

УДК 621.396

П.Ю. Седишев, А.О. Подорожняк, Є.С. Рошупкін

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ОДНОЗНАЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ РУХОМОЇ ЦІЛІ ПРИ ЇЇ СУПРОВОДЖЕННІ ПО ШВИДКОСТІ Й КУТОВИХ КООРДИНАТАХ РАДІОЛОКАТОРОМ З ВИКОРИСТАННЯМ КОГЕРЕНТНИХ СИГНАЛІВ З ВИСОКОЮ ЧАСТОТОЮ ПОВТОРЕННЯ ІМПУЛЬСІВ

Розглянуто метод непрямого оцінювання однозначної дальності цілі при її супроводженні по радіальній швидкості та кутових координатах станцією наведення ракет з використанням когерентних сигналів з високою частотою повторення імпульсів. Показано, що при однозначному вимірюванні радіальної швидкості цілі кореляційним методом при відомому періоді повторення імпульсів та дані про кутові швидкості й прискорення лінії візування дозволяють визначити курс і зону однозначної дальності до цілі та її точне значення. Методом імітаційного моделювання, залежно від швидкості, визначені межі ракурсів цілей і параметра для забезпечення необхідної точності цілевказівки по дальності при підготовці до стрільби.

Ключові слова: когерентна імпульсна послідовність, ефект Доплера, радіальна швидкість цілі, непряме оцінювання параметра.

Вступ

Постановка проблеми та аналіз літератури.

Багатоканальні зенітні ракетні системи (ЗРС) використовують зондувальні сигнали у вигляді когерентних імпульсних послідовностей із високою частотою повторення, що забезпечує селекцію кожної рухомої цілі на фоні пасивних перешкод, однозначне вимірювання її швидкості у стробі неоднозначної дальності, необхідні точності оцінок кутових координат моноімпульсним методом. Для підготовки вихідних даних для стрільби в часовому циклі обслуговування кожного цільового каналу потрібна цілевказівка від зовнішніх джерел інформації з похибкою вимірювання часу запізнювання (дальності) меншою, ніж період повторення сигналів зондування. Усунення невизначеності по дальності методом вобуляції періоду когерентних імпульсних послідовностей скорочує час реакції ЗРС при цілях, які раптово з'являються [1 – 3].

Наявність у станціях наведення ракет (СНР) ЗРС високоточних кутових дискримінаторів дозволяє на інтервалі спостереження оцінювати параметри обертання лінії візування кожної цілі (кутові швидкість і прискорення), і в припущенні її рівномірного прямолінійного руху із параметром щодо точки стояння СНР використовувати методи непрямого слідкуючого оцінювання дальності [1, 4].

Подібні методи оцінки дальності широко використовуються в радіонавігації з використанням частотних еталонів, а також у РЛС управління артилерійським вогнем для оцінки кута попередження точки зустрічі [2, 3].

Метою даної статті є:

– оцінка можливостей використання запропонованого раніше [4] динамічного алгоритму непря-

мого оцінювання дальності цілі й параметра траєкторії в автономній системі полярних координат на основі даних кутових і доплеровських вимірювачів СНР ЗРС;

– імітаційне моделювання процесів однозначного оцінювання дальності та оцінка застосовності методу в різних ситуаціях спостереження від точності вимірювання швидкості й кутових координат цілі.

Властивості ітераційного алгоритму оцінки дальності й кутового положення цілі в автономній полярній системі координат СНР ЗРС

У практично важливих тактичних ситуаціях [4] аеродинамічні цілі входять у зону пуску ракет ЗРС по траєкторіях, які на інтервалі підготовки вихідних даних для стрільби можна вважати прямими лініями, а рух цілі рівномірним зі швидкістю V_0 .

Якщо повітряна ціль рухається під курсовим кутом γ_0 стосовно лінії візування β_0 (рис. 1), то в моменти часу t_k годограф вектора дальності в полярних координатах щодо точки стояння ЗРС буде визначатися курсовим кутом γ_k і параметром p , величина якого на атакуючому курсі повинна бути менше зони поразки:

$$t_k = t_0 + k\Delta t,$$

$$k = 0, 1, \dots, M = \frac{T_{\text{пр}} \dot{\beta}_0}{\Delta t},$$

де t_k – моменти часу відліку азимута антени β_k при кутовому супроводженні цілі, кратні часу звертання до даної цілі відповідно до циклограми СНР;

$T_{\text{пр}} \dot{\beta}_0$ – час, виділений на кутове супроводження цілі.

Для непрямого оцінювання дальності до цілі в кожний момент часу t_k необхідно також здійснити вимірювання радіальної швидкості цілі $V_{r,k}$, що є можливим, якщо СНР опромінює ціль когерентним безперервними або квазібезперервними імпульсними сигналами у вигляді послідовності імпульсів, частота проходження яких забезпечує однозначне вимірювання у заданому діапазоні швидкостей цілей [5].

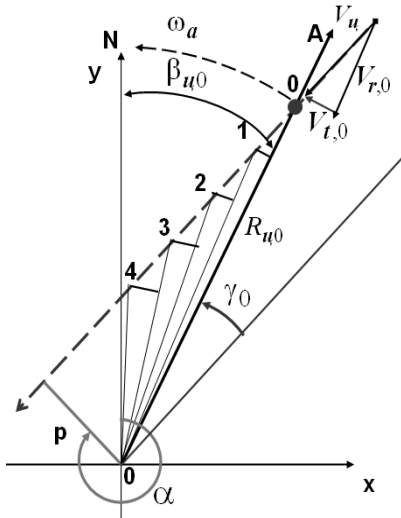


Рис. 1. Рух цілі відносно точки знаходження СНР

Непряме стежаче вимірювання дальності можливе, якщо параметр траси $p > 0$ цілі (курсовий кут $\gamma_k \neq 0$) і ціль не рухається по круговій траєкторії: $p = R_0$; $V_{r,k} = 0$ (рис. 1).

При виконанні таких умов для всіх поточних значень дальності r_k і курсових кутів γ_k справедлива рівність

$$p = r_k \sin \gamma_k = r_k \sin(\alpha \tan \frac{V_{t,k-1}}{V_{r,k-1}}) \approx r_k \frac{V_{t,k-1}}{V_{r,k-1}}, \quad (1)$$

де $V_{t,k-1}$ й $V_{r,k-1}$ – тангенціальна й радіальна складова швидкості цілі відповідно.

Для малих кутів γ_k , характерних для початку зав'язки траси, і оцінок азимута β_k в моменти часу звертання до цілі при супроводженні t_{k-1} й t_k співвідношення (1) перетвориться до вигляду

$$p \approx r_k \frac{V_{t,k-1}}{V_{r,k-1}} = \frac{r_k (r_k - V_{r,k-1} \Delta t) \omega_k}{V_{r,k-1}}, \quad (2)$$

де ω_k – швидкість обертання лінії візування цілі, яка дорівнює

$$\omega_k = \dot{\beta} \approx \frac{\Delta \beta}{\Delta t} = \frac{\beta_k - \beta_{k-1}}{\Delta t}; \quad \Delta t = t_k - t_{k-1}. \quad (3)$$

Тоді, використовуючи наступні відліки азимута й радіальної швидкості, з урахуванням припущень, прийнятих в (2) і (3), можна записати рекурентне

рівняння, що характеризує вектор положення цілі при непряму слідкуючому оцінюванні дальності

$$p = \frac{r_k (r_k - V_{r,k-1} \Delta t) \omega_k}{V_{r,k-1}} = \frac{r_{k+1} (r_{k+1} - V_{r,k} \Delta t) \omega_{k+1}}{V_{r,k}}. \quad (4)$$

Так як в (4) $r_{k+1} \gg V_{r,k} \Delta t$, $r_{k+1} = r_k - V_{r,k} \Delta t$, можна скласти квадратне рівняння із невідомим r_k

$$\frac{r_k^2 \omega_k}{V_{r,k-1}} = \frac{(r_k - V_{r,k} \Delta t)^2 \omega_{k+1}}{V_{r,k}} = \frac{(r_k^2 - 2r_k V_{r,k} \Delta t + (V_{r,k} \Delta t)^2) \omega_{k+1}}{V_{r,k}}. \quad (5)$$

Нехтуючи в (5) малою величиною $(V_{r,k} \Delta t)^2 \ll r_k^2$ отримаємо

$$r_k \approx \frac{2V_{r,k} \Delta t \omega_{k+1}}{\omega_{k+1} - \omega_k} = \frac{2V_{r,k} \omega_{k+1}}{(\omega_{k+1} - \omega_k) / \Delta t},$$

що дає при фільтрації оцінок у вимірювачі, який стежить, остаточну оцінку дальності на $k+1$ кроці вимірювань

$$\hat{r}_{k+1} = \frac{2\hat{V}_{r,k} \omega_{k+1}}{\dot{\omega}_{k+1}}, \quad (6)$$

де \hat{r}_{k+1} – оцінка дальності після фільтрації на $k+1$ кроці;

$\hat{V}_{r,k}$ – оцінка радіальної швидкості цілі;

$\dot{\omega}_{k+1}$ – похідна швидкості обертання лінії візування за часом.

Дійсно, всі вхідні величини (6) залежать від параметра p та курсового кута γ (рис. 1):

$$r(\gamma) = p(\sin \gamma)^{-1}; \quad V_t(\gamma) = V_0 \sin \gamma;$$

$$V_r(\gamma) = V_0 \cos \gamma; \quad \omega = V_0 p^{-1} \sin^2 \gamma; \quad (7)$$

$$\dot{\omega} = 2V_0^2 p^{-2} \sin^3 \gamma \cos \gamma.$$

Підстановка цих значень в (6) приводить до тождественності. Очевидно, що оцінювання дальності буде визначатися за умови руху цілі мінімум на трьох інтервалах часу звертання до цілі.

Крім того, із співвідношень (7) витікає, що при будь-якій постійній швидкості цілі на траєкторії максимальна швидкість обертання лінії візування досягається при курсовому куті 90° :

$$\omega_{\max} = V_0 p^{-1},$$

а максимальне значення прискорення – при куті 60° :

$$\dot{\omega}_{\max} = 0,65 V_0^2 p^{-2} = 0,65 \omega_{\max}^2.$$

У секторі курсових кутів цілі (ракурсів), обмежених кінцевою точністю оцінок азимута для

випадку зав'язки траси на великій дальності та у області режекції пасивних перешкод при знаходженні цілі поблизу параметра, курсовий кут (ракурс) може бути знайдений тільки за даними кутових вимірювань

$$\sin \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\dot{\omega}}{2\omega^2}\right)^2}} \quad (8)$$

Співвідношення (6), (7) та (8) показують, що межі точного вимірювання курсових кутів визначаються похибками оцінювання азимута цілі в моменти відліку і через значення $\omega_{\max} = V_{\delta} p^{-1}$ пов'язані з її швидкістю й параметром.

Враховуючи рекурентну рівність (4), варто очікувати, що при відсутності маневру цілі на інтервали часу непрямого вимірювання дальності величина параметра, що характеризує мінімально можливу дальність цілі при русі на траєкторії, дозволяє визначити факт її входження в зону поразки ЗРК, а точність оцінювання параметра завжди буде більш високою, ніж оцінки дальності.

Імітаційне моделювання процесів однозначного непрямого оцінювання дальності та оцінка застосовності методу в різних ситуаціях спостереження цілей на атакуючих курсах

Відповідно до отриманих співвідношень була розроблена імітаційна модель, що враховує рівномірний рух цілі по лінійній траєкторії у системі полярних координат відносно точки знаходження СНР із квазібезперервним зондувальним сигналом у вигляді когерентної послідовності імпульсів із високою частотою повторення.

При виборі вихідних даних моделювання був врахований досвід аналізу й розробок, приведений в [1 – 3] стосовно до точності автосупроводження когерентно-імпульсним радіолокатором наведення ракет і управління стрільбою зенітної артилерії.

Аналіз показав, що однозначне вимірювання радіальної швидкості цілі ($V_r \leq 2M \leq 600i / \text{ñ}$) з СКО $\sigma_{V_r} = 1...1,5i / \text{ñ}$ при точності оцінки азимута кутовим моноімпульсним дискримінатором $\sigma_{\beta} = 0,3$ мілірадіан і циклі звертання до цілі 0,1 с можливо, якщо на частоті 10 ГГц забезпечується період проходження когерентних імпульсів тривалістю 10 мкс і часом когерентного накопичення сигналу при кореляційній обробці – 10 мс.

Результати статистичних експериментів представлені на рис. 2 – 4.

На рис. 2 та 3 наведені отримані при моделюванні алгоритму непрямого вимірювання залежності

відхилення математичного очікування і СКО дальності від істинною траєкторії при фіксованому значенні параметра для двох швидкостей руху цілі (150 і 300 м/с), у порівнянні з величиною параметра (10 км).

Як видно із графіків при кінцевих значеннях СКО вимірювання азимута при супроводі цілі прийнятні точності оцінки дальності істотно залежать від швидкості цілі й стають порівнянними з параметром на більшій дальності для швидкісних цілей. При цьому зона незадовільних оцінок в обох випадках перебуває в межах ракурсів цілі не більше $\pm 5^{\circ}...7^{\circ}$ на атакуючих курсах.

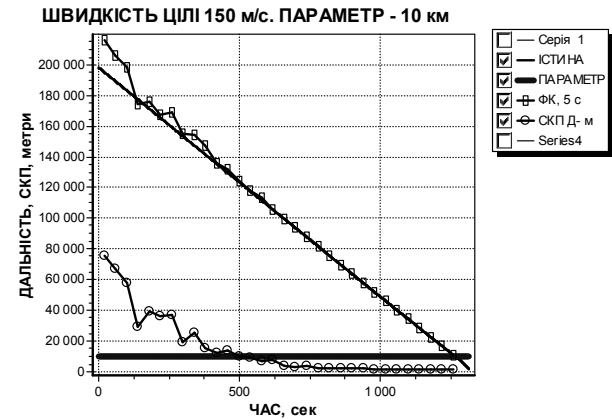


Рис. 2. Точність оцінки дальності при непрямих слідкуючих вимірюваннях ($V_{\delta} = 300$ м/с, $p = 10$ км)

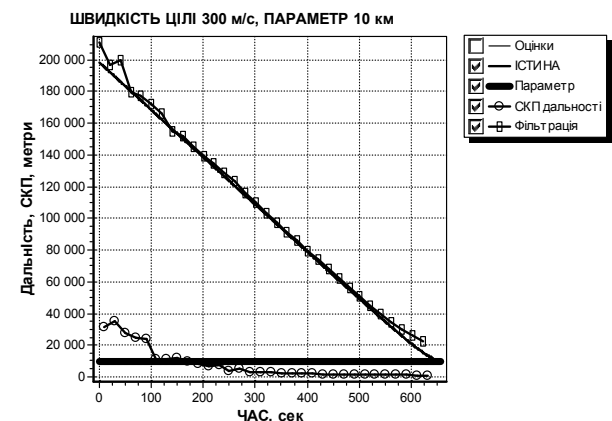


Рис. 3. Точність оцінки дальності при непрямою слідкуючому вимірюванні ($V_{\delta} = 300$ м/с, $p = 10$ км)

У той же час оцінки параметра мають малі відхилення від істинних у більш широкому діапазоні ракурсів атакуючої цілі як при малому параметрі (10 км, рис. 4, а), так і при параметрі, порівнянному з дальністю зав'язки трасового супроводження (150 км, рис. 4, б).

Висновки

Проведений аналіз і результати імітаційного моделювання показують, що застосування методу непрямого стежачого оцінювання дальності при супроводженні цілі за швидкістю й кутовими координатами може бути використане для одержання даних автономної цілевказівки ЗРК.

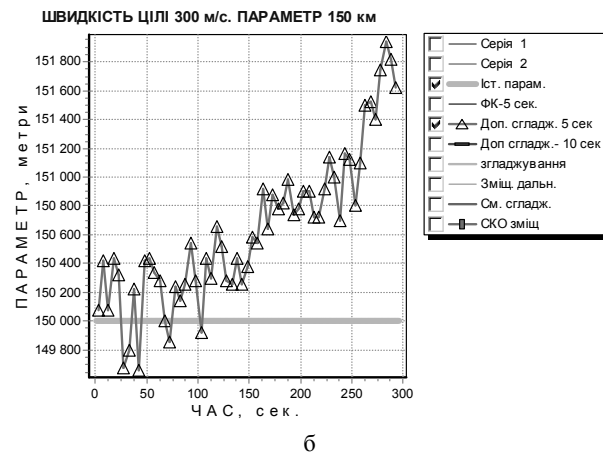
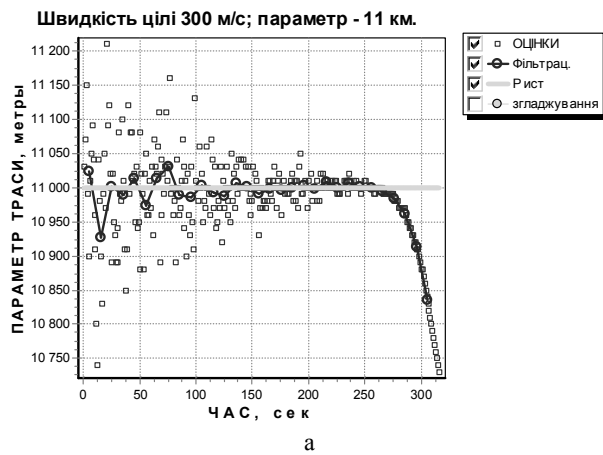


Рис. 4. Точність оцінки параметра при непрямуому слідкуючому вимірюванні ($V_0 = 300$ м/с):
а – $p=10$ км; б – $p=150$ км

У межах ракурсів цілі $7^\circ \dots 80^\circ$ можливо забезпечити допустимі точності цілевказівки для усунення неоднозначності дальності в когерентно-імпульсних СНР, а також оцінити величину параметра траєкторії, що характеризує факт входу цілі в зону поразки ЗРС.

Список літератури

1. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: справ / Науч. ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 821 с.
2. Barton D.K. Radar system analysis / David K. Barton. – ARTECH HOUSE INC. USA. MA, 1976. – 608 p.
3. Barton D.K. Radar system analysis and modeling / David K. Barton. – ARTECH HOUSE INC. USA. MA, 2005. – 745 p.
4. Седышев П.Ю. Косвенное оценивание дальности до движущегося излучателя когерентных сигналов при углом сопровождения пассивными каналами СНР ЗРС / П.Ю. Седышев // Збірник наукових праць Об'єднаного науково-дослідного інституту Збройних Сил. – Х.: ОНДІ ЗС, 2007. – Вип. 2 (4). – С.111-121.
5. Dilkes F.A. Defence R&D Canada. A Phase Doppler Effect: Digital Electronic Support vs. Coherent Radar / Dr. Fred A. Dilkes. // NATO RTO SET-059 Symposium on "Target Tracking and Sensor Data Fusion for Military Observation Systems" Budapest, Hungary, 13-15 October 2003. – RTO SET-059-33.

Надійшла до редколегії 21.02.2009

Рецензент: канд. техн. наук, проф. М.А. Шершнев, Харківський університет Повітряних Сил ім. І.Кожедуба, Харків.

ОДНОЗНАЧНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ДАЛЬНОСТИ ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛИ ПРИ ЕЕ СОПРОВОЖДЕНИИ ПО СКОРОСТИ И УГЛОВЫМ КООРДИНАТАМ РАДИОЛОКАТОРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ С ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ

П.Ю. Седышев, А.А. Подорожняк, Е.С. Рощупкин

Рассмотрен метод косвенного оценивания однозначной дальности цели при ее сопровождении по радиальной скорости и угловым координатам станцией наведения ракет с использованием когерентных последовательностей сигналов с высокой частотой повторения импульсов. Показано, что при однозначном измерении радиальной скорости цели корреляционным методом при известном периоде повторения импульсов, данные об угловой скорости и ускорении линии визирования позволяют определить курс и область однозначной дальности до цели и ее точное значение. Методом имитационного моделирования в зависимости от скорости цели, определены границы ракурсов целей и параметра для обеспечения необходимой точности целеуказания по дальности при подготовке к стрельбе.

Ключевые слова: Когерентная импульсная последовательность, эффект Доплера, радиальная скорость цели, косвенное оценивание параметра.

THE UNEQUIVOCAL A MOVING TARGET RANGE ESTIMATION AT ITS TRACKING ON VELOCITY AND ANGULAR DATA OF THE RADAR WITH USAGE OF COHERENT SIGNAL WITH A HIGH FREQUENCY PULSE REPETITION

P.J. Sedyshv, A.O. Podorozhnyak, E.S. Roschupkin

The method of indirect estimation of the unambiguous range of the target is observed at its tracking on a radial velocity and an angular data by a missile guidance station with usage of coherent pulse signals with a high frequency repetition. It is displayed that for unambiguous measuring of the target radial velocity by MTI method at a known pulse period and data about angular velocities and acceleration of a sightline allow to define allowed band of the unequivocal target range and its exact value For support of targeting accuracy on range and the shooting preparation by simulation technique subject to a target velocity the boundary of aspect angle and crossover are defined.

Keywords: the Coherent pulsing sequence, Doppler effect, a target radial velocity, indirect estimation of parameters.