

УДК 621.396.96

Е.Л. Казаков, А.В. Коломийцев, С.И. Клевец

Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков

## АНАЛИЗ МАТРИЦЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ОТРАЖЕННЫХ И РАССЕЯННЫХ ЦЕЛЮ СИГНАЛОВ

*Рассматриваются возможности получения информации о характеристиках цели по пространственно-временной матрице интенсивностей сигналов, принимаемых в совмещенном и вынесенном пунктах с использованием корреляционной теории. Проводится анализ энергетических и спектральных свойств флуктуирующей цели. Получены аналитические выражения для расчетов. Сделаны выводы.*

**Ключевые слова:** радиолокационная флуктуирующая цель, энергетические и спектральные характеристики цели, совмещенный и вынесенный приемные пункты радиолокационной станции.

### Введение

**Постановка проблемы.** В последнее время в научно-технической литературе большое внимание уделяется вопросам распознавания радиолокационных целей (РЛЦ) при использовании различных видов сигналов. При этом в реальных условиях наблюдения за целью ее радиолокационные характеристики во времени носят, как правило, случайный характер. Это в основном объясняется тем, что происходит случайное изменение взаимного расположения элементарных отражателей цели и неизвестное перемещение цели относительно наблюдаемой РЛС. Все это приводит к тому. Что отраженные от цели сигналы также носят случайный характер. При наблюдении за целью для получения признаков распознавания в течении некоторого интервала времени появляется возможность совместного многократного измерения интенсивностей отраженных сигналов. Тогда получение информации о признаках распознавания с использованием случайного характера отраженных сигналов возможно при проведении совместной корреляционной обработки, в частности, интенсивностей данных сигналов. Поэтому проведение анализа матрицы интенсивности отраженных многократно измеренных сигналов является актуальной проблемой, позволяющей установить объем информации, которая может быть использована для распознавания целей.

**Анализ публикаций.** К настоящему времени появился ряд публикаций [1, 2], в которых рассматриваются вопросы корреляционной обработки отраженных от цели сигналов для получения признаков распознавания целей. Наиболее подробно данная информация проанализирована в [2]. Однако, в данной монографии рассмотрена только информация, получаемая из матрицы интенсивностей временных и частотных корреляционных функций при наблюдении за целью РЛС с совмещенным приемом. Анализ информации о характеристиках цели,

содержащую в матрице пространственно-временных корреляционных функций интенсивностей, принимаемых в многопозиционных РЛС, практически время не уделялось.

**Целью статьи** является проведение анализа матрицы пространственно-временных корреляционных функций интенсивностей отраженных и рассеянных целью сигналов для выделения информации, которая может быть использована при решении задачи распознавания.

### Изложение основного материала

В связи с тем, что в реальных условиях радиолокационного наблюдения за целью изменение ее радиолокационных характеристик во времени носят случайный характер, рассмотрим эти характеристики с вероятной точки зрения.

Предположим, что цель облучается монохроматической волной частоты на взаимно ортогональных поляризациях. Прием отраженных сигналов происходит в совмещенном и вынесенном пунктах. В этом случае при рассмотрении пространственно-временной матрицы интенсивностей сигналов предполагается, что в обоих приемных пунктах производится измерение матрицы квадратов амплитуд отраженных и рассеянных целью сигналов, которая представляет собой поляризационную матрицу рассеяния (ПМР), в виде:

$$S^{(q,p)}(t, \beta) = \begin{pmatrix} |\dot{E}_{11}^{(q,p)}(t, \beta)|^2 & |\dot{E}_{12}^{(q,p)}(t, \beta)|^2 \\ |\dot{E}_{21}^{(q,p)}(t, \beta)|^2 & |\dot{E}_{22}^{(q,p)}(t, \beta)|^2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где индексы “q”, “p” обозначают поляризационные базисы сигналов на прием и передачу.

Матрица интенсивностей отраженных сигналов получается при  $\beta = 0$  – угол разноса РЛС.

Так как в полете цели помимо поступательного совершают относительное движение, то информация об их характеристиках будет содержаться в

спектрах флуктуаций как каждого отдельного элемента матрицы (1), так и во взаимных спектрах флуктуаций каждого элемента с др. элементами.

Рассмотрим возможности получения информации при многократном измерении матриц вида (1) одновременно в совмещенном и вынесенном пунктах приема в рамках корреляционной теории [3].

Пользуясь векторной записью, образуем вектор в восьмимерном пространстве в виде:

$$S(t_i, p_1, t_j, p_k) = \begin{pmatrix} S^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1) \\ S^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где блоки  $S^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)$ ,  $S^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)$  являются векторами (1) в два различных момента времени и для двух разнесенных приемных пунктов.

Производя перемножение вектора (2) на транспонированный ему вектор и выполнить усредненную операцию, получим набор характеристик, при анализе которого можно производить описание спектров флуктуаций квадратов огибающих амплитуд сигналов, принимаемых в совмещенном и вынесенном пунктах. Данный набор может быть записан в виде (3).

Рассмотрим более подробно, какая информация о цели содержится в элементах матрицы (3).

При  $i = j$ ,  $\beta_i = \beta_k = 0$  блоки

$$V = (t_i, \beta_i, t_j, \beta_k) = V(t_i)$$

представляют собой матрицы вторых начальных моментов векторов  $|\dot{E}(t_i)|^2$  и  $|\dot{E}(t_j)|^2$  соответственно. Они характеризуют статистические связи элементов вектора (1) в фиксированные моменты времени  $t_i$  и  $t_j$  и могут быть интерпретированы как энергетические характеристики ПМР цели при совмещенном приеме.

Диагональные элементы этих блоков определяют общую мощность флуктуаций элементов данного вектора, а недиагональные – степень их статистической связи. Все диагональные элементы матрицы (3) при  $i = j$  вещественны, а элементы, симметричные относительно главной диагонали, комплексно сопряженные, и вся матрица (3) является эрмитовой матрицей.

При  $\beta_i = \beta_k = \beta$ , все сказанное выше относится к цели, характеристики которой определяются в вынесенном приемном пункте с углом разноса  $\beta$ .

При  $\beta_i = 0$ ,  $\beta_k = \beta$ , блоки  $V(t_i, \beta)$  характеризуют статистическую связь между квадратами отраженных целью сигналов, принимаемых в совмещенном и вынесенном пунктах.

При  $i \neq j$  и  $\beta_i = \beta_k = 0$ , блоки матрицы (3)  $V_{12}$  и  $V_{21}$  дают равноценную информацию о спектрах

флуктуаций элементов  $|E_{ki}(t)|^2$  при совмещенном приеме. Диагональные элементы этих блоков характеризуют спектр флуктуаций каждого отдельного элемента со всеми остальными.

При  $\beta_i = \beta_k = \beta$  блоки матриц  $V(t_i, t_j, \beta)$  дают аналогичную информацию, получаемую в вынесенном приемном пункте с углом разноса  $\beta$ .

При  $\beta_i = 0$ ,  $\beta_k = \beta$  блоки этих матриц содержат информацию о статистической связи между элементами матриц при совмещенном и разнесенном приеме в разные моменты времени.

$$V(t_i, \beta_i, t_j, \beta_k) = \begin{pmatrix} |\dot{E}_{11}^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)|^2 & |\dot{E}_{11}^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)|^2 \\ |\dot{E}_{12}^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)|^2 & |\dot{E}_{11}^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)|^2 \\ |\dot{E}_{21}^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)|^2 & |\dot{E}_{11}^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)|^2 \\ |\dot{E}_{22}^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)|^2 & |\dot{E}_{11}^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)|^2 \\ |\dot{E}_{11}^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)|^2 & |\dot{E}_{11}^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)|^2 \\ |\dot{E}_{12}^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)|^2 & |\dot{E}_{12}^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)|^2 \\ |\dot{E}_{21}^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)|^2 & |\dot{E}_{12}^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)|^2 \\ |\dot{E}_{22}^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)|^2 & |\dot{E}_{21}^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)|^2 \\ |\dot{E}_{11}^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)|^2 & |\dot{E}_{22}^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)|^2 \\ |\dot{E}_{12}^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)|^2 & |\dot{E}_{21}^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)|^2 \\ |\dot{E}_{21}^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)|^2 & |\dot{E}_{21}^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)|^2 \\ |\dot{E}_{11}^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)|^2 & |\dot{E}_{22}^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)|^2 \\ |\dot{E}_{12}^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)|^2 & |\dot{E}_{22}^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)|^2 \\ |\dot{E}_{21}^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)|^2 & |\dot{E}_{22}^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)|^2 \\ |\dot{E}_{22}^{(q_1, p)}(t_i, \beta_1)|^2 & |\dot{E}_{22}^{(q_k, p)}(t_j, \beta_k)|^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Проведенный анализ (3) позволяет сделать предварительный вывод о возможности получения информации о характеристиках цели при проведении корреляционной обработки матрицы пространственно-временных функций интенсивностей отраженных и рассеянных сигналов. Для более подробного анализа воспользуемся математической моделью наблюдаемой цели [4].

В этом случае полагаем, что цель состоит из отдельных рассеивающих центров,  $N_1$  из которых наблюдается в совмещенном пункте, а  $N_2$  – в вынесенном пункте.

Рассеивающие свойства каждого центра описываются своей поляризационной матрицей рассеяния вида:

$$S_i^{(p)} = \begin{pmatrix} \dot{S}_{11}^{(p)} & \dot{S}_{12}^{(p)} \\ \dot{S}_{21}^{(p)} & \dot{S}_{22}^{(p)} \end{pmatrix} - \text{совмещенный пункт};$$

$$S_i^{(q,p)} = \begin{pmatrix} \dot{S}_{11}^{(q,p)} & \dot{S}_{12}^{(p)} \\ \dot{S}_{21}^{(q,p)} & \dot{S}_{22}^{(p)} \end{pmatrix} - \text{вынесенный пункт},$$

с учетом данной математической модели выражения для элементов матрицы квадратов амплитуд сигналов, принимаемых в совмещенном и вынесенном пунктах, могут быть записаны в виде:

$$\left| \dot{E}_{ki}^{(p)}(t) \right|^2 = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{n=1}^{N_2} \dot{S}_{\min}^{(p)}(t) \dot{S}_{\min}^{(p)}(t) e^{-j2m[x_i(t) - x_n(t)]}, \quad (4)$$

$$\left| \dot{E}_{ki}^{(q,p)}(t, \beta) \right|^2 = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{n=1}^{N_2} \dot{S}_{ki}^{(q,p)}(t, \beta) \dot{S}_{ki}^{(q,p)}(t, \beta) \times e^{-j2m\{(1+\cos\beta)[x_i(t) - x_n(t)] + [y_n(t) - y_i(t)]\sin\beta\}}, \quad (5)$$

где  $m = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число;  $x_i$  – координата  $i$ -го рассеивающего центра вдоль линии визирования со стороны совмещенного пункта;  $y_i$  – координата  $i$ -го рассеивающего центра в направлении, перпендикулярном линии визирования со стороны совмещенного пункта.

Так как в выражения (4) и (5) входят не только коэффициенты рассеяния центров цели, но и зави-

сящие от времени их координаты, то эти соотношения могут быть использованы в качестве исходных при проведении их корреляционной обработки для определения геометрических характеристик и скоростей вращения целей, представляющих собой признаки распознавания. Аналогичные выкладки подробно приведены [5].

## Выводы

Таким образом, рассмотренный анализ показал, что при проведении корреляционной обработки элементов матрицы пространственно-временных функций интенсивностей отраженных и рассеянных целью сигналов может быть получена информация о геометрических характеристиках и скорости вращения наблюдаемой цели, которые можно использовать в качестве признаков распознавания.

## Список литературы:

1. Казаков Е.Л. Поляризационные методы распознавания радиолокационных целей / Е.Л. Казаков, А.Е. Казаков // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: АНПРЭ, 2002. – № 1. – С. 155 – 164.
2. Бабаков М.Ф. Применение поляризационно-модулированных сигналов для селекции и распознавания радиолокационных объектов / М.Ф. Бабаков, А.В. Попов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1999. – № 11. – С. 42 – 49.
3. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория // Под ред. Я.Д. Ширмана. Справочник. – М.: Радиотехника. – 2007. – 510 с.
4. Канарейкин Д.Б., . Поляризация радиоэлектронных сигналов / Д.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин. – М.: Сов. радио, 1966. – 440 с.
5. Лоуэншус О. Применение матрицы рассеяния / О. Лоуэншус // ТИИЭР. – 1965. – Т. 53, № 8. – С. 1132 – 1137.
6. Корн Г.А. Справочник по математике / Г.А. Корн, Т.М. Корн. Пер. с англ. – М.: Наука, 1973. – 831 с.

Поступила в редколлегию 27.03.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Г.В. Ермаков, Академия внутренних войск МВД Украины, Харьков.

## АНАЛІЗ МАТРИЦІ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ФУНКЦІЙ ІНТЕНСИВНОСТЕЙ ВІДБИТИХ І РОЗСІЯНИХ ЦІЛЛЮ СИГНАЛІВ

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

*Розглядаються можливості отримання інформації про характеристики цілі по просторово-часовій матриці інтенсивності сигналів, що приймаються в поєднаному і винесеному пунктах з використанням кореляційної теорії. Проводиться аналіз енергетичних і спектральних властивостей цілі, що флюктує. Отримані аналітичні вирази для розрахунків. Зроблені висновки.*

**Ключові слова:** *ціль радіолокації, що флюктує, енергетичні і спектральні характеристики цілі, поєднаний і винесений приймальні пункти радіолокаційної станції.*

## ANALYSIS OF MATRIX OF SPATIO-TEMPORAL CROSS-CORRELATION FUNCTIONS OF INTENSITIES OF THE SIGNALS REFLECTED AND DISSIPATED BY AIM

E.L. Kazakov, O.V. Kolomitsev, S.I. Klivets

*Possibilities of receipt of information are examined about descriptions of aim on the spatio-temporal matrix of intensities of the signals accepted in combined and taken away points with the use of cross-correlation theory. The analysis of power and spectral properties of fluctuation aim is conducted. Analytical expressions are got for calculations. Drawn conclusion.*

**Keywords:** *radio-location fluctuation aim, power and spectral descriptions of aim, combined and taken away receiving points of the radio-location station.*