

# Розвиток радіотехнічного забезпечення, АСУ та зв'язку Повітряних Сил

УДК 621.391

К.С. Васюта, О.Б. Танцюра, О.В. Ревін

*Харківський університет повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

## РОЗВИТОК МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ В РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РЕКУРЕНТНОГО АНАЛІЗУ

*В роботі аналізується можливість використання рекурентного аналізу для виявлення та обробки спостережень. Показано, що наявність шуму спостереження знижує якість виявлення сигналів із використанням квантифікацій (чисельних характеристик) рекурентних діаграм. Проілюстровано, що традиційний чисельний аналіз квантифікацій рекурентних діаграм може бути доповнено використанням BDS статистики, яка не спирається на властивості шуму спостереження. Синтезовано алгоритм обробки різних класів сигналів з використанням рекурентного аналізу.*

**Ключові слова:** радіотехнічні системи, рекурентний аналіз, обробка сигналів.

### Вступ

Кілька останніх десятиліть ведуться активні дослідження хаотичних та випадкових сигналів для застосування їх в якості зондувачів сигналів радіолокаційних станцій (РЛС). Використання таких сигналів надає ряд переваг в радіолокації: забезпечує високу завадозахисність РЛС, скритність її роботи та ін. Але, у випадку застосування таких сигналів, постає проблема у виборі алгоритму та методу їх обробки.

**Метою даної роботи** є розробка пристрою обробки хаотичних сигналів при величині значення відношення сигнал/шум близькій до одиниці та описання інструменту, який дозволяє кількісно оцінювати стан процесу в реальному часі так, щоб впорядкування цих оцінок приводило б до відповідного впорядкування властивості процесу, що спостерігається.

### Основна частина

Останнім часом набір традиційних методик дослідження процесів в радіолокаційних системах був значно розширений нелінійними методами [1-4,6,7]. Однак більшість таких методів нелінійного аналізу потребують або доволі довгих, або стаціонарних рядів даних, які досить складно реалізувати. Рекурентний аналіз – це новий підхід до аналізу складних динамічних систем, що динамічно розвивається, який не потребує довгих чи стаціонарних часових рядів [1-3]. Рекурентні діаграми дозволяють робити висновки про характер протікаючих в системах процесів, наявності та впливу шуму, наявності станів повторення та замирання, здійсненні екстремальних подій, наявності прихованої періодичності і циклічності. Кількісний аналіз рекурентних діаграм

дозволяє підставити діаграмі деякі чисельні міри, основані на щільності рекурентних точок, діагональних та вертикальних (горизонтальних) ліній.

При графічному зображенні траєкторії станів системи, яка зводить свою динаміку до обмеженої підмножини фазового простору, в фазовому просторі, можна впевнитись в тому, що вона з імовірністю майже рівною одиниці повертається до попереднього заданого режиму з точністю нескінченно малої величини [5]. Суть цієї фундаментальної властивості полягає в тому, що через деякий час система прагне повернутися до стану, деяким чином близькому до попереднього і проходить при цьому подібні етапи еволюції.

Відображення  $m$  – мірної фазової траєкторії станів процесу  $\vec{x}(t)$  (без урахування шуму) на дво-мірну квадратну двійкову матрицю розмірністю  $N \times N$ , в якій  $I$  відповідає повторенню стану при деякому часі  $i$  за деякий інший час  $j$ , а координатні осі являються осями часу, названо рекурентною діаграмою, що являється проекцією  $m$  – мірного псевдо-фазового простору на площину. Рекурентна діаграма описується співвідношенням [1,4]:

$$R_{i,j}^{m,\varepsilon} = I(\varepsilon_i - \|x_i - x_j\|). \quad (1)$$

де  $\{x_i\} = [x_1, x_2, \dots, x_N] \in \mathbb{R}^m$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  – кількість розглядаємих станів даного процесу,  $\varepsilon_i$  – розмір околиці точки  $x_i$  в момент  $i$ ,  $\|x_i - x_j\|$  – відстань між точками,  $I(\cdot)$  – функція Хевісайда (норма). Графічно рекурентна діаграма може бути представлена монохромним зображенням, де одиниці відповідає чорна точка [4].

При наявності тільки одномірного спостереження  $\{x_i\}$  еквівалентна траєкторія в  $m$ -вимірному фазовому просторі може бути відновлена методом часових затримок Текенса:

$$\begin{aligned} x_1^m &= (x_1, x_2, \dots, x_m), \\ x_2^m &= (x_2, x_3, \dots, x_{m+1}), \\ x_{N-m}^m &= (x_{N-m}, x_{N-m+1}, \dots, x_N), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $m$  - розмірність вкладення. Топологічні структури відновленої траєкторії зберігаються, якщо  $m \leq 2d+1$ , де  $d$  - розмірність аттрактора. На практиці виходить, що в більшості випадків аттрактор може бути відновлений навіть при  $m \leq 2d$ .

Розмір околиці  $\varepsilon_i$  визначає радіус околиці в фазовому просторі з центром в точці  $x_i$ . Якщо точка  $x_j$  попадає в середину даної околиці, то такий стан вважається подібним стану  $x_i$ , і на діаграмі встановлюється  $R_{i,j} = 1$ . Радіус  $\varepsilon_i$  може бути постійним для всіх  $x_i$ , а може визначатися для кожної точки окремо, щоб в отримуємо околицю завжди потрапляла визначена кількість подібних станів. В подальшому використовується постійне значення  $\varepsilon_i$ , що призводить до отримання симетричної рекурентної діаграми відносно лінії  $R_{i,j} = 1$  ( $i = j$ ).

Будь яка рекурентна точка  $(i, j)$  не несе інформацію про процес, що спостерігається в моменті часу  $i, j$ . Тільки вся сукупність рекурентних точок дозволяє робити висновки про властивості процесу. Рекурентними являються стани  $x_j$ , які потрапляють в  $m$ -мірну околицю з радіусом  $\varepsilon_i$  і центром в  $x_i$ . Ці точки  $x_j$  називають рекурентними точками.

Вибір типу норми в (1) здійснює вплив на вид діаграми. Як правило, при побудові рекурентних діаграм використовується норма  $L_\infty$  (максимальна норма), так-як, по-перше, вона незалежна від розмірності фазового простору  $m$ , по-друге, найбільш легко обчислюється і, по-третє, дозволяє вивчати діаграми теоретично, оскільки аналітичні вирази для  $L_\infty$  вирішують простіше, ніж для будь-якої іншої норми.

При побудові рекурентної діаграми ми аналізуємо взаємну близькість точок однієї траєкторії  $x_i$  довжиною  $N_x$ . Очевидно що аналогічне порівняння можна провести для двох часових рядів. Додамо в той же фазовий простір траєкторію  $y_i$  довжиною  $N_y$ . Графічне відображення порівняння близькості точок першої траєкторії з точками другої траєкторії називається крос-рекурентною діаграмою (CR) [2, 3]:

$$CR_{i,j}^{m,\varepsilon_i} = I\left(\varepsilon_i - \|\bar{x}_i - \bar{y}_j\|\right). \quad (3)$$

де  $\bar{x}, \bar{y} \in R^m$ ,  $i = 1, \dots, N_x$ ,  $j = 1, \dots, N_y$ . Цей вираз повністю аналогічний виразу (1) для рекурентної діаграми. Якщо стан другої траєкторії в час  $j$  близький до стану першої в час  $i$ , то чорна точка буде встановлена в матриці CR в положенні  $(i, j)$ . Важливо, що така ситуація не означає «повторення» стану, і, таким чином матриця CR відображає не повторюваність, а відповідність траєкторій одна одній.

Якщо для спрощення прийняти, що числові ряди однакового масштабу (тобто однакової довжини  $N_x$  та інтервалу виміру  $\Delta t$ ), тоді крос-рекурентна діаграма приймає вид масиву розмірністю  $N \times N$ . Траєкторії для побудови крос-рекурентних діаграм повинні відображати значення змінних стану чи компонент подібних динамічних систем. Для усунення проблеми одиниць виміру і масштабу значень ряди потрібно нормувати на максимальне по модулю значення. Недоцільно використовувати крос-рекурентні діаграми для аналізу даних, отриманих від принципово різних динамічних систем.

На рис. 1 приведені крос-рекурентні діаграми, отримані для двох хаотичних процесів з дискретними відображеннями:

$$x_{n+1} = \lambda_1 x_n (1 - x_n) \quad \text{і} \quad y_{n-1} = \lambda_2 y_n (1 - y_n)$$

при різних початкових умовах і параметрах  $\lambda$ .

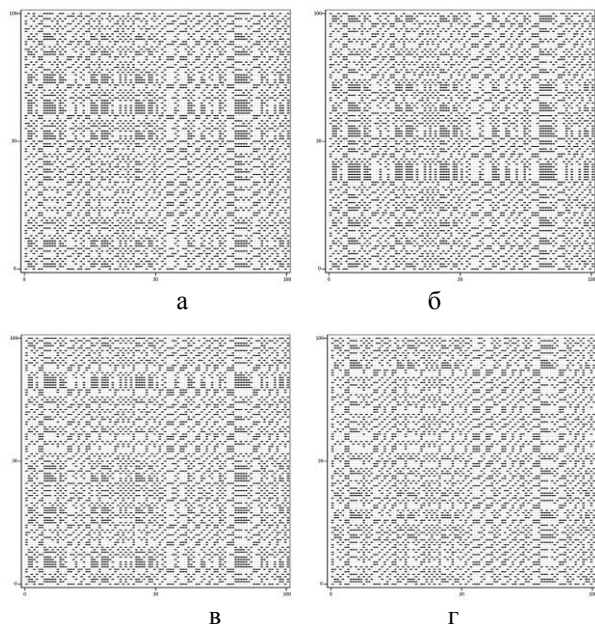


Рис. 1. Крос-рекурентні діаграми, отримані при умовах:

- а -  $\lambda_1 = \lambda_2$ ,  $x_0 = y_0$ ; б -  $\lambda_1 = \lambda_2$ ,  $x_0 \neq y_0$ ;
- в -  $\lambda_1 \neq \lambda_2$ ,  $x_0 = y_0$ ; г -  $\lambda_1 \neq \lambda_2$ ,  $x_0 \neq y_0$

З рис. 1 видно, що при співпаданні початкових умов і управляючих параметрів двох досліджуваних хаотичних процесів їх крос-рекурентна діаграма володіє симетричною топологією і повністю повто-

рює рекурентну діаграму одного з процесів. При неспівпадінні початкових умов і управляючих параметрів спостерігаємих процесів їх крос-рекурентна діаграма володіє асиметричною топологічною структурою. Ця властивість може бути використана при аналізі якості синхронізації хаотичних процесів та їх обробці.

Рекурентні діаграми описують динаміку системи за допомогою крупно масштабних і мало масштабних структур – окремі точки, діагональні і горизонтальні (вертикальні) лінії. Комбінації вертикальних і горизонтальних ліній формують прямокутні кластери точок. Поодинокі, окремо стоячі рекурентні точки з'являються в тому випадку, коли відповідні стани рідкі, або не стійкі в часі, або викликані сильною флуктуацією. При цьому вони не являються ознаками випадковості або шуму; діагональні лінії

$$R_{i+k,j+k} = 1$$

при  $k=1, \dots, l$ , де  $l$  – довжина діагональної лінії) з'являються у випадку, коли сегмент траєкторії в фазовому просторі проходить паралельно другому сегменту, тобто траєкторія повторює саму себе, повертаючись в одну і ту саму область фазового простору в різний час. Довжина таких ліній визначається часом, під час якого сегменти траєкторії залишаються паралельними; напрямок (кут нахилу) ліній характеризує внутрішній час підпроцесів, відповідних даним сегментам траєкторії. Проходження ліній паралельно лінії ідентичності (під кутом  $\pi/4$  до осей координат) свідчить про однаковий напрям сегментів траєкторії, перпендикулярно – про протилежний («відзеркалені» сегменти), що може також являтися ознакою реконструкції фазового простору з не відповідною розмірністю вложення. Нерегулярна поява діагональних ліній, являється ознакою хаотичного процесу. Вертикальні (горизонтальні) лінії  $R_{i,j+k} = 1$  (при  $k=1, \dots, v$ , де  $v$  – довжина вертикальної або горизонтальної лінії) виділяють проміжки часу, в які стани системи не міняються або міняються не суттєво (системи «заморожена» на цей час), що являється ознакою «ламінарих» станів.

Перераховані структури використовуються для обчислення мір кількісного аналізу рекурентних діаграм. Раніше вже був розроблений інструмент обчислення ряду мір на основі підрахунку щільності рекурентних точок і побудови частотного розподілу довжин діагональних ліній: recurrence rate (RR, коефіцієнт само подібності або ймовірність повторення стану), determinism (DET, передбачуваність в поведінці системи), divergence (DIV, зворотна величина максимальної довжини діагональної лінії), entropy (ENTR, ентропія) і trend (TREND, тренд). Обчислення цих мір в підматрицях рекурентної діаграми

вздовж лінії ідентичності показує поведження цих мір в часі. Міра рекурентності (RR):

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon}, \quad (4)$$

показує щільність рекурентних точок, підраховуючи їх в границі

$$P = \lim \frac{1}{N^2} \sum_{i,j}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon}$$

Міра детермінізму (DET) або передбачуваності поведження процесу – це відношення рекурентних точок, які складають діагональні структури, до загальної кількості рекурентних точок:

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N IP^{\varepsilon}(l)}{\sum_{i,j}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon}}, \quad (5)$$

де  $P^{\varepsilon}(l) = \{l_i, i=1, \dots, N_i\}$  – частотний розподіл довжин  $l$  діагональних ліній в RP,  $N_i$  – абсолютна кількість діагональних ліній (кожна лінія рахується тільки один раз). Ця міра не має значення реального детермінізму процесу, оскільки порогове значення  $l_{\min}$  – виключає діагональні лінії, сформовані тангенціальними рухами траєкторій в псевдофазовому просторі. При  $l_{\min} = 1$  DET = RP.

Крім того, кількісний аналіз доповнюється методом, що базується на використанні BDS – статистики. Раніше обчислення BDS – статистики здійснювалось для процесів занурених в псевдофазовий простір розмірності  $m$ . Пропонується використання BDS – статистики для чисельного аналізу рекурентних діаграм.

Для оцінки чисельних мір процесу обтяжимо його шумами (нехай на вході приймального пристрою спостерігається адитивна суміш аналізованого процесу  $\bar{x}(t)$  і некорельованого білого шуму  $\bar{n}(t)$ , тобто  $\bar{y}(t) = \bar{x}(t) + \bar{n}(t)$  та проаналізуємо зміну виду рекурентної діаграми, а також кількісних мір від величини відношення сигнал/шум  $q$ . На рис. 2 представлений вид рекурентних діаграм гармонічного сигналу  $x(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi)$ , отриманих для відношення сигнал/шум  $q=100$  (рис. 2, а) і для  $q=1$  (рис. 2, б).

З порівняння рисунків видно, що збільшення рівня шумів в спостерігаємому процесі значно погіршує вид рекурентної діаграми і ускладнює процесу аналізу процесу.

На рис. 3 приведені залежність міри рекурентності від відношення сигнал/шум  $RR(q)$ , отримані для процесів: регулярного, хаотичного, MA, GARCH, мультифрактального Леві. Чисельні моделювання проводились для реалізації процесів з відліками  $n = 30000$ ,  $\varepsilon = 2$ ,  $m = 5$ .

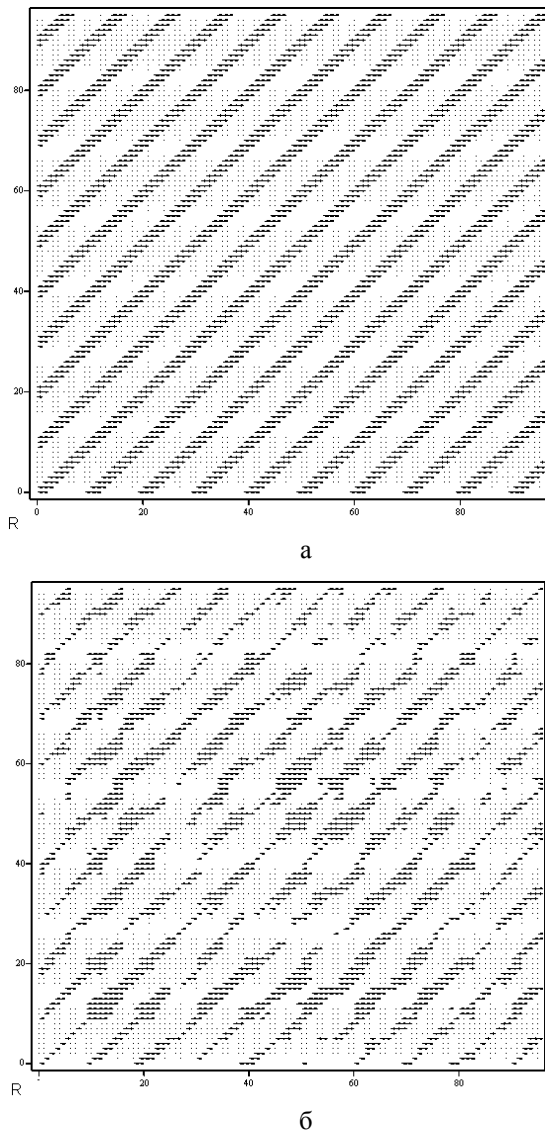


Рис. 2. Рекурентні діаграми гармонічного сигналу (а – для  $q = 100$ , б – для  $q = 1$ ).

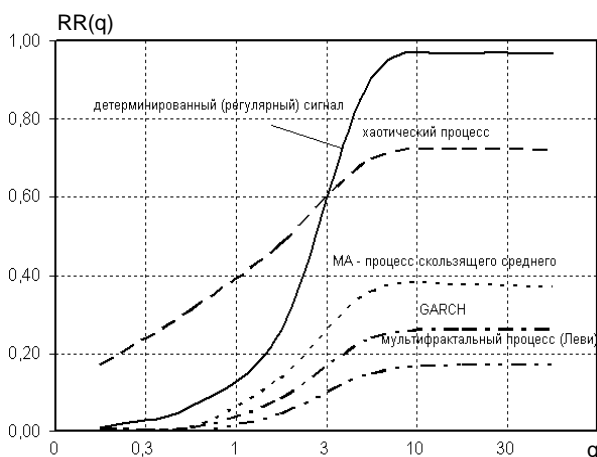


Рис. 3. Залежність міри рекурентності від відношення сигнал/шум

З рис. 3 видно, що оцінку міри рекурентності можна проводити для детермінованих (регулярних) сигналів і хаотичних процесів при  $q \geq 3$ , причому

для хаотичних процесів міра рекурентності менш залежить від  $q$ , ніж для регулярних сигналів, і при рівному відношенні сигнал/шум хаотичний процес ще відрізняється на фоні шуму. При відсутності шуму для регулярних процесів  $RR(q) = 1$ . Для лінійно й не лінійно перетворених стохастичних процесів, а також мультифрактальних процесів Леві достовірна оцінка міри рекурентності можлива при  $q \geq 10$ .

Як було сказано вище, для кількісного аналізу рекурентних діаграм можна використовувати BDS – статистику. На рисунку 4 приведені нормовані залежності BDS – статистики від відношення сигнал/шум

$$\frac{\bar{w}_{m,N}(\varepsilon, q)}{\bar{w}_{\max}(\varepsilon, q)}$$

отримані для тих же процесів, що і попередні залежності.

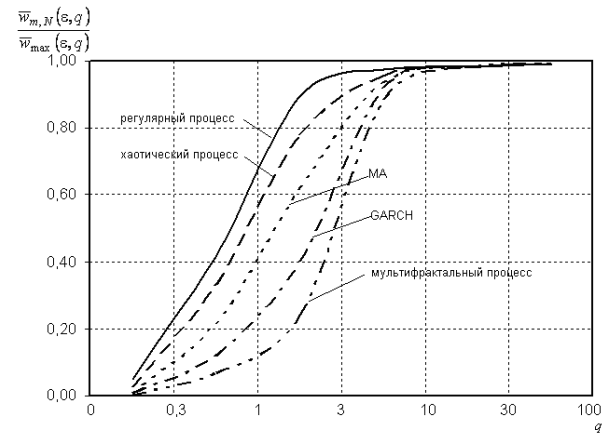


Рис. 4. Нормовані залежності BDS – статистики від відношення сигнал/шум

Результати чисельного моделювання показали, що BDS – статистика дозволяє з заданою ймовірністю розпізнавати процеси при менших відношеннях сигнал/шум, ніж міра рекурентного аналізу. Її ефективність обумовлена тим, що BDS – статистика містить інформацію про структуру процесу, яка зберігається в значеннях кореляційних розмірностей, його образу в псевдофазовому просторі вкладення.

Показані вище властивості рекурентного аналізу можливо використовувати для обробки хаотичних та регулярних сигналів в радіолокації (рис. 5). В пристрої формування сигналу формується  $d_x$  – мірний зонduючий сигнал  $\{x_i^{d_x}\} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$  довжиною  $N$  відліків, який випромінюється в простір. При відбитті зонduючого сигналу від цілі, на вході системи обробки ехо-сигналів спостерігається  $d_y$  – адитивна суміш зонduючого сигналу  $\bar{x}(t)$  і некорельованого шуму  $\bar{n}(t)$ :  $\bar{y}(t) = \bar{x}(t) + \bar{n}(t)$ , яка надходить на блок (CRP) разом з сигналом, що надходить

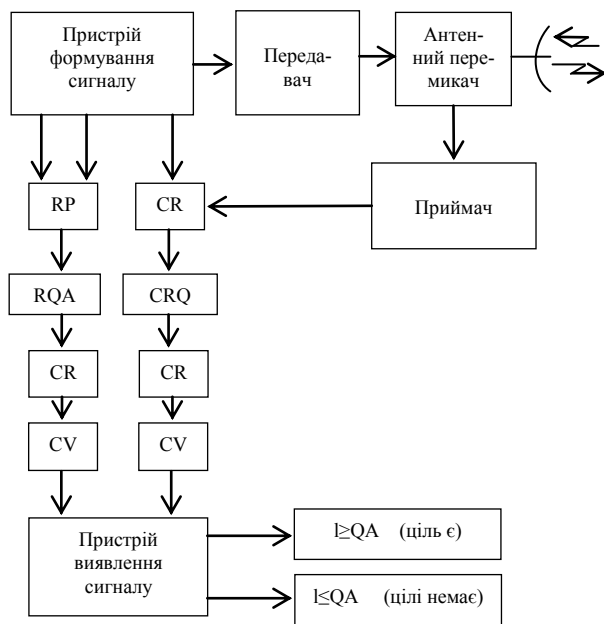


Рис. 5. Схема обробки хаотичних та регулярних сигналів в радіолокації

від пристрою формування сигналу для побудови крос-рекурентної діаграми. Також з пристрою формування сигналу, на блок RP для побудови рекурентної діаграми, надходить опорне колювання (зондуючий сигнал). Далі, в блоці обчислення міри крос-рекурентної діаграми (CRQA) та рекурентної діаграми (RQA) на основі чисельної міри формуються характеристичні вектори спостереження (CV). В подальшому вони використовуються для порівняння з певним порогом в пристрої виявлення сигналу, на виході якого формується інформація про наявність чи відсутність цілі в просторі.

## Висновки

Таким чином, нажалі порівняння результатів різних дослідів ускладнено через практично повної

відсутності на даний час загальних критеріїв для аналізу систем, наприклад, вибору розмірності вкладання та затримки при реконструкції фазового простору. Хоча така неузгодженість, як правило, не впливає на результат візуальної (якісної) оцінки, вона ускладнює систематизацію та узагальнення результатів. Запропонована модель обробки може бути застосована в радіотехнічних системах – як самостійно, так і в сполученні з іншими методами обробки і аналізу спостережень.

## Список літератури

1. Шелухин О.И. Фрактальные процессы в телекоммуникациях / О.И. Шелухин, А.М. Тенякишев, А.В. Осин., – М.: Радиотехника, 2003.– 480 с.
2. Ectmann J.P. Recurrence plots of dynamical systems / J.P. Ectmann, S.O. Kamphorst, D. Ruelle // *Europhysics Letters.* – 1987. – 5. – P. 973-977.
3. Eckmann J.P. Recurrence Plots of Dynamical Systems / J.P. Eckmann, S.O. Kamphorst, D. Ruelle // *Europhysics Letters.* – 1987. – 5. – P. 973-977.
4. 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.
5. 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.*
6. Kanzler L. Very Fast and Correctly Sized Estimation of the BDS Statistic / Ludwig Kanzler // *Christ Church and Department of Economics University of Oxford.* – 1999. – 95 с.
7. Schreiber T. Discrimination power of measures for nonlinearity in a time series / T. Schreiber, A. Schmitz // *Physical Review E.* – 1997. – V.55, №5. – P. 5443 – 5447.

Надійшла до редколегії 29.03.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. П.Ю. Костенко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕКУРРЕНТНОГО АНАЛИЗА

К.С. Васюта, А.Б. Танцюра, А.В. Ревин

В работе анализируется возможность использования рекуррентного анализа для обнаружения и обработки наблюдений. Показано, что присутствие шума наблюдения понижает качество обнаружения сигналов с использованием квантификаций (численных характеристик) рекуррентных диаграмм. Проиллюстрировано, что традиционный численный анализ квантификаций рекуррентных диаграмм может быть дополнен использованием BDS статистики, которая не опирается на свойства шума наблюдения. Синтезировано алгоритм обработки различных классов сигналов с использованием рекуррентного анализа.

**Ключевые слова:** радиотехнические системы, рекуррентный анализ, обработка сигналов.

## DEVELOPMENT METHODS OF DETECTION RADIO SIGNALS IN RADIO ENGINEERING SYSTEMS WITH USE OF THE RECURSION ANALYSIS

K.S. Vasyta, A.B. Tanciura, A.V. Revyn

In work opportunity is analyzed use of the recursion analysis for detection and supervision. It is shown that noise presence the supervision lowers quality detection signals with use of quantifications (numerical characteristics) the recurrence plots. It is shown that the traditional numerical analysis quantifications the recurrence plots can be added with use BDS statistician, which does not rely on properties of noise of supervision. It is synthesized algorithm of processing of various classes of signals with use recurrence analysis.

**Keywords:** radio engineering system, recurrence analysis, processing of signals.