

УДК 621.396.969.181.24

А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ І ВИМІРУ РАДІАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ЦІЛІ В ОГЛЯДОВИХ РЛС

Запропоновані й досліджені алгоритми виявлення відбитого від цілі широкосмугового сигналу, що забезпечує розрізнення окремих елементів цілі по дальності й вимірювання радіальної швидкості цілі на основі аналізу взаємної часової затримки суміжних луна-сигналів і закону зміни значень коефіцієнтів взаємної коваріації, відліків у сусідніх імпульсах пачки. Отримано оцінки залежності середньоквадратичного відхилення, помилки вимірювання радіальної швидкості цілі, від відношення сигнал-шум і типу цілі, що супроводжується.

Ключові слова: виявлення сигналів, вимір координат, широкосмугові сигнали, некогерентне накопичення, оглядова РЛС, радіальна швидкість цілі.

Вступ

Постановка проблеми. Оглядові РЛС, як правило, вимірюють тільки дальність, азимут і кут місця цілі. Існуючі методи обробки сигналів не дозволяють одержати однозначну інформацію про радіальну швидкість цілі в імпульсних оглядових РЛС із використанням вузькосмугових сигналів та проведення доплеровської фільтрації в таких РЛС, оцінки швидкості здійснюються шляхом траєкторної обробки за декілька обертів антени [1]. Пропонується рішення проблеми з використанням широкосмугових сигналів, які забезпечують розрізнення елементів повітряної цілі по дальності.

Аналіз літератури. Згідно [2] у США границя між смугами частот широкосмугових (ШП) і над широкосмугових (СШП) сигналів прийнята рівною 500 МГц. Однак РЛ сигнали зі смугою 100-500 МГц у задачах, що вирішують оглядові РЛС, можуть бути названі як ШП, так і СШП, у порівнянні з використовуваними в цей час сигналами зі смугою 0,5-5 МГц. В [3] показано, що широкосмугові сигнали, що забезпечують розрізнення елементів цілі по дальності та отримувати їх дальнісні портрети (ДП) можуть використовуватися в інтересах виявлення цілей без переходу до зондування вузькосмуговими сигналами. А також пояснено, що в режимі виявлення широкосмугові сигнали можуть не тільки не уступати вузькосмуговим сигналам, але й перевершувати їх, особливо при вимогах високоякісного виявлення малорозмірних цілей. Відсутність апріорної інформації про форму й тривалість прийнятого широкосмугового сигналу не дозволяє застосовувати для його виявлення «класичні» алгоритми. Алгоритми, запропоновані в [3,4] не здійснюють накопичення пачки відбитих від цілі широкосмугових сигналів, що приводить до енергетичних втрат, а також не враховують вплив руху цілі. Таким чином, представляється задача синтезу алгоритму виявлення сигналу з невідомими параметрами. Сигнал представлений єдиним відомим пара-

метром – періодом повторення імпульсів у пачці, і апріорними даними: довжиною дальнісного портрету, що залежить від лінійних розмірів цілі, кількістю імпульсів у пачці, що залежить від відношення сигнал-шум. Передбачається, що дальнісні портрети корельовані в межах відбитої пачки. Через малу тривалість дальнісних портретів та наявність випадкової початкової фази пропонується їхнє некогерентне накопичення в межах апріорного числа імпульсів у пачці, з урахуванням тимчасової затримки, що виникає внаслідок руху цілі. Тобто робити вирівнювання за часом дальнісні портрети. В роботі запропоновано алгоритми виявлення відбитого від цілі широкосмугового сигналу й вимірювання радіальної швидкості цілі на основі аналізу, взаємної часової затримки суміжних відбитих сигналів, і закону зміни значень коефіцієнтів взаємної коваріації відліків, у сусідніх імпульсах пачки.

Основна частина

При дослідженні питань оптимальної обробки відбитого від цілі широкосмугового сигналу й оцінювання можливості вимірювання радіальної швидкості цілі, використовувалися методи моделювання із застосуванням програмного пакету по моделюванню електродинаміки вторинного випромінювання BSS (Back Scattering Simulation) [5]. В якому основою для отримання ДП використовується метод спрощених елементів. При цьому забезпечується відповідність експерименту ДП цілей, що моделюються для різних типів цілей, їх орієнтацій у просторі, різних спектрів частот і поляризацій зондувальних сигналів, значно краще, чим при використанні абстрактних статистичних моделей.

Відбитий широкосмуговий сигнал цілі можна представити у вигляді матриці комплексних відліків:

$$\beta \quad D \quad \begin{pmatrix} \dot{a}_{11} & \dots & \dot{a}_{1M} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dot{a}_{N1} & \dots & \dot{a}_{NM} \end{pmatrix},$$

де N – кількість дискретних відліків по дальності;

M – кількість імпульсів у пачці за рівнем половинної потужності діаграми спрямованості антени.

Кількість дискретних відліків по дальності розраховується по формулі:

$$N = \frac{S}{\Delta d} + 1, \quad (1)$$

де S – розмір вікна по дальності;

Δd – величина дискрети дальності.

Розмір вікна по дальності визначається виходячи з максимального розміру цілі і її можливого зсуву за тривалість пачки при максимальній радіальній швидкості польоту:

$$S = (l_{\max} + 2 * V_{p\max} * T_{\Pi}). \quad (2)$$

Величина дискрети розраховується з урахуванням вимог теореми Котельникова:

$$\Delta d \leq c/2\Pi, \quad (3)$$

де c – швидкість світла; Π – ширина спектра сигналу.

Стовпець матриці являє собою вибірку дискрет по дальності за один період випромінювання або дальнісний портрет цілі. Приклад пачки із чотирьох дальнісних портретів моделі турбореактивного літака B-52, що рухається з радіальною швидкістю 600 м/с, розрахований для ЛЧМ сигналу із шириною спектра 150 МГц, та частотою повторення імпульсів 800 Гц наведений на рис. 1.

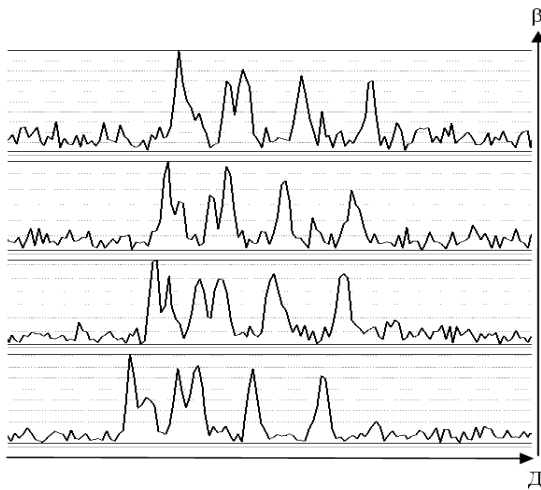


Рис. 1. Пачка із чотирьох дальностних портретів цілі

Алгоритм некогерентного накопичення пачки ширококутних сигналів полягає в наступному. Розраховуються автокореляційні функції сусідніх дальнісних портретів, де опорним є сигнал, отриманий на попереднім зондуванні затриманий на період повторення:

$$K_m = \max_i \sum_{n=1}^{+L/2} \sum_{n=1}^N |\dot{A}_{mn}| * |\dot{A}_{(m+1)(n+1)}|, \quad (4)$$

де максимальна величина кількості дискрет, на які

зміщується прийнятий сигнал, щодо опорного L залежить від максимальної радіальної швидкості цілі, періоду повторення й тривалості дискрети дальності:

$$L = (l_{\max} + 2 * V_{p\max} * T_{\Pi}) / \Delta d. \quad (5)$$

У результаті обчислень у кожному «вікні» по азимуті одержуємо вектор $(M-1)$ значень:

$$K_m = |K_1, K_2 \dots K_{M-1}|. \quad (6)$$

Далі робимо порівняння з порогом величини K^* , яка розраховується по формулі:

$$K_m^* = \sum_{j=0}^{M-1} C_j * K_{mj}, \quad (7)$$

де C_j – нормувальні коефіцієнти, що відповідають формі діаграми спрямованості. Величина порога обрана в результаті статистичних випробувань і забезпечує ймовірність хибної тривоги $F=10^{-4}$. При перевищенні величини порога приймаємо рішення про виявлення початку пачки й робимо запам'ятовування дальнісних портретів. Рішення про кінець пачки приймаємо за першим значенням K^* менше порога. Приклад розрахованих значень K^* наведений на рис. 2.

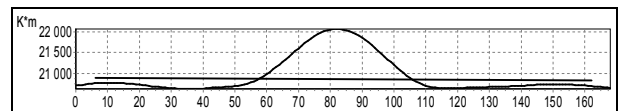


Рис. 2. Графік залежності K^* від числа зондувань m

Нижче представлений графік отриманої в результаті моделювання залежності ймовірності виявлення від відношення сигнал-шум для трьох типів цілей, що мають різну довжину, у всьому діапазоні ракурсів і радіальних швидкостей. Таким чином, виявлення пачки імпульсів ширококутвого сигналу з ймовірністю 0,9 можливо при відношенні сигнал-шум від 15 – 16 дБ для тактичних винищувачів і важких бомбардувальників, а для КР – від 18 дБ.

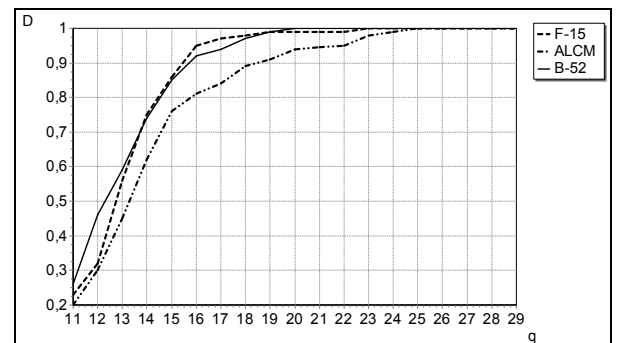


Рис. 3. Графік залежності ймовірності виявлення від відношення сигнал-шум

Метод одержання оцінки радіальної швидкості цілі реалізується на основі того, що тимчасова затримка ДП у пачці має лінійний зв'язок з радіальною

швидкістю цілі, а використання широкосмугових сигналів дозволяють цю затримку вимірювати. Для цього, виявляється центральний ДП $\hat{A}_{\frac{M}{2}n}$ прийнятої пачки за максимальним значенням K_m^* . Розраховуються автокореляційні функції ДП виявленої пачки, де опорним є центральний дальнісний портрет:

$$K'_m = \max_i \sum_{i=-L/2}^{+L/2} \sum_{n=1}^N \left| \hat{A}_{\frac{M}{2}n} \right| * \left| \hat{A}_{(m)(n+i)} \right|. \quad (8)$$

Максимальна величина кількості дискрет, на які зміщується прийнятий сигнал, щодо опорного L залежить від максимально можливої радіальної швидкості цілі, періоду повторення, кількості імпульсів у пачці й тривалості дискрети дальності:

$$L = M * (l_{\max} + 2 * V_{p\max} * T_n) / \Delta_d. \quad (9)$$

Знаходимо вектор значень зсувів ДП щодо центрального:

$$\Delta L_m = |\Delta L_1, \Delta L_2 \dots \Delta L_{M-1}|, \quad (10)$$

при яких автокореляційні функції досягають максимальних значень. Значення вектора ΔL_m згладжуємо методом найменших квадратів і розраховуємо коефіцієнти a й b для апроксимації закону залежності ΔL_m від m лінійною функцією:

$$\Delta l = a * m + b. \quad (11)$$

Лінійна ділянка залежності (рис. 4) показує, наскільки дискрет Δl відбувається затримка цілі по дальності залежно від значення швидкості й номеру імпульсу пачки m .

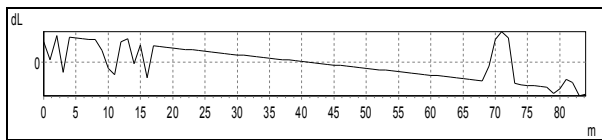


Рис. 4. Графік залежності ΔL_m від числа зондувань m

Оцінка швидкості розраховується по формулі:

$$\hat{V}_p = (\Delta l * \Delta_d) / m * T_n, \quad (12)$$

де T_n – період повторення імпульсів.

Зниження відношення сигнал-шум призводить до укорочування лінійної ділянки вимірювання через зменшення кількості дискрет, що приводить до збільшення помилки вимірювання. Приклади залежності ΔL_m від m для різних відношень $c/\text{ш}$ показані на рис. 5. При малих значеннях сигнал-шум алгоритм не дозволяє робити оцінку радіальної швидкості через відсутність лінійної ділянки вектора ΔL_m . Для реалізації даного методу необхідно не менш трьох значень ΔL_m пов'язаних між собою лінійною залежністю. Тому при відсутності лінійної ділянки, вимірювання швидкості стає неможливим.

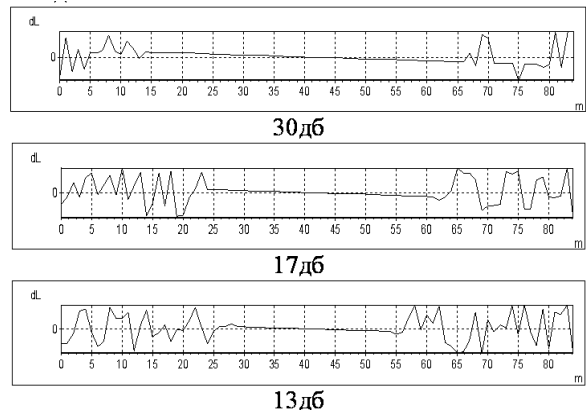


Рис. 5. Графік залежності ΔL_m від числа зондувань m для різних відношень $c/\text{ш}$

Приклад залежності ΔL_m від m для відношення $c/\text{ш}$ коли лінійна ділянка відсутня, наведений на рис. 6.

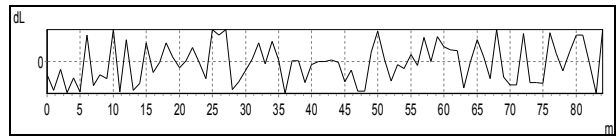


Рис. 6. Графік залежності ΔL_m від числа зондувань m для відношення $c/\text{ш}$, коли лінійна ділянка відсутня

На рис. 7 представлена отримана шляхом моделювання залежність імовірності можливості вимірювання радіальної швидкості цілі від відношення сигнал-шум. Як видно, потрібне відношення $c/\text{ш}$ для проведення вимірювань радіальної швидкості суттєво залежить від типу цілі й становить величину 12 – 17 дБ.

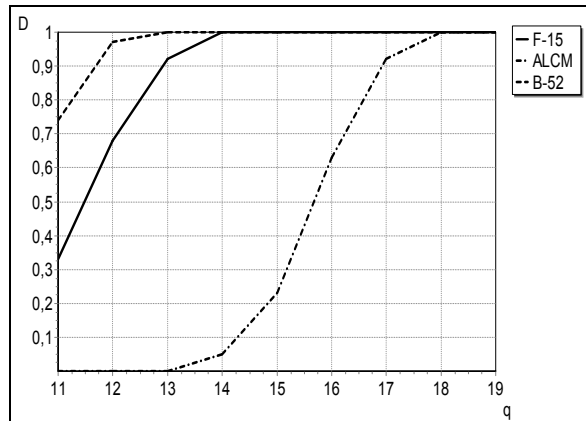


Рис. 7. Графік залежність імовірності можливості вимірювання радіальної швидкості цілі від відношення сигнал-шум

На рис. 8 представлений отриманий шляхом моделювання графік залежності середньоквадратичної помилки вимірювання радіальної швидкості від відношення сигнал-шум. Як видно з графіку, при відношенні $c/\text{ш}$ 13 – 17 дБ (в залежності від типу цілі) забезпечується точність виміру радіальної швидкості не гірше 20 м/с.

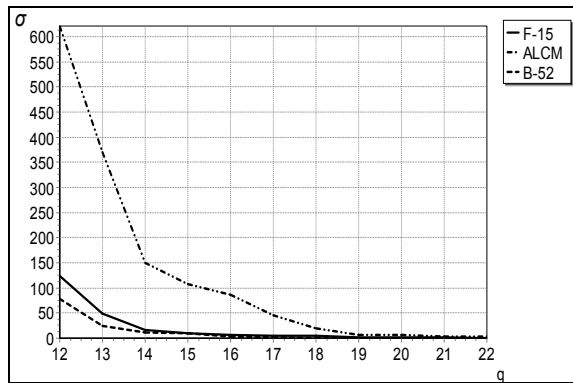


Рис. 8. Графік залежності середньоквадратичної помилки вимірювання радіальної швидкості від відношення сигнал-шум

Висновки

Застосування ширококугових сигналів в інтегресах виявлення цілей виявляє перевагу використанню вузькосмугових сигналів при підвищених вимогах до ймовірності правильного виявлення $D > 0.7$, тобто для забезпечення вимог якісного виявлення й вимірювання. В оглядових РЛС оцінка швидкості може бути отримана після виявлення траєкторії при одержанні не менш двох оцінок дальності на двох обертах антени. Запропонований метод вимірювання радіальної швидкості цілі з використанням ширококугових сигналів дозволяє одержати оцінку радіальної швидкості цілі вже при одержанні першої пачки відбитого сигналу, що дозволяє поліпшити методи вторинної обробки на етапах, як виявлення, так і супроводу траєкторій цілей. Додаткова інформація про радіальну швидкість цілі може дозволити більше точно оцінювати параметри траєкторії цілі, особливо при інтенсивному маневруванні цілі. Крім того інформація про радіальну швидкість цілі може

бути використана для зменшення невизначеності при встановленні кореляційних зв'язків між оцінками й траєкторіями в складних ситуаціях.

Список літератури

1. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации Сопровождение целей: пер. с англ. / А. Фарина, Ф. Студер. – М., 1993. – С. 16-19.
2. Electronic Code of Federal Regulation, Part 15, Subpart F. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fcc.gov/omd/prd/docs/3060-1015/3060-1015-05.doc>.
3. Особенности обнаружения радиолокационных целей при широкой полосе частот зондирующих сигналов // Прикладная радиоэлектроника. – X.: АНПРЭ, 2006. – № 4. – С. 528-535.
4. Shirman Ya.D. (ed.), Gorshkov S.A., Leshchenko S.P., Orlenko V.M., Sedyshev S.Yu., Sukharevsky O.I. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection and Tracking, Norwood, MA: Artech House, 2002.
5. Radar Target Backscattering Simulation Software and User's Manual / S.A. Gorshkov, S.P. Leshchenko, V.M. Orlenko, S.Yu. Sedyshev, Y.D. Shirman. – Boston-London: Artech House, 2002. – 71 p.
6. Виявлення повітряних цілей радіолокаторами з ширококуговими зондуючими сигналами // Зб. наук. пр. ЦНДІ ЗСУ. – 2001. – Вип. 10. – С. 93-102.
7. Возможности широкополосных РЛС по измерению координат и сопровождению воздушных целей // Зб. наук. пр. ХВУ. – 2002. – Вип. 1(39). – С. 90-92.
8. Челпанов А.С. Исследование приемно-индикаторного тракта широкополосной радиолокационной станции распознавания целей: дисс. ... канд. тех. наук. – X., АРТА, 1962. – 215 с.
9. Астанин Л.Ю. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений / Л.Ю. Астанин, А.А. Костылев. – М.: Радио и связь, 1989. – 234 с.

Надійшла до редколегії 22.08.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.І. Сухаревський, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ И ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ЦЕЛИ В ОБЗОРНЫХ РЛС

А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко

Предложены и исследованы алгоритмы обнаружения отраженного от цели широкополосного сигнала и измерения радиальной скорости цели на основе анализа взаимной временной задержки смежных отраженных сигналов и закона изменения значений коэффициентов взаимной ковариации, отсчетов в соседних импульсах пачки. Получены оценки зависимости среднеквадратического отклонения, ошибки измерения радиальной скорости цели, от отношения сигнал-шум и типа сопровождаемой цели.

Ключевые слова: обнаружение сигналов, измерение координат, широкополосные сигналы, некогерентное накопление, обзорная РЛС, радиальная скорость цели.

METHOD OF BROAD BAND SIGNALS DETECTION AND MEASUREMENT OF TARGET RADIAL VELOCITY IN SURVEILLANCE RADAR

A.L. Kovtunov, S.P. Leshenko

Algorithms for detecting the broadband signal with is reflected from the target and for measuring the target radial velocity are proposed and researched, these algorithms are based on the analysis of the mutual time delay of reflected signals and the rules in value changes of coefficients of mutual covariance also on the reading in pack adjacent impulses. Estimates of standard deviation and errors of target radial velocity measurement are calculated depending on the signal-noise ratio and the type of the followed target.

Keywords: signals detection, coordinates measurement, broadband signal, incoherent accumulation, surveillance radar, target radial velocity.