

УДК 621.396.9

В.С. Куц, А.М. Коржов

## ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОГО РОЗМІРУ ТА ПОЛОЖЕННЯ ЧАСОВОГО СТРОБУ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ЗАТРИМКИ У БІСТАТИЧНІЙ РЛС

*Обґрунтований спосіб обчислення потенційно мінімального розміру часового стробу для здійснення слідування за затримкою ехо-сигналу від цілі у бістатичній РЛС. Значення цього розміру залежить, зокрема, від точності вимірювання затримки у поточний момент слідування за ціллю.*

### Постановка проблеми та аналіз літератури

Одним із перспективних напрямків сучасного розвитку радіолокаційної техніки ППО є використання просторового рознесення передавального та приймального пунктів РЛС. Серед численних технічних питань, необхідних для вирішення у таких специфічних варіантах розташування, стає завдання забезпечення стійкого слідування за ціллю.

У багатьох друкованих джерелах (наприклад, [2 – 4]) розглядаються загальнометодологічні та деякі деталізовані аспекти вказаної проблеми.

Розглянемо можливий варіант рознесеної у просторі РЛС супроводження та цілевказівки, яка працює по аеродинамічних цілях. Така бістатична система складається з передавача та розташованого на відстані довжини бази  $L$  від нього приймача (рис. 1). Обмежимо розгляд проекцією на горизонтальну (азимутальну) площину.

Приклад застосування подібної системи наведений у [3, 4]. Стаціонарний передавач для такої системи функціонує у метровому діапазоні хвиль та випромінює імпульсний вузькосмуговий або фазоманіпульований сигнал із відомими сталими параметрами.

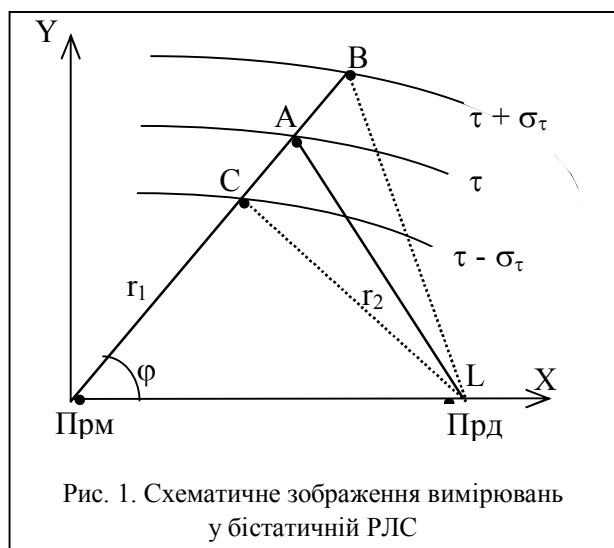


Рис. 1. Схематичне зображення вимірювань у бістатичній РЛС

У місці прийому за відбитим від цілі сигналом вимірюється затримка  $\tau$ , яка відповідає сумарній дальності  $R = r_1 + r_2 = c\tau$ , де  $c$  – швидкість розповсюдження хвиль, а також пеленг цілі  $\varphi$  відносно напрямку на передавач. На рис. 1 зображена ціль (точка А) у перетині ліній положення, а саме – еліпсу ( $R = c\tau = \text{const}$ ) та прямої (для  $\varphi = \text{const}$ ), а також імовірнісні межі місцеположення цілі відповідно до затримок  $\tau + \sigma_\tau$  (точка В) і  $\tau - \sigma_\tau$  (точка С), де  $\sigma_\tau$  – середньоквадратична похибка (СКП) вимірювання затримки.

Для нормального функціонування системи в режимі супроводження цілі з метою забезпечення роботи пристрою слідування за затримкою необхідно на кожному такті вимірювань обчислювати часові межі стробу на виході узгодженого фільтра, до якого з певною відомою ймовірністю має потрапляти результуючий імпульс відбиття від цілі. Тобто, треба отримати аналітичний вираз для мінімальної потенційної величини стробу за затримкою  $v = 2\sigma_\tau$ , враховуючи змінне у часі значення  $\sigma_\tau$ .

Використаємо теоретичне обмеження стосовно СКП вимірювання кута  $\varphi$ :  $\sigma_\varphi = 0$ , тобто відсутня випадкова похибка кутових вимірювань.

З метою зниження рівня різного типу завдань на прийомі є доцільним зменшувати ширину стробу, але при цьому важливо, щоб імпульс на виході системи обробки (або послідовність імпульсів для декількох цілей) із визначеною наперед ймовірністю потрапив до цього стробу. Зокрема, це має суттєве значення в разі знаходження цілі біля меж робочої зони РЛС. Такий підхід необхідний також для роботи системи шумового автоматичного регулювання підсилення радіоприймального пристрою РЛС.

**Мета статті** – обґрунтовано запропонувати доцільний порядок визначення положення середини часового строба та його мінімальної ширини.

### Основний матеріал

Потенційна точність вимірювання затримки визначається за формулою [1]

$$\sigma_{\tau} = \frac{1}{\Delta F \sqrt{q}}, \quad (1)$$

де  $q$  – параметр виявлення,  $q = \frac{2E_{\max}}{N_0}$ ;

$\Delta F$  – середньоквадратична ширина спектра зондуєчого сигналу;

$E_{\max}$  – максимальна енергія сигналу на вході приймача;

$N_0$  – сумарна спектральна густина потужності шумів.

Як відомо [1],

$$E_{\max} \approx P_c T_H,$$

де  $T_H$  – період когерентного накопичення луна-сигналу;

$P_c$  – середня потужність сигналу на виході антенного пристрою за час  $T_H$ .

З урахуванням цього, можна записати:

$$q \approx \frac{2P_c T_H}{N_0}. \quad (2)$$

Для бістатичної РЛС, яка розглядається,  $P_c$  визначається формулою [2]

$$P_c = \frac{P_T G_T G \lambda^2 \sigma_{\Pi}}{(4\pi)^3 r_1^2 r_2^2}, \quad (3)$$

де  $P_T$  – потужність зондуєчого сигналу;

$G_T$  – коефіцієнт підсилення антени передавача;

$G$  – коефіцієнт підсилення антени приймача;

$\lambda$  – довжина хвилі сигналу на прийомі;

$\sigma_{\Pi}$  – ЕПР цілі;

$r_1, r_2$  – складові сумарної дальності.

Вважатимемо, що значення  $N_0, \Delta F, P_T, G_T, G, \sigma_{\Pi},$

$T_H$  є незмінними за весь час спостереження.

З урахуванням (1) – (3), отримаємо

$$\sigma_{\tau} = D \frac{r_1 r_2}{\lambda}, \quad (4)$$

$$\text{де } D = \frac{1}{\Delta F} \left[ \frac{(4\pi)^3 N_0}{2P_T G_T G \sigma_{\Pi} T_H} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Отже,

$$v_{\tau} = 2D \frac{r_1 r_2}{\lambda}. \quad (5)$$

Значення  $\lambda$  змінюється завдяки зміні частоти зондуєчого сигналу (сканування за частотою), а також враховуючи наявність доплерівського зсуву частоти для цілі, яка рухається.

Зазначимо, що на відміну від суміщеної РЛС у рознесеному варіанті слід враховувати додаткові

джерела виникнення похибки вимірювання затримки, а саме:

$\sigma_f^2$  – дисперсії похибки, обумовленої розбіжністю частот опорних генераторів приймача та передавача, а також наявністю фазової розсинхронізації між зондуєчим сигналом та опорним коливанням у приймачі. Останнє важливо для роботи корелятора ширококутового ФКМ сигналу;

$\sigma_L^2$  – дисперсії похибки, пов'язаної із наявністю випадкової складової в похибці визначення відстані  $L$  між антенами передавача та приймача.

Цей фактор є вагомим, якщо приймач (або передавач) рухається. Тоді більш коректним буде запис:

$$\sigma_{\tau 3}^2 = \sigma_{\tau}^2 + \sigma_f^2 + \sigma_L^2,$$

а також  $v_{\tau 3} = 2\sigma_{\tau 3}$ .

Але, якщо виконується співвідношення

$$\sigma_f^2 \gg (\sigma_f^2 + \sigma_L^2),$$

то буде справедливим, що

$$v_{\tau} \approx v_{\tau 3}.$$

При більш детальному розгляді питання щодо похибки  $\sigma_{\tau}$  і мінімального розміру стробу безумовно слід взяти до уваги наявність випадкової похибки вимірювання кута  $\phi$ , яка залежить від параметрів антени, приймача, сигналу, шуму, положення та руху цілі. Крім того, при переході до просторових вимірів з'явиться принаймні ще одна кутова складова. Такий ускладнений варіант не розглядається у статті.

На етапі супроводження луна-сигналу за затримкою для кожного  $k$ -го такту спостереження можна прогнозувати значення  $R_{k+1}$  та  $\phi_{k+1}$  на наступний такт, користуючись відомими алгоритмами екстраполяції параметрів руху та координат. За умови прямолінійного руху цілі є зручним здійснювати прогнозування траєкторії, спираючись на декартові координати [2] (площинний варіант)

$$X_k = \frac{R_k}{2} \frac{\left(1 - \left(\frac{L}{R_k}\right)^2\right) \cos \phi_k}{1 - \frac{L}{R_k} \cos \phi_k}; \quad (6)$$

$$Y_k = \frac{R_k}{2} \frac{\left(1 - \left(\frac{L}{R_k}\right)^2\right) \sin \phi_k}{1 - \frac{L}{R_k} \cos \phi_k} \quad (7)$$

та їх похідні  $\dot{X}_k$  і  $\dot{Y}_k$ .

А згодом можна обчислити прогнозовані значення  $X_{k+1}$  та  $Y_{k+1}$ , а також  $\dot{X}_{k+1}$  та  $\dot{Y}_{k+1}$ :

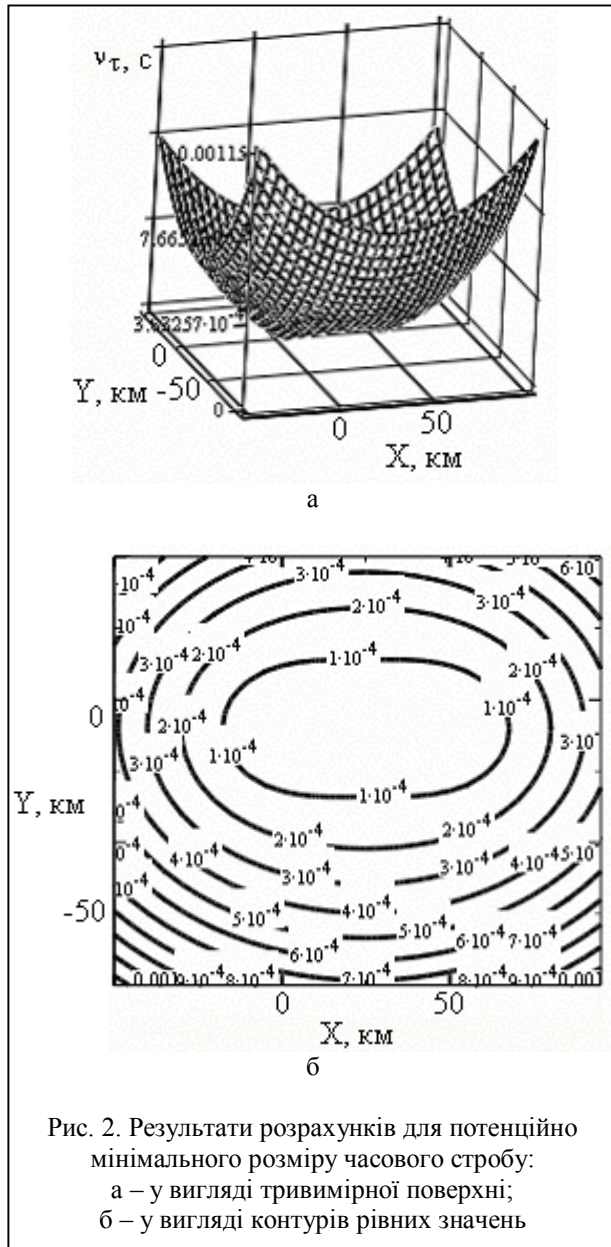


Рис. 2. Результати розрахунків для потенційно мінімального розміру часового стробу:  
 а – у вигляді тривимірної поверхні;  
 б – у вигляді контурів рівних значень

$$R_{k+1} = \left( x_{k+1}^2 + y_{k+1}^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \left( (x_{k+1} - L)^2 + y_{k+1}^2 \right)^{\frac{1}{2}} ;$$

$$\varphi_{k+1} = \arctg \frac{y_{k+1}}{x_{k+1}} .$$

Іншим шляхом можна без застосування алгоритму екстраполяції на (k + 1)-му такті вимірювань використовувати розрахований розмір стробу за наявними даними R<sub>k</sub> та φ<sub>k</sub>. Тобто, брати

$$v_{\tau_{k+1}} \approx v_{\tau_k} = 2D \frac{r_{1k} r_{2k}}{\lambda_k} .$$

Якщо не враховувати змінний характер λ, тобто для λ = const, маємо

$$v_{\tau} = \frac{2D}{\lambda} r_1 r_2 = M r_1 r_2 ,$$

де M = const.

Останнє рівняння перетворюється у вираз:

$$r_1 r_2 = v_{\tau} M ,$$

який за умови змінних значень r<sub>1</sub> та r<sub>2</sub> і фіксованих значень v<sub>τ</sub>M відповідає відомим овалам Кассіні [2]. Наведемо приклад кількісного обчислення потенційно мінімального розміру часового стробу для таких значень параметрів:

$$\Delta F = 3 \cdot 10^4 \text{ Гц}; N_0 = 10^{-13} \text{ Вт/Гц}; T_H = 8 \cdot 10^{-5} \text{ с};$$

$$P_T = 10^5 \text{ Вт}; G_T = 1000; G = 10; \lambda = 2 \text{ м};$$

$$L = 50 \text{ км}; \sigma_{\Pi} = 2 \text{ м}^2 .$$

Результати чисельного моделювання на ПЕОМ значень v<sub>τ</sub> (у секундах) наведено на рис. 2 у вигляді тривимірної поверхні (а) та контурів рівних значень (б).

**Висновок**

Таким чином, знайдено аналітичний вираз (5) для розрахунку потенційно мінімального розміру стробу у приймальному пристрої бістатичної РЛС з метою поліпшення параметрів супроводження цілі та запропоновано здійснювати адаптацію системи слідування за затримкою відбитого сигналу до очікуваної потенційної точності вимірювань.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям: Пер. с англ. / Под ред. М.М. Вейсбейна. – М.: Сов. радио, 1976.
2. Справочник по радиолокации в 4-х т.: Пер. с англ. / Под ред. К.Н. Трофимова. – М.: Сов. радио, 1978. – Т. 4.
3. Особливості функціонування бістатичної РЛС з просторово-частотним скануванням / Карлов В.Д., Сидішев Ю.М., Стахеев М.О. та інш. // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 1999. – Вип. 3(25). – С. 52 – 59.
4. Рознесені радіолокаційні станції як складова перспективної системи контролю повітряного простору / Карлов В.Д., Куц В.С. та ін. // Зб. наук. пр. – К.: ЦНДІ ЗС України, 2000. – Вип. 4. – С. 81 – 85.

Надійшла 06.10.2005

Рецензент: д-р техн. наук професор Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил.