

УДК 621.396.96

Е.Л. Казаков<sup>1</sup>, А.В. Коломийцев<sup>1</sup>, С.И. Клевец<sup>1</sup>, В.В. Посохов<sup>2</sup><sup>1</sup> Харьковський університет Воздушних Сил імені Івана Кожедуба, Харків<sup>2</sup> Национальная академия Национальной гвардии Украины, Харьков

## МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕЛИ ПО ЭЛЕМЕНТАМ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МАТРИЦЫ РАССЕЯНИЯ В СИСТЕМЕ РАЗНЕСЕННЫХ РЛС

Разработан метод спектрального анализа определения геометрических характеристик цели по элементам поляризационной матрицы рассеяния в системе разнесенных радиолокационных станций (РЛС) и раскрыт принцип его работы. Получено аналитическое выражение для энергетического спектра флуктуаций интенсивностей отраженных от цели сигналов, принятых на основной и кроссовой поляризациях в разнесенных РЛС. Показано, что при применении процедуры спектрального анализа и измерения интенсивностей данных сигналов может быть получена информация о распределении в поперечном направлении всех и деполаризующих элементов цели.

**Ключевые слова:** радиолокационный сигнал, поляризационная матрица рассеяния цели, отражающие элементы цели, спектральный анализ, некогерентный портрет цели в поперечном направлении.

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ литературы.

В настоящее время в научно-технической литературе большое внимание уделяется разработке методов определения геометрических характеристик цели по отраженному радиолокационному сигналу.

В частности, данные вопросы подробно рассмотрены в работах [1 – 3] применительно к однопозиционным РЛС, где также рассмотрены методы определения геометрических размеров цели при обработке отраженных сигналов в системе разнесенных на местности РЛС. Однако эти методы предусматривали проведение корреляционной обработки огибающих амплитуд узкополосных сигналов, принимаемых разнесенными РЛС [4, 5]. Использование данных методов требует значительного времени наблюдения за целью и сопровождается целым рядом ошибок измерения.

Кроме того, рассмотренные методы не позволяют получать информацию о расположении на цели отдельных отражающих элементов. При этом, на использование методов для определения геометрических характеристик целей сигналов различной поляризации внимания не уделялось.

Поэтому использование метода спектрального анализа огибающих амплитуд отраженных сигналов в многопозиционной РЛС для определения геометрических характеристик цели является актуальной научно-технической задачей.

**Цель статьи.** Разработка метода спектрального анализа огибающих амплитуд отраженных сигналов с учетом поляризации в многопозиционной РЛС для определения геометрических характеристик наблюдаемой цели.

### Основной материал

Рассмотрим многопозиционную (МП) РЛС, состоящую из  $K$  РЛС, которые излучают и принимают сигналы различных поляризаций (рис. 1).

В этом случае комплексные амплитуды элементов поляризационных матриц рассеяния (ПМР) цели, измеренные в данной системе РЛС, могут быть записаны с использованием математической модели цели [3] в виде:

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_{ij}^{(11)}}(\beta) \cdot e^{j\phi_{ij}}(\beta) &= \sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_{ijn}^{(11)}} \exp\{j\phi_{ijn}\} \times \\ &\times \exp\{-j2m\rho_n \cos(\beta - \varepsilon_n)\} = \\ &= \sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_{ijn}^{(11)}} \exp\{j\phi_{ijn}\} \times \\ &\times \exp\{-j2m(x_n \cos\beta + y_n \sin\beta)\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $m = 2\pi / \lambda$  – волновое число;  $x_n = \rho_n \cos \varepsilon_n$  – координата  $n$ -го отражателя цели в продольном направлении (вдоль оси  $X$ );  $y_n = \rho_n \sin \varepsilon_n$  – координата  $n$ -го отражателя цели в поперечном направлении (вдоль оси  $Y$ ).

В (1) и в дальнейшем будем считать, что  $\sqrt{\sigma_{ij}^{(kl)}} = S_{ij}^{(kl)}$  – модуль комплексного коэффициента отражения цели при излучении сигнала 1-й РЛС на  $j$ -й поляризации и его приеме  $k$ -й приемной позицией на  $i$ -й поляризации.

Если МП РЛС содержит одну передающую, а остальные приемные позиции, то в этом случае комплексные элементы ПМР будут описываться выражением:

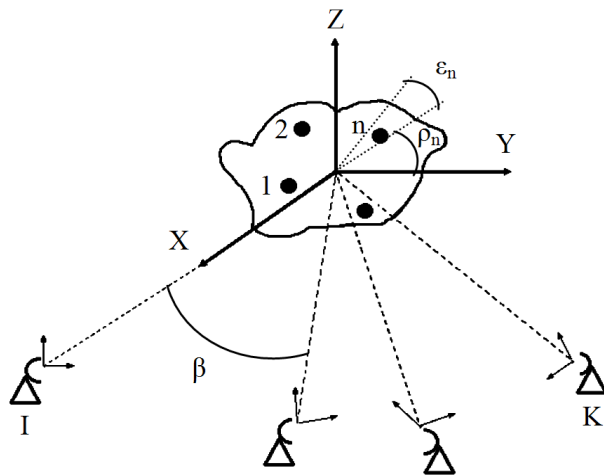


Рис. 1. Размещение отражателей цели в МП РЛС

$$\sqrt{\sigma_{ij}^{(kl)}}(\beta) \cdot e^{j\phi_{ij}^{(kl)}}(\beta) = \sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_{ijn}^{(kl)}} \exp\{j\phi_{ijn}^{(kl)}\} \times \exp\{-j m \rho_n \cos(\epsilon_n + \beta) + \cos \epsilon_n\} = \sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_{ijn}^{(kl)}} \times \exp\{j\phi_{ijn}^{(kl)}\} \cdot \exp\{-j 2 m_1 (x_n \cos \beta + y_n \sin \beta)\},$$

где  $m_1 = m \cos \beta / 2$  и при этом будем учитывать, что ось X совпадает с линией визирования приемопередающей позиции (рис. 1).

Если предположить, что измерения комплексных амплитуд производятся в небольшом секторе углов  $\beta$ , то можно считать, что  $\cos \beta \approx 1$ , а  $\sin \beta \approx \beta$ . С учетом сформулированных предположений, выражения (1) и (2) примут вид:

$$\sqrt{\sigma_{ij}^{(11)}}(\beta) \cdot e^{j\phi_{ij}^{(11)}}(\beta) = \sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_{ijn}^{(11)}} \times \exp\{j\phi_{ijn}^{(11)}\} \exp\{-j 2 m y_n \beta\};$$

$$\sqrt{\sigma_{ij}^{(kl)}}(\beta) \cdot e^{j\phi_{ij}^{(kl)}}(\beta) = \sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_{ijn}^{(kl)}} \times \exp\{j\phi_{ijn}^{(kl)}\} \exp\{-j m y_n \beta\},$$

где  $\phi_{ijn}^{(11)} = \phi_{ijn}^{(11)} + 2 m x_n$ ;  $\phi_{ijn}^{(kl)} = \phi_{ijn}^{(kl)} + 2 m x_n$ .

Интенсивность сигналов, принимаемых МП РЛС, будут пропорциональны квадратам амплитуд элементов ПМР, которые могут быть найдены с помощью выражений (3) и (4). Например, при использовании выражения (3) можно получить:

$$\sigma_{ij}^{(11)}(\beta) \approx \sum_{n=1}^N \sigma_{ijn}^{(11)} + 2 \operatorname{Re} \left[ \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{l=(n+1)}^N \sqrt{\sigma_{ijn}^{(11)} \sigma_{ijl}^{(11)}} \times \exp\left\{j \left( \phi_{ijn}^{(11)} - \phi_{ijl}^{(11)} \right)\right\} \exp\{-j 2 m (y_l - y_n) \beta\} \right].$$

Аналогичное аналитическое выражение можно получить воспользовавшись выражением (4).

Исходя из выражения (5) можно утверждать, что результаты измерений сигналов в МП РЛС пропорциональны суммарной эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) всех отражающих элементов цели, а также сумме гармоник, период которых определяется разностями координат в поперечном направлении, а амплитуды сигналов, отраженных рассеивателями цели, пропорциональны произведению амплитудных элементов.

Применяя к результатам измерений интенсивностей сигналов, принятых МП РЛС на взаимно-ортогональных поляризациях, методом спектрального анализа, можно определить характеристики цели в поперечном направлении.

В дальнейшем энергетический спектр флуктуаций интенсивностей сигналов, принятых в МП РЛС, будем называть некогерентным «портретом» (НКП) цели в поперечном направлении. При этом НКП цели в поперечном направлении, найденный по измерениям интенсивностей сигнала на основной поляризации, будет характеризовать распределение всех, а на крессовой – только деполаризующих рассеивателей в поперечном направлении.

Однако, поскольку измерения цели на крессовой поляризации производятся при отношении сигнал/шум на (6 – 10) дБ меньше, чем на основной [6, 7], то информация о геометрических характеристиках цели, получаемая на крессовой поляризации будет с большими ошибками.

Для уменьшения ошибок за счет низкого отношения сигнал/шум, при определении поперечных размеров между деполаризующими рассеивателями цели, можно использовать совместно измерения амплитуд и разности фаз сигналов, принятых в каждой приемной позиции на взаимно-ортогональных поляризациях. В данном случае в каждой приемной позиции будут измеряться комплексные амплитуды сигналов, которые получены в результате перемножения комплексных амплитуд сигналов, принятых на взаимно-ортогональных поляризациях. Эти измерения будут пропорциональны произведению комплексных элементов ПМР, характеризующих рассеивающие свойства цели на основной и крессовой поляризациях. Такое произведение может быть найдено при использовании выражений (3) или (4). Например, воспользовавшись выражением (3) можно получить:

$$\sqrt{\sigma_{ij}^{(11)}(\beta) \sigma_{ii}^{(11)}(\beta)} \cdot e^{j(\phi_{ij}^{(11)}(\beta) - \phi_{ii}^{(11)}(\beta))} = \sum_{n=1}^{N_1} \sum_{l=1}^N \sqrt{\sigma_{ijn}^{(11)} \sigma_{ijl}^{(11)}} \times \exp\left\{j \left( \phi_{ijn}^{(11)} - \phi_{ijl}^{(11)} \right)\right\} \exp\{j 2 m (y_n - y_l) \beta\}.$$

Аналогичное выражение можно получить воспользовавшись выражением (4).

В выражении (6)  $N$  обозначает количество всех рассеивателей цели, а  $N_1$  – только деполаризующих.

Из выражения (6) следует, что измерения, полученные в результате перемножения комплексных амплитуд сигналов на взаимно-ортогональных поляризациях, принятых в каждой позиции МП РЛС, пропорциональны сумме комплексных гармоник. Период гармоник определяется разностными координатами деполаризующих и недеполаризующих рассеивателей, а амплитуда равна произведению амплитудных элементов ПМР, характеризующих преобразование поляризации при отражении.

Из вышеизложенного следует, что применяя процедуру спектрального анализа к таким измерениям, можно получить информацию о поперечных расстояниях между парами всех рассеивателей цели, а также между парами деполаризующих и тех и других рассеивателей одновременно.

## Выводы

Таким образом, разработан метод спектрального анализа определения геометрических характеристик цели по элементам поляризационной матрицы рассеяния в системе разнесенных радиолокационных станций.

При необходимости определения распределения рассеивателей цели, с учетом их деполаризующих свойств, процедуру спектрального анализа необходимо применять к комплексным измерениям, которые получены в результате перемножения комплексных амплитуд сигналов, принятых на взаимно-ортогональных поляризациях в каждой приемной позиции радиолокационной станции.

## МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦІЛІ ПО ЕЛЕМЕНТАХ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ МАТРИЦІ РОЗСІЯННЯ В СИСТЕМІ РОЗНЕСЕНИХ РЛС

Є.Л. Казаков, О.В. Коломійцев, С.І. Клівець, В.В. Посохов

*Розроблено метод спектрального аналізу визначення геометричних характеристик цілі по елементах поляризаційної матриці розсіяння в системі рознесених радіолокаційних станцій (РЛС) та розкриті принципи його роботи. Отримано аналітичний вираз для енергетичного спектру флуктуацій інтенсивностей відбитих від цілі сигналів, прийнятих на основній і кросовій поляризаціях в рознесених РЛС. Показано, що при застосуванні процедури спектрального аналізу і виміру інтенсивностей цих сигналів може бути отримана інформація про розподіл в поперечному напрямі усіх і деполаризуючих елементів цілі.*

**Ключові слова:** сигнал радіолокації, поляризаційна матриця розсіяння цілі, що відбивають елементи цілі, спектральний аналіз, некогерентний портрет цілі в поперечному напрямі.

## METHOD OF SPECTROLOGY OF DETERMINATION OF GEOMETRICAL DESCRIPTIONS OF AIM ON ELEMENTS OF POLARIZATION MATRIX OF DISPERSION IN SYSTEM OF CARRIED RADAR

E.L. Kazakov, O.V. Kolomitsev, S.I. Klevets, V.V. Posohov

*The method of spectrology of determination of geometrical descriptions of aim is worked out on the elements of polarization matrix of dispersion in the system of set about the radiolocation stations (RLS) and principle of his work is exposed. Analytical expression is got for the power spectrum of fluctuations of intensities of the reflected from an aim signals accepted on basic and cross-country race polarizations in carried RLS. It is shown that at application of procedure of spectrology and measuring of intensities of these signals information can be got about distribution in transversal direction all and depolarizing elements of aim.*

**Keywords:** radio-location signal, polarization matrix of dispersion aims, reflecting the elements of aim, spectrology, non-coherent portrait of aim in transversal direction.

## Список литературы

1. Селекция и распознавание на основе локационной информации. / Под ред. Л.Я. Горелика. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с.
2. Казаков Е.Л. Распознавание радиолокационных целей по некоординатной информации при использовании простых сигналов / Е.Л. Казаков, В.Б. Бзот // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: ХНУРЭ, 2002. – Т. 1, № 2. – С. 155 – 164.
3. Распознавание радиолокационных целей по сигнальной информации. Монография / Е.Л. Казаков, Д.Г. Васильев, А.Е. Казаков, Д.Н. Рыжов, А.В. Коломийцев. Под ред. Е.Л. Казакова: – Х.: КП «Міська друкарня», 2010. – 232 с.
4. Распознавание целей при многочастотной локации / Е.Л. Казаков, В.Б. Бзот, Д.Г. Васильев, А.Е. Казаков, А.И. Коваленко. Под ред. Е.Л. Казакова. – МО Украины. – Х.: ОНИИ, 2007. – 187 с.
5. Казаков Е.Л. Метод определения геометрических характеристик радиолокационных целей при использовании многочастотных сигналов в системе разнесенных РЛС / Е.Л. Казаков, Д.Г. Васильев // Збірник наукових праць ОНДІ. – Х.: ОНДІ ЗС, 2007. – Вип. 2(7). – С. 74 – 79.
6. Характеристика рассеяния радиолокационных целей. Монография / Е.Л. Казаков, В.Б. Бзот, А.Е. Казаков, В.А. Павлов, Ю.М. Шишкин. Под ред. Е.Л. Казакова: – Х.: АСС СПД ФО Сторожук А.В., 2006. – 186 с.
7. Распознавание воздушных целей по сигнальной информации в однопозиционных и многопозиционных локаторах / Е.Л. Казаков, А.Е. Казаков, А.В. Коломийцев, К.В. Садовий. Под ред. Е.Л. Казакова. – Х.: Мiськдрок, 2015. – 459 с.

Поступила в редакцию 28.05.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.