

УДК 621.391

К.С. Васюта

Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕКУРРЕНТНОГО АНАЛИЗА

В работе впервые предложено для распознавания классов воздушных целей применение нелинейного рекуррентного анализа, который является инструментом для обнаружения степени зависимостей в наблюдаемых процессах. Для решения задачи распознавания в работе предложено рассматривать дальностный портрет цели как лингвистическую характеристику, которую можно формализовать, пользуясь следующей цепочкой: “дальностный портрет” цели  $\rightarrow$  структурированность рекуррентной диаграммы  $\rightarrow$  зависимость значений  $\rightarrow$  мера зависимости (мера детерминизма). Применение для анализа дальностных портретов воздушных целей таких преобразований позволяет распознавать их класс с высокой достоверностью.

**Ключевые слова:** распознавание воздушных целей, дальностный портрет, рекуррентный анализ, квантификации.

### Введение

Развитию теории и техники радиолокационного распознавания воздушных целей посвящено большое количество работ. Наибольшее число экспериментальных и теоретических исследований в области радиолокационного распознавания воздушных целей выполнены под руководством Я.Д. Ширмана и С.П. Лещенко. Краткий обзор этих исследований приведен в [1]. В работе [2] приведены методы радиолокационного распознавания целей и особенности их моделирования. Эти методы основаны на анализе дальностных (дальностно-частотных) портретов целей и сопоставлении их с типом и классом наблюдаемой цели. Однако достоверность и информативность распознавания воздушных целей при использовании даже широкополосных сигналов для получения поперечного портрета в однопозиционной РЛС не всегда является достаточной для принятия правильного решения. Качество распознавания может быть значительно повышено при трассовом сопровождении воздушной цели (многопозиционными радиолокационными системами).

В настоящее время активно развивается теория и техника сетцентрических (знаницентрических) систем ПВО [3]. Для таких систем актуальной остается задача создания каталога воздушных целей.

Целью данной работы является анализ возможности применения рекуррентных диаграмм и их численных мер (квантификаций) для радиолокационного распознавания воздушных целей.

### Результаты исследований

Набор известных методик анализа дальностных (дальностно-частотных) портретов воздушных це-

лей для создания их каталога может быть дополнен рекуррентным анализом. В работах [4 – 6] предложен метод, расширяющий возможности нелинейного анализа временных рядов и основанный на фундаментальном свойстве диссипативных динамических систем – рекуррентности (повторяемости состояний). Очевидно, что данный метод анализа, основанный на представлении свойств временных рядов в виде геометрических структур, может служить инструментом для обнаружения степени зависимостей в наблюдаемых процессах и являться одним из инструментов классификации дальностных портретов (целей).

Таким образом, дальностный портрет цели можно рассматривать как лингвистическую характеристику, которую можно формализовать, пользуясь, например, следующей цепочкой: “дальностный портрет” цели  $\rightarrow$  структурированность рекуррентной диаграммы  $\rightarrow$  зависимость значений  $\rightarrow$  мера зависимости (квантификации, например, мера детерминизма).

В [5] был предложен способ отображения  $m$ -мерной фазовой траектории состояний наблюдаемого процесса на двумерную квадратную двоичную матрицу размером  $N \times N$ , в которой 1 соответствует повторению состояния при некотором времени  $i$  в некоторое другое время  $j$ , а обе координатные оси являются осями времени.

Методов визуализации  $m$ -мерного фазового пространства наблюдения основан на его проекции на плоскость:

$$R_{i,j}^{m,\varepsilon} = I(\varepsilon - \|\bar{x}_i - \bar{x}_j\|), \quad (1)$$

где  $\bar{x}_i \in R^m$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  – количество рассматриваемых значений  $x_i$ ;  $\varepsilon$  – размер окрестности

точки  $\bar{x}$  в момент  $i$ ;  $\|\cdot\|$  – норма и  $I$  – функция Хевисайда), которую называют рекуррентной диаграммой [4]. Для шума рекуррентная диаграмма равномерно заполняется точками, а в случае смеси радиолокационного сигнала (процесса с зависимыми значениями) и шума на рекуррентной диаграмме появляются линии, параллельные главной диагонали.

Образуемые структуры рекуррентных диаграмм можно анализировать численно. Число диагональных линий (точек) определяет меру детерминизма [5] – это отношение числа рекуррентных точек, составляющих диагональные структуры, к общему количеству рекуррентных точек:

$$DET = \frac{\sum_{l=1}^N IP^\varepsilon(l)}{\sum_{i,j} R_{i,j}^{m,\varepsilon}}, \quad (2)$$

где  $P^\varepsilon(l) = \{l_i, i = 1, \dots, N_l\}$  – частотное распределение длин  $l$  диагональных линий в  $RP$ ,  $N_l$  – абсолютное количество диагональных линий (каждая линия считается только один раз). Данная мера не имеет значения реального детерминизма процесса.

Кроме изображения рекуррентности в виде черных точек можно изобразить меру зависимости между значениями наблюдения на диаграмме расстояний [6], которая отображается на некоторую цветовую палитру:


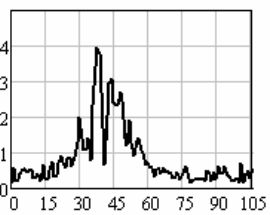
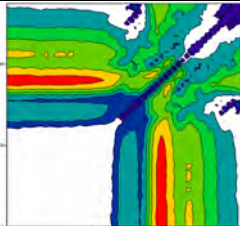

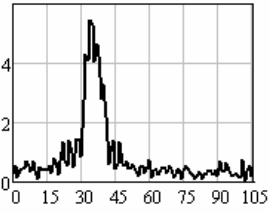
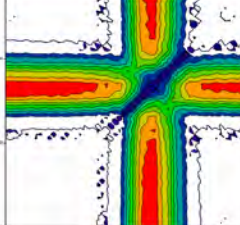

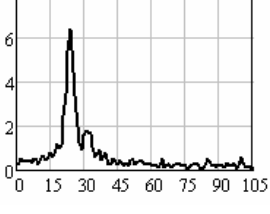
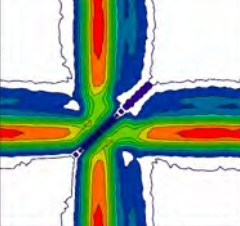

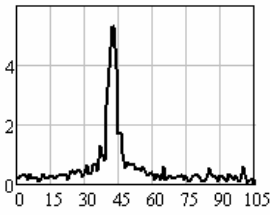
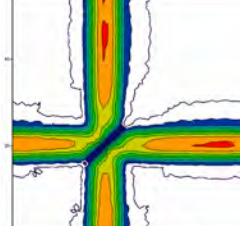
$$D_{i,j}^m = \|x_i - x_j\|. \quad (3)$$

Рассмотрим задачу распознавания воздушных целей, опираясь на (1) – (3).

Пусть на входе устройства распознавания наблюдается аддитивная смесь анализируемого дальностного портрета  $\bar{x}(t)$  и некоррелированного шума  $\bar{n}(t)$ :

Таблица 1

Классификация воздушных целей

| Класс цели                                                                                                 | Дальностный портрет                                                                 | Рекуррентная диаграмма                                                               | Среднее значение меры детерминизма |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
|  <p>Бомбардировщик</p>  |  |   | 10,027                             |
|  <p>Вертолет</p>        |  |  | 7,272                              |
|  <p>Истребитель</p>     |  |  | 5,535                              |
|  <p>Крылатая ракета</p> |  |  | 3,414                              |

$$\bar{y}(t) = \bar{x}(t) + \bar{n}(t). \quad (4)$$

Вложим наблюдаемый скалярный временной ряд

$$\{y_i\} = [y_1, y_2, \dots, y_N]$$

в пространство заданной размерности  $m$  так, чтобы получить векторный временной ряд  $\{z_t\}$ ,  $z_t \in R_{i,j}^{m,c}$  из  $N$  значений, используя алгоритм (1), и далее проведем расчет меры детерминизма согласно (2). Результаты численного моделирования приведены в табл. 1.

В таблице приведены классы анализируемых целей и соответствующие им модели дальностных портретов, диаграммы расстояний (3) и среднее значение меры детерминизма, полученное по 100 реализациям (4).

Из таблицы видно, что применение рекуррентных диаграмм и численной меры (детерминизма) для анализа дальностных портретов воздушных целей позволяет с высокой достоверностью распознавать их класс.

## Выводы

Таким образом, для создания каталога воздушных целей сетцентрических (знаниецентрических) систем ПВО могут быть применены рекуррентные диаграммы и их численные меры (квантификации). Численное моделирование показало, что их применение для анализа дальностных портретов воздушных целей позволяет распознавать их класс с высокой достоверностью.

Для повышения достоверности и информативности процесса распознавания классов воздушных

целей необходимо использовать при создании каталогов целей траекторные, скоростные и другие признаки.

За рамками данной работы осталась нерассмотренная задача оценки границ применимости предложенного метода распознавания в сложной сигнально-помеховой обстановке. Решение этой важной задачи имеет практическое значение и будет представлено автором в следующих публикациях.

## Список литературы

1. Леценко С.П. Развитие теории и техники радиолокационного распознавания воздушных целей / С.П. Леценко // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: ХНУРЕ. – 2009. – № 4(8). – С. 490-496.
2. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я.Д. Ширман, С.П. Леценко [и др.] // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1996. – Т. 11. – С. 14-25.
3. Куликов А. Война в едином информационном пространстве / А. Куликов // Воздушно-космическая оборона. – 2008. – № 2 (39). – С. 54-60.
4. Eckmann J.P. Recurrence Plots of Dynamical Systems / J.P. Eckmann, S.O. Kamphorst, D. Ruelle // Europhysics Letters 5. – 1987. – P. 973-977.
5. Iwanski J.S. Recurrence plots of experimental data: To embed or not to embed? / J.S. Iwanski, E. Bredley // Chaos. – 1998. – № 8(4). – P. 861-871.
6. Marwan N. Recurrence-plots-based measures of complexity and application to heart-rate-variability data / N. Marwan, N. Wessel, U. Meyerfeldt, A. Schirdewan, J. Kurths // Physical Review, E66, 026702. – 2002.

Поступила в редколлегию 22.07.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.Н. Седышев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## РОЗВИТОК МЕТОДІВ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ ЗАСТОСУВАННЯМ РЕКУРЕНТНОГО АНАЛІЗУ

К.С. Васюта

В роботі вперше запропоновано для розпізнавання класів повітряних цілей застосування нелінійного рекурентного аналізу, який є інструментом для виявлення ступеня залежностей в спостережуваних процесах. Для рішення завдання розпізнавання в роботі запропоновано розглядати дальнісний портрет цілі як лінгвістичну характеристику, яку можна формалізувати, користуючись наступним ланцюжком: "дальнісний портрет" цілі → структурованість рекурентної діаграми → залежність значень → міра залежності (міра детермінізму). Застосування для аналізу дальнісних портретів повітряних цілей таких перетворень дозволяє розпізнавати їх клас з високою достовірністю.

**Ключові слова:** розпізнавання повітряних цілей, дальнісний портрет, рекурентний аналіз, квантифікації.

## DEVELOPMENT OF AIR TARGETS RADAR RECOGNITION METHODS USING RECURRENT ANALYSIS

K.S. Vasiyta

This paper for the first time presents air targets classes recognition method based on non-linear recursive analysis, which is a tool for detecting the degree of dependence of the observed processes. To solve the problem of recognition it is proposed to consider target range portrait as a linguistic feature, which can be formalized using the following chain: "target range portrait" → structured recurrent chart values → dependence of values → measure of dependence (a measure of determinism). Application of such transformations to the analysis of target range portraits allows to recognize their class with high reliability.

**Keywords:** air targets classes recognition, range portrait recursive analysis, the quantum-identification.