О.Є. Казаков

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ОЗНАК РОЗПІЗНАВАННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ЦІЛЕЙ ПРИ ВИКОРИСТАННІ БАГАТОЧАСТОТНОГО СИГНАЛУ В БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЯХ

Викладено можливості отримання ознак розпізнавання радіолокаційних цілей по сигнальній інформації багатопозиційних РЛС. В якості ознак розпізнавання основна увага приділялася таким ознакам, як геометричні характеристики і швидкості відносного обертання цілі. Розглянуто можливості отримання ознак розпізнавання при використанні багаточастотних сигналів при проведенні спільної кореляційної обробки цих сигналів.

Ключові слова: радіолокаційна ціль, багатопозиційна РЛС, багаточастотний сигнал, ознаки розпізнавання, взаємна кореляційна функція.

Вступ

Постановка проблеми. В даний час все частіше знаходять застосування багатопозиційні РЛС (БП РЛС). Однак, розробці можливості визначення ознак розпізнавання радіолокаційних цілей (РЛЦ) по огинаючим амплітуд відбитих багаточастотних сигналів (БЧС), прийнятих в БП РЛС не приділялося достатньої уваги.

Крім того доцільно провести аналіз інформації про ознаки розпізнавання РЛЦ, а саме, геометричних характеристик цілі, параметрів її обертання навколо центру мас за взаємною кореляційної функції огинаючих амплітуд сигналів, прийнятих в БП РЛС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час досить докладно розглянуті питання просторово-часової обробки сигналів в БП РЛС [1–6; 10; 12].

Однак, при цьому практично не розглядалися питання використання та обробки БЧС для отримання ознак розпізнавання РЛЦ в таких РЛС.

Виходячи з цього, необхідно розглянути можливості визначення ознак розпізнавання РЛЦ, а саме, геометричних характеристик і швидкості відносного обертання цілі по огинаючим амплітуд відбитих БЧС, прийнятих в БП РЛС.

Метою статті є розгляд можливостей визначення ознак розпізнавання цілей по радіолокаційним сигналам, отриманим в БП РЛС при використанні БЧС.

Виклад основного матеріалу

Як показано в [1] БП РЛС може містити в своєму складі як окремі РЛС, так і систему рознесених на місцевості приймальних пунктів. При цьому РЛС можуть випромінювати БЧС, а винесені пункти

приймати відбиті від цілі сигнали на декількох частотах і проводити їх некогерентну обробку [8]. У цьому випадку також з'являється можливість отримувати додаткову інформацію про ознаки розпізнавання цілей.

Розглянемо спочатку РЛС з рознесеним прийомом, в якій приймається і обробляється БЧС.

Нехай є основна РЛС і територіально винесений приймальний пункт.

Їх розташування характеризується кутом розносу між лініями візування цілі β . РЛС випромінює, а винесений приймальний пункт приймає БЧС розсіяний ціллю, яка складається з N елементів, які відбивають.

У цьому випадку можливі для отримання ознак розпізнавання наступні види обробки БЧС в винесеному пункті: кореляційний обробка огинаючої амплітуд, обробка з метою отримання некогерентного портрета (НП) цілі, що спостерігається.

При проведенні кореляційної обробки в частотній області огинаючих амплітуд сигналів, прийнятих винесеним пунктом, може бути отримана інформація про інтервал кореляції. В цьому випадку можна отримати вираз для інтервалу частотної кореляції при обробці амплітуд відбитих сигналів у винесеному приймальному пункті у вигляді [9]:

$$(\Delta\omega)_{\text{кв}} = \frac{\sqrt{\pi c}}{\sqrt{2} [L_x (1 + \cos \beta) - L_y \sin \beta]} \chi_\beta, \quad (1)$$

де L_x, L_y – розміри цілі уздовж лінії візування основної РЛС і в перпендикулярному до цієї лінії напрямку;

χ_β – коефіцієнт форми цілі в винесеному приймальному пункті.

$$\chi_{\theta} = \frac{2}{N(N-1)} \times$$

$$\times \sum_{\substack{i,n=1 \\ i>n}}^N \frac{L_x (1 + \cos \beta) \pm L_y \sin \beta}{\sigma_{\Delta X'_{ni} - \Delta Y'_{ni}}} \exp \left\{ -\frac{a_{\Delta X'_{ni} - \Delta Y'_{ni}}^2}{\sigma_{\Delta X'_{ni} - \Delta Y'_{ni}}^2} \right\},$$

$$a_{\Delta X'_{ni} - \Delta Y'_{ni}} = (a_{x_n} - a_{x_i})(1 + \cos \beta) -$$

$$- (a_{y_n} - a_{y_i}) \sin \beta; \quad (2)$$

$$\sigma_{\Delta X'_{ni} - \Delta Y'_{ni}}^2 = \left(\sigma_{x_n}^2 - 2r_{x_n x_i} \sigma_{x_n} \sigma_{x_i} + \sigma_{x_i}^2 \right) \times$$

$$\times (1 + \cos \beta)^2 - 2r_{\Delta x_{ni} \Delta y_{ni}} \times$$

$$\times \sqrt{\sigma_{x_n}^2 - 2r_{x_n x_i} \sigma_{x_n} \sigma_{x_i} + \sigma_{x_i}^2},$$

де $a_{x_n}, a_{y_n}, \sigma_{x_n}^2, \sigma_{y_n}^2$ – параметри нормальних законів розподілу координат відбиваючих елементів цілі уздовж осей X і Y ;

$r_{x_n x_i}, r_{y_n y_i}$ – коефіцієнти кореляції координат між відбиваючими елементами уздовж осей X і Y ;

$r_{\Delta x_{ni} \Delta y_{ni}}$ – коефіцієнти кореляції різниць координат відбиваючих елементів вздовж осей X і Y .

З виразу (1) випливає, що інтервал частотної кореляції квадратів амплітуд БЧС, прийнятого в винесеному пункті на основний поляризації, залежить від розмірів цілі уздовж лінії візування основний РЛС і в перпендикулярному до неї напрямі з урахуванням кута розносу системи.

При невеликому куті розносу β , як показують розрахунки, можна покласти коефіцієнти форми цілі, одержані в суміщеному і винесеному (2) приймальних пунктах, рівними.

В цьому випадку отримаємо формулу для визначення коефіцієнта подовження цілі у вигляді:

$$\frac{L_x}{L_y} = \frac{\beta}{2} \frac{(\Delta \omega)_{\kappa. \theta}}{[(\Delta \omega) - (\Delta \omega)_{\kappa. \theta}]}. \quad (3)$$

Модуль в знаменнику цього виразу свідчить про те, що значення величин інтервалів частотної кореляції залежить від орієнтації цілі щодо основної радіолокаційної станції.

Вимірюючи інтервали частотної кореляції квадратів амплітуд БЧС в суміщеної і винесеній на невеликий кут позиціях, можна визначати коефіцієнти подовження цілі і її деполаризуючої частини, які можуть бути використані в якості ознак розпізнавання.

При проведенні некогерентної обробки відбитого від цілі БЧС в РЛС з суміщеним прийомом може бути отриманий НП цілі, який характеризує радіальний розмір цілі.

Якщо в радіолокаційній станції є винесений приймальний пункт, то в ньому також може бути

отриманий при проведенні аналогічної обробки сигналу НП цілі.

Отримаємо вираз для НП в винесеному пункті у вигляді [9]:

$$Y_{HB} = \sum_{l=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \dot{S}_i(\beta) \dot{S}_k^*(\beta) \times$$

$$\times \exp \left\{ j l \Delta \omega t \left[2 (\tau_{xk} - \tau_{xi}) + \beta (\tau_{yk} - \tau_{yi}) \right] \right\}. \quad (4)$$

При $\beta = 0$ отримаємо аналогічне вираз для НП цілі при суміщеному прийомі.

Аналіз даних виразів дозволяє зробити висновок про те, що вони відрізняються один від одного співмножником $\exp \{ \beta (\tau_{yk} - \tau_{yi}) \}$, який характеризує подовження НП за рахунок відстаней між відбиваючими елементами, які спостерігаються в напрямку, перпендикулярному лінії візування основний РЛС, тобто в поперечному напрямку.

Чим більше поперечний розмір цілі, тим більше тривалість НП цієї цілі, отриманого в винесеному приймальному пункті, в порівнянні з тривалістю аналогічного портрета, розрахованого в суміщеному з основною РЛС приймальному пункті при малих кутах розносу.

З метою підтвердження цих висновків, методом математичного моделювання були побудовані НП по пачці БЧС, прийнятих в суміщеному і винесеному пунктах.

При цьому використовувалася математична модель цілі у вигляді сукупності чотирьох відбиваючих елементів, два з яких розташовані уздовж лінії візування РЛС, а два інших – в перпендикулярному лінії візування напрямку.

Результати розрахунків показані на рис. 1, який відображає НП цілі, отримані в винесеному приймальному пункті.

Рис. 1. Некогерентні портрети цілі у винесеному пункті

Джерело: розроблено автором.

Суцільною лінією позначений НП при відношенні поперечного розміру цілі до її продольного розміру, рівному 0,16. Пунктирною лінією позначений НП при відношенні цих розмірів, рівному 0,3. При цьому кут розносу $\beta = 7^\circ$.

Протяжність НП, показаних на даному рисунку, може бути виміряна на фіксованому рівні, позначеному штриховий лінією. Поздовжній розмір даної цілі обраний рівним 1 м.

Далі, при обробці сукупності результатів математичного моделювання, побудований графік, що відображає залежність відносного подовження некогерентного портрета (отриманого у винесеному приймальному пункті у порівнянні з некогерентним портретом, отриманим в суміщеному приймальному пункті) від відношення поперечного розміру цілі до її поздовжнього розміру (рис. 2).

Аналіз цього графіка показує, що при збільшенні поперечного розміру цілі приріст “подовження” НП зростає хвилюподібно.

Це обумовлено тим, що для цілей простої форми (подаються малою кількістю відбиваючих елементів ($3 \div 5$)) можуть спостерігатися ситуації, коли величини піків НП в винесеному і суміщеному приймальних пунктах значно відрізняються в зв'язку з наявністю інтерференційних явищ при формуванні некогерентного портрета.

У цьому випадку два близько розташованих піку НП, отриманого в винесеному приймальному пункті, “зливаються” в один пік, внаслідок чого довжина даного НП дещо скорочується. Однак, в загальному, представлений графік свідчить про пряму залежність величини “подовження” НП цілі від її поперечного розміру при фіксованому поздовжньому розмірі.

Рис. 2. Залежність подовження НП в винесеному пункті

Джерело: розроблено автором.

Для наочного уявлення залежності величини відносного “подовження” некогерентного портрета цілі в винесеному приймальному пункті від величини кута розносу β за допомогою математичного моделювання були отримані аналогічні розглянутому вище графіки для різних кутів розносу ($\beta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$).

Ці графіки наведені на рис. 3.

Рис. 3. Залежність подовження від величини кута розносу

Джерело: розроблено автором.

Сукупність даних графіків свідчить про те, що при збільшенні кута розносу (це може відбуватися, наприклад, при наближенні цілі до РЛС) різниця в протяжності НП, одержуваних в суміщеному і винесеному пунктах стає більш помітною. Тобто при збільшенні відносини поперечного розміру цілі до поздовжнього, чим більше кут розносу β , тим швидше відбувається наростання величини “подовження” НП.

Аналіз виразу (4) і результатів математичного моделювання показують, що тривалість і форма НП цілі, отриманого в винесеному приймальному пункті, залежить від положення відбиваючих елементів, розташованих як в поздовжньому, так і поперечному напрямку і, отже, даний НП містить інформацію як про поздовжній, так і про поперечний розмір цілі, яка може бути використана для розпізнавання.

У разі використання двох рознесених на місцевості РЛС при обробці відбитих від РЛЦ сигналів, в кожній з них, можливо також проведення спільної кореляційної обробки. У цьому випадку може бути отримана взаємна кореляційна функція (ВКФ) огинаючих квадратів амплітуд сигналів, прийнятих кожною РЛС.

З проведеного аналізу ВКФ огинаючих квадратів амплітуд відбитих від цілі сигналів, що приймаються двома рознесеними РЛС, видно, що положення максимуму цієї функції визначається швидкістю відносного обертання цілі (Ω) і кутом розносу РЛС (β) [11].

Виходячи з цього випливає, що

$$\Omega = \frac{\beta}{\tau_{\max}}, \quad (5)$$

де $\tau_{\max}$ – часове положення максимуму нормованої ВКФ огинаючих квадратів амплітуд відбитих ціллю сигналів.

Можливість визначення швидкості відносного обертання цілі заснована на використанні виразу (5). Суть його полягає у визначенні ВКФ огинаючих

квадратів амплітуд сигналів, прийнятих в двох рознесених РЛС, в знаходженні часового положення максимуму цієї функції і в розрахунку значення кута розносу РЛС. Потім відповідно до вираження (5) визначається величина швидкості відносного обертання цілі.

Слід зазначити, що при деяких ракурсах спостереження реалізації амплітуд відбитих від цілі сигналів являють собою нестационарний випадковий процес (їх середні значення на інтервалі визначення ВКФ змінюється).

Для підтвердження цього, як приклад, на рис. 4 приведена залежність діаграми зворотного вторинного випромінювання цілі у вигляді конуса (з діаметром підстави 150 мм. і висотою 300 мм) в секторі спостереження $\Theta = (0 \dots 90)^\circ$ при довжині хвилі $\lambda = 3,3$ см. на основній горизонтальній поляризації [9]. Тому при розрахунках ВКФ вихідні реалізації квадратів амплітуд відбитих сигналів необхідно призводити до нульового середнього.

Рис. 4. Діаграма зворотного вторинного випромінювання конуса
Джерело: розроблено автором.

Розрахунок кута розносу РЛС (β) може бути здійснений, наприклад, у відповідності з наступним виразом:

$$\beta = \arccos \left\{ \frac{t_{31}^2 + t_{32}^2 - 4t_{36}^2}{t_{31} \cdot t_{32}} \right\}, \quad (6)$$

де t_{31} , t_{32} – часи запізнення сигналу при проходженні ними відстані відповідно від РЛС1 і РЛС2 до цілі і назад;

t_{36} – час запізнення сигналу при проходженні їм відстані від РЛС1 до РЛС2 і назад.

Напруги, пропорційні t_{31} і t_{32} , можуть визначатися безпосередньо в кожній РЛС. У зв'язку з рухом цілі напруги, пропорційні цим часам, повинні постійно уточнюватися. За цими даними значення кута розносу РЛС також постійно уточнюється.

Напруга, пропорційна t_{36} , може бути виміряна після заняття позицій РЛС шляхом розвороту антен цих РЛС в напрямку один одного.

Однак, це вимір може проводитися тільки тоді, коли дозволяють умови місцевості. Крім того, можливо розрахувати цю напругу за вимірюваннями, що проводяться за допомогою апаратури топогеодезичної прив'язки.

Розглянемо можливість визначення швидкості відносного обертання цілі за експериментальними даними.

Для експериментальної перевірки як приклад, скористаємося реалізацією діаграми зворотного вторинного випромінювання крилатої ракети AGM-69 SRAM [9].

При проведенні розрахунків нормованої ВКФ огинаючих квадратів амплітуд відбитих сигналів вважаємо, що цілі спостерігається системою рознесених на кут $\beta = 10^\circ$ РЛС. Дальність до цілі $D_{ц} = 70$ км. Швидкість польоту AGM – 69 SRAM складає 1333 м/с. Вважаємо також, що вона рухається під кутом $\theta = 30^\circ$ щодо лінії візування РЛС1.

З урахуванням кута розносу $\beta = 10^\circ$, кут спостереження цілі для другої РЛС становить $\theta = 20^\circ$.

У цьому випадку справжнє значення відносної швидкості обертання становить $\Omega = 0,862$ град./с.

В результаті розрахунків нормованих ВКФ огинаючих квадратів амплітуд відбитих сигналів, що приймаються двома рознесеними на місцевості РЛС, отримані графіки даних ВКФ і оцінки значень тимчасових положень їх максимумів.

На рис. 5 наведено графік нормованої ВКФ при відсутності шуму. З аналізу даного графіка випливає висновок про те, що для даних умов спостереження цілі тимчасове положення максимуму нормованої ВКФ $\tau_{\max}$ становить 11,62 с. Використовуючи вираз (5) розрахункове значення швидкості обертання цілі AGM-69 в цьому випадку становить $\Omega=0,86$ град/с, що практично збігається з вищенаведеними розрахунками. На рис. 6 наведено графік нормованої ВКФ при $q = 14$ дБ. З аналізу графіка, наведеного на рис. 6, випливає висновок про те, що в результаті впливу шуму максимум нормованої ВКФ зміщується ($\tau_{\max} = 12,99$ с). Зсув максимуму нормованої ВКФ призводить до помилок визначення її максимуму і, відповідно, до помилок визначення швидкості обертання цілі. Відносна помилка $\delta\tau_{\max}$ в цьому випадку становить близько 12%.

Як показали проведені розрахунки, запропонована можливість визначення швидкості відносного обертання дозволяє отримувати оцінки даної швидкості при $q = (18 \dots 20)$ дБ і більше. У цьому випадку вплив шумів практично не впливає на точність визначення даної характеристики цілі.

Рис. 5. Графік нормованої ВКФ при відсутності шуму
Джерело: розроблено автором.

Рис. 6. Графік нормованої ВКФ при відношенні
сигнал/шум 14 дБ
Джерело: розроблено автором.

Висновки

Таким чином, розглянуті можливості обробки відбитого від цілі БЧС, дозволяють отримати в радіолокаційних станціях з рознесеним прийомом сукупність геометричних характеристик цілі, які можуть бути використані в якості ознак розпізнавання.

Перевірка можливості отримання нормованої ВКФ, визначення тимчасового положення її максимуму і, відповідно, визначення швидкості обертання цілі за експериментальними даними підтвердила можливість отримання даної ознаки цілі.

Все вищевикладене показує необхідність розробки методів визначення ознак розпізнавання на основі використання геометричних характеристик, характеристики форми цілей і параметрів їх обертання навколо центру мас, з урахуванням характеристик багаточастотних сигналів і особливостей багатопозиційних радіолокаційних станцій.

Список літератури

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. Черняк В.С. Многопозиционные радиолокационные станции и системы / В.С. Черняк, Л.П. Заславский, Л.В. Осипов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. – № 1. – С. 9-69.
3. Аверьянов В.Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы / В.Я. Аверьянов. – Мн.: Наука и техника, 1978. – 184 с.
4. Кондратьев В.С. Многопозиционные радиотехнические системы / В.С. Кондратьев, А.Ф. Котов, Л.Н. Марков; под общ. ред. В.В. Цветкова. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.
5. The development of a true multi-radar tracking system / J. Bonnefooy, M. Borsu, G. Maignan, J.T. Storey // Proc. Internat. Conf. on Radar (SEE). – Paris, December 1978. – P. 109-117.
6. Болдин В.Л. Многопозиционные радиоэлектронные системы / В.Л. Болдин // Итоги науки и техники. – 1990. – № 4. С. 89-94.
7. Седышев Ю.Н. Бистатистические шумовые радиолокаторы с когерентной пространственно-временной обработкой эхо-сигналов и активных помех / Ю.Н. Седышев, П.Ю. Седышев, В.А. Тютюнник // Прикладная радиоэлектроника. – 2002. – № 1(1). – С. 187-194.
8. Вишин Г.М. Многочастотная радиолокация / Г.М. Вишин. – М.: Воениздат, 1973. – 92 с.
9. Радиолокационные признаки распознавания при многопозиционной локации: монография / Е. Казаков, В. Бзот, А. Казаков, В. Павлов. – Х.: АСЕ СПДФО Сторожук А.П., 2005. – 188 с.
10. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я.Д. Ширман, С.А. Горшков, С.П. Лещенко, Г.Д. Братченко // Зарубежная радиоэлектроника. – 1996. – № 11. – С. 3-64.
11. Казаков Е.Л. Корреляционная обработка некоординатной информации о радиолокационной цели, наблюдаемой системой разнесенных РЛС / Е.Л. Казаков, В.Б. Бзот // Збірник наукових праць Харківського військового університету. – 2001. – № 4(34). – С. 83-85.
12. Казаков Е.Л. Признаки распознавания радиолокационных целей при многопозиционной локации / Е.Л. Казаков, В.Б. Бзот, А.Е. Казаков // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – № 1 – С. 251-253.

Надійшла до редколегії 01.09.2020

Схвалена до друку 13.10.2020

Відомості про автора:

Казаков Олександр Євгенович

кандидат технічних наук старший науковий співробітник
старший науковий співробітник
Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7588-1576>

Information about the author:

Oleksandr Kazakov

Candidate of Technical Sciences Senior Research
Senior Research Associate
of Vasily Karazin Kharkiv National University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7588-1576>

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПРИЗНАКОВ РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МНОГОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ**

А.Е. Казаков

Изложены возможности получения признаков распознавания радиолокационных целей по сигнальной информации многопозиционных РЛС. В качестве признаков распознавания основное внимание уделялось таким признакам, как геометрические характеристики и скорости относительного вращения цели. Рассмотрены возможности получения признаков распознавания при использовании многочастотных сигналов при проведении совместной корреляционной обработки этих сигналов.

Ключевые слова: радиолокационная цель, многопозиционная РЛС, многочастотный сигнал, признаки распознавания, взаимная корреляционная функция.

**ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF OBTAINING SIGNS OF RECOGNITION OF RADAR TARGETS
WHEN USING MULTI-FREQUENCY SIGNALS IN MULTIPosition RADARS**

O. Kazakov

The subject of the article is the possibility of obtaining information about the geometrical characteristics of a target by a reflected multi frequency signal received in the main radar and at remote points. The goal is to study the possibilities of obtaining information about the geometric characteristics of the target by the reflected multi frequency signal received in the combined with the main radar and remote points; analysis of information about the signs of target recognition, namely, the geometric characteristics of the target, the parameters of its rotation around the center of mass according to the cross-correlation function of the envelopes of the amplitudes of the signals received in the multi-position radar. Tasks: increasing the number of received recognition signs in a multi-position radar. The methods used are: mathematical modeling of the possibility of obtaining signs of recognition of goals. The following results were obtained. In general, the possibilities of obtaining geometric characteristics and the speed of relative rotation of the target, which can be used as recognition features, are evaluated. The possibility of obtaining a normalized cross-correlation function, determining the time position of its maximum and, accordingly, determining the speed of rotation of the target according to experimental data. Conclusions. The scientific novelty of the results obtained is as follows: the possibilities of processing the multi frequency signal reflected from the target are considered, which make it possible to obtain in the radar with diversity reception a set of geometric characteristics of the target that can be used as recognition signs; the possibility of determining the speed of relative rotation of the target by the time position of the maximum of the normalized cross-correlation function obtained in a multi-position radar during processing of the envelope of the amplitudes of the received signals was checked.

Keywords: radar target, multi-position radar, multi-frequency signal, recognition signs, cross-correlation function.