською, водною та рівнинною поверхнями [6, 7]. 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 флюктуаційна складові фазового набігу.

Оскільки, ми розглядаємо поширення радіосигналів в тропосфері [7], 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 [8], 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:

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

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 флюктуацій $n(\omega)$, обумовлених впливом умовами РРХ в ТРХ над морською, водною та рівнинною поверхнями.

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 флюктуацій вони, по відношенню до очікуваного сигналу $x(\Omega)$, є адитивною перешкодою,

а, отже, відповідно до [7], баєсівська оцінка параметрів сигналу зводиться до оцінок по максимуму логарифма відношення правдоподібності. Враховуючи, що, як показано в [6, 7], розподіл фазових флюктуацій 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 [7]:

$$\ln l[y(\Omega)] = \xi(\Omega, t_3) - q^2(\Omega, t_3) / 2,$$

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 флюктуацій.

Таким чином, максимально правдоподібну оцінку \hat{t}_3 отримуємо 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 [7] над морською, водною та рівнинною поверхнями, вагова функція $R(\Omega, t_3) = t_3 R(\Omega)$, отримуємо, що умові (4) задовольняє оптимальна оцінка:

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

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), отримуємо:

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

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

$$\sigma_{\hat{t}_3}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\Omega, \Omega_1) R(\Omega_1) R(\Omega) d\Omega_1 d\Omega \times$$

$$\times \left[\int_{-\infty}^{\infty} \Omega \operatorname{rect} \left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega} \right) R(\Omega) d\Omega \right]^{-2}, \quad (8)$$

причому якщо вимірювання дальності проводиться у присутності корельованих фазових флуктуацій, обумовлених впливом умов РРХ в ТРХ при локації цілі над морською, водною та рівнинною поверхнями., 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:

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

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

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

Висновок

Таким чином особливістю вимірювання дальності до цілі, лоцуюмої над морською, водною та рівнинною поверхнями. над морською, водною та рівнинною поверхнями. 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 літака-носія високоточної зброї, який знаходиться

в межах ТРХ при його локації літаком-розвідником, який оснащений бортовим радіолокатором.

Список літератури

1. Антонец В.М. Система операцій Збройних Сил України. Можливі форми та способи застосування військово-повітряних сил у воєнному конфлікті / В.М. Антонец // Воєнно-науковий збірник ВПС України. № 1. Форми та способи застосування військово-повітряних сил України. Мат. військово-наукової конференції ВПС України. – Вінниця, МО України, 1997. – С. 9-23.
2. Климов С.Б. Роль і місце Повітряних Сил у загальній системі застосування Збройних Сил України / С.Б. Климов // Наука и оборона. – 2005. – № 1. – С. 23-26.
3. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра: Моногр. / В.К. Бабич, Л.Е. Баханов, Г.П. Герасимов и др. Под ред. Е.А. Федосова. – М.: Дрофа, 2005. – 815 с.
4. Галин Л. ВВС США в войне в Персидском заливе (итоги и анализ боевых действий) / Л. Галин, А. Соколов, Н. Новичков // Зарубежное военное обозрение. – 1992. – №9. – С. 35-41.
5. Новичков Н. Подавление системы ПВО Ирака в операции «Буря в пустыне» / Н. Новичков, Л. Галин // Зарубежное военное обозрение. – 1991. – № 9. – С. 29-33.
6. Особенности дислокации радиотехнических систем приморского базирования при локации маловысотных целей / В.Д. Карлов, Н.Н. Петрушенко, Е.А. Мелентя, К.П. Квиткин // 11 НТК „Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах”. Феодосія, 8-9.09.2011. – С. 140.
7. Петрушенко М.М. Аналіз флуктуацій інформативних 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. – № 4 (16). – С. 122-126.
8. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В.Л. Гинзбург. – М.: Наука, 1967. – 683 с.

Надійшла до редколегії 11.02.2015

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

ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО САМОЛЕТА-НОСИТЕЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО ОРУЖИЯ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ЕГО ЛОКАЦИИ В ТРОПОСФЕРНОМ РАДИОВОЛНОВОДЕ

В.Д. Карлов, А.Б. Котов, Ю.Б. Сытник, А.А. Радюков

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.

GOING NEAR DECISION OF DISTANCE OPTIMUM MEASURING TASK TO AIRPLANE-TRANSMITTER OF HIGH-FIDELITY WEAPON TAKING INTO ACCOUNT LOCATION FEATURES IN TROPOSPHERE RADIOWAVEGUIDE

V.D. Karlov, O.B. Kotov, Y.B. Sitnik, A.O. Radyukov

In the article possibility of phase fluctuations account 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 location 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.