

УДК 530.1.537.86+621.396.96

В.К. Іванов<sup>1</sup>, Р.Е. Пащенко<sup>2</sup>, О.І. Вовк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут радіофізики та електроніки НАН України ім. О.Я. Усікова, Харків

<sup>2</sup>Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## АНАЛІЗ СТРУКТУРИ СИГНАЛІВ З ВИХОДУ ФАЗОВОГО ДЕТЕКТОРА КОГЕРЕНТНО-ІМПУЛЬСНОЇ РЛС ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРУ РУХУ ЛЮДИНИ

*Запропоновано метод аналізу структури сигналів з виходу фазового детектора когерентно-імпульсної РЛС з використанням фазових портретів і фрактальної розмірності. Проведений аналіз зміни структури фазових портретів від характеру рухів людини на фоні підстилюючої поверхні. Розглянута можливість використання фазових портретів і фрактальної розмірності для розпізнавання характеру руху людини.*

*когерентно-імпульсна РЛС, фазовий портрет, фрактальна розмірність*

### Постановка проблеми і аналіз літератури

Існуючі системи селекції рухомих цілей (СРЦ) є комплексом спеціальних засобів, що забезпечують виділення сигналів рухомих цілей на фоні відбиття від нерухомих об'єктів, або об'єктів, що переміщуються повільно. Такими об'єктами є місцеві предмети, поверхня моря і т.д., які, загалом, називаються підстилюючою поверхнею [1]. Основна відмінність, на якій і заснована селекція рухомих цілей, є відмінність частот сигналів, відбитих від нерухомих і рухомих об'єктів.

На практиці для вирішення задачі селекції рухомих цілей найбільше застосування отримали когерентно-імпульсні системи СРЦ [2]. У цих системах як опорні коливання, з якими порівнюються відбиті сигнали, використовуються коливання спеціального так званого когерентного гетеродина. Ці коливання жорстко синхронізовані по фазі з коливаннями передавача так, що різниця фаз між цими двома коливаннями зберігається постійною в кожному періоді посилення імпульсів.

Когерентний гетеродин працює на частоті порівняння, на якій відбувається виділення доплерівського зсуву частоти сигналів, що приймаються. Найчастіше частотою порівняння є проміжна частота приймача  $f_{пч}$ . Напряга когерентного гетеродина подається на фазовий детектор. На фазовий детектор подається також і відбитий сигнал, перетворений в сигнал проміжної частоти [3].

Якщо різниця фаз когерентного гетеродина і прийнятого сигналу зберігається від імпульсу до імпульсу постійною, то амплітуда імпульсів сигналу після детектора від нерухомих об'єктів буде постійною, що і є певною ознакою при розпізнаванні рухомих і нерухомих цілей. За наявності рухомої цілі на виході фазового детектора будуть відеоімпульси, амплітуда яких від періоду до періоду змінюється по гармонійному закону з частотою биття  $F_6$  рівною частоті Доплера. Після перетворення відеоімпульсів в низькочастотні коливання, вони надходять на вхід головних телефонів. При цьому в телефонах прослуховується характерний звук, частота якого залежить від швидкості руху цілі.

Застосування систем СРЦ в когерентно-імпульсних РЛС дозволяє ефективно виділяти рухомі об'єкти, а також по частоті звуку в головних телефонах здійснювати розпізнавання рухомих об'єктів (людина, автомобіль і т.д.) за швидкістю [3]. Але при невеликих змінах частоти Доплера визначення характеру руху об'єкту (наприклад, людина, що йде, біжить, повзе, перебігає) є досить складним завданням, і вимагають високого рівня підготовки оператора РЛС.

У даній роботі аналізуються сигнальні вибірки з виходу фазового детектора (вхід телефонів), одержані експериментально при зондуванні рухомої людини когерентно-імпульсною РЛС „Кредо” сантиметрового діапазону. При цьому аналізована вибірка представляє накопичені за певний промі-

жок часу (одну секунду) низькочастотні коливання, що промодульовані частотою Доплера. Кожен рух людини певним чином проявляється в аналізованому сигналі, змінюючи його по амплітуді, фазі, формі, породжує свій спектр частот. Для отримання інформації про характер руху об'єкту зондування представляється актуальним аналіз форми (структури) сигналу.

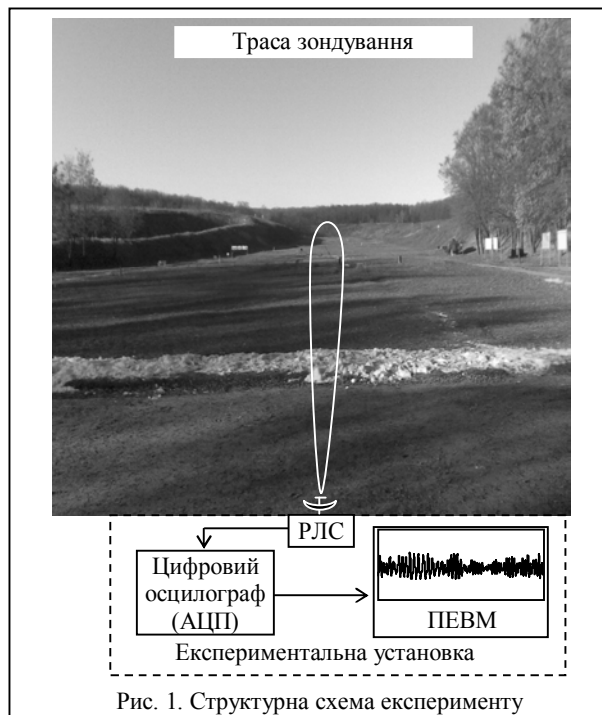
Останніми роками перспективним напрямом в дослідженні різноманітних структур стає використання нових математичних методів, заснованих на застосуванні нелінійних процедур (реконструкція атракторів, фрактальний аналіз, вейвлет аналіз) [4 – 6]. Дані методи також успішно застосовуються для аналізу фрактальних характеристик відбитих радіолокаційних сигналів [7].

**Мета статті:** розглянути новий метод аналізу структури сигналів з виходу фазового детектора когерентно-імпульсної РЛС з використанням фазових портретів і фрактальної розмірності для визначення характеру руху людини.

### Опис експерименту

Задача отримання сигналів з виходу фазового детектора при зондуванні людини вирішувалася апаратно-програмним чином і включала реєстрацію сигналів та їх підготовку до обробки. Основними елементами експериментальної установки були когерентно-імпульсна РЛС сантиметрового діапазону (простий сигнал,  $\lambda = 1,8$  см,  $\tau = 0,4$  мкс) [3], цифровий осцилограф (аналогово-цифровий перетворювач – АЦП) і персональний комп'ютер (ПЕВМ).

Структурна схема проведення експерименту показана на рис. 1.



Сигнали з виходу фазового детектора (виходу головних телефонів) РЛС за допомогою цифрового осцилографа (частота дискретизації АЦП  $f_d = 20$  МГц, розрядність 1024 дискрет) перетворювалися в цифрові коди і зберігалися в пам'яті ПЕВМ для подальшого аналізу. Одержаний цифровий код за допомогою відповідного програмного забезпечення цифрового осцилографа представлявся у вигляді текстового файлу, доступного для різних комп'ютерних математичних пакетів.

При проведенні експерименту положення діаграми спрямованості в азимутальній та кутомісцевій площині фіксувалося (задавалася траса зондування). Запис проводився при настройці стробу дальності радіолокаційної станції на певну дистанцію на трасі зондування ( $D = 350$  м).

На трасі зондування на інтервалі дальності від 250 м до 450 м розташовувався об'єкт зондування – людина, яка здійснювала різні рухи: пересувалася кроком, бігом, перебігала, повзла, а також розмахувала руками, стоячи на одному місці.

Характер руху людини оператор РЛС спостерігав на вбудованому індикаторі системи СРЦ, і здійснював їх розпізнавання по звуку в штатних головних телефонах. Крім того, сигнали, відповідні різному характеру рухів людини, з виходу головних телефонів подавалися на цифровий осцилограф і записувалися на жорсткий диск ПЕВМ. Зафіксовані в цифровому вигляді реалізації сигналів надалі використовувалися для аналізу його форми.

### Метод аналізу структури сигналів з використанням фазових портретів і фрактальної розмірності

Деякі важливі властивості реалізацій сигналів, які неможливо або важко досліджувати аналітично, піддаються наочному представленню та якісному дослідженню за допомогою побудови фазової площини.

Можливість аналізу радіолокаційних сигналів з використанням фазової площини описана в [8,9]. У загальному випадку фазову площину можна визначити як абстрактну математичну площину, на якій осями координат є стан системи та її похідна. Оскільки площина має два виміри  $x$  і  $y$ , то ясно, що метод фазової площини застосовується для аналізу руху систем, які описуються диференціальними рівняннями другого порядку. В цьому випадку рішення диференціального рівняння можна одержати не інтегруванням, а його представленням на площині з прямокутною системою координат. Таким чином, якщо початкове рівняння системи є рівнянням другого порядку (такими системами є коливальні системи РЛС), то як змінну  $y$  можна вибрати швидкість

зміни координати  $x$ , тобто  $y = \frac{dx}{dt}$ .

Кожному стану системи, тобто кожній парі значень  $x$  і  $y$ , відповідає точка на фазовій площині. Навпаки, кожній точці на фазовій площині відповідає один і лише один стан системи. Зміні стану системи у часі можна співвіднести рух деякої точки на фазовій площині, яка одержала назву тієї, що зображає. Криву на фазовій площині (траєкторію руху точки, що зображає, на фазовій площині), що описує еволюцію системи, називають фазовою траєкторією. Сукупність фазових траєкторій утворює фазовий портрет [8].

На рис. 2, а і б показані часова реалізація періодичного (гармонійного) сигналу  $x(t)$  та його фазовий портрет на фазовій площині  $y(x)$ , відповідно.

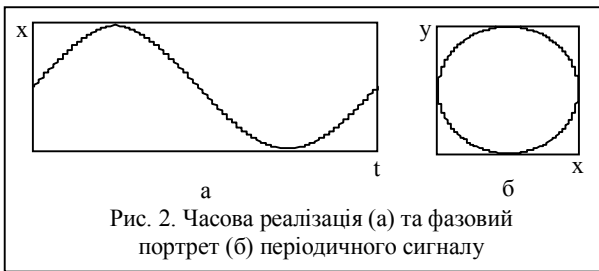


Рис. 2. Часова реалізація (а) та фазовий портрет (б) періодичного сигналу

Як видно з рисунку фазовий портрет періодичного сигналу є замкнутим колом. Радіус кола змінюється із зміною амплітуди сигналу [9]. Збільшення періоду сигналу не приводить до зміни форми фазового портрета. Зміна періоду сигналу приводить лише до накладення кіл одне на одне.

Для аналізу стану динамічної системи, в якій відомий тільки один параметр (якщо першу похідну сигналу знайти не можливо або дуже важко), можна використовувати метод побудови псевдофазової площини з часовою затримкою [4], заснований на теоремі Такенса [10]. Для аналізу таких сигналів (систем) будується залежність сигналу від його ж величини в інший момент часу, відстаючий або випереджаючий даний момент на постійну величину  $\tau$ :  $[x(t), x(t + \tau)]$ . Сигнал  $x(t + \tau)$  зв'язаний з  $\dot{x}(t)$  і результат має ті ж властивості, що і при використанні дійсної фазової площини.

Підходи до вибору  $\tau$  описані у [4]. На практиці часову затримку (число точок дискретного сигналу)  $\tau$  найчастіше вибирають близькою до першого нуля автокореляційної функції для часового ряду  $x_i$

$$B(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+\tau} - \bar{x}). \quad (1)$$

де  $n = N - \tau$ ;  $N$  – число точок часового ряду;  $\bar{x}$  – середнє значення часового ряду.

На рис. 3 показані фазові портрети періодичного сигналу, побудовані на псевдофазовій площині при різних часових затримках ( $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$ ). Як видно з рисунка можливий вибір такого значення часової затримки, при якому фазовий портрет на псевдофазовій площині відповідатиме фазовому портрету на фазовій площині (рис. 2, б і рис. 3, б).

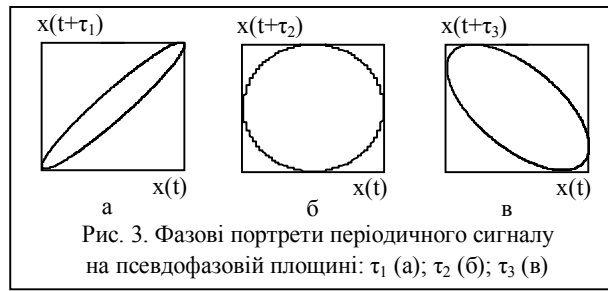


Рис. 3. Фазові портрети періодичного сигналу на псевдофазовій площині:  $\tau_1$  (а);  $\tau_2$  (б);  $\tau_3$  (в)

Таким чином, фазову (псевдофазову) площину можна використовувати для наочного представлення та якісного дослідження властивостей сигналів, які неможливо або важко досліджувати аналітично. Надалі побудову псевдофазової площини будемо використовувати під час аналізу сигналів з виходу фазового детектора, одержаних в результаті експерименту.

Як вже наголошувалося вище, на практиці різні рухи людини певним чином змінюють сигнал на виході фазового детектора, тобто аналізований сигнал є флуктуаційним. Характер флуктуацій визначається характером руху людини, а ступінь флуктуацій може бути описана за допомогою характеристичного коефіцієнта – фрактальної розмірності  $D$ .

Фрактальна розмірність, як правило, є позитивним нецілим числом, що відображає, деяким чином, форму сигналу. При двовимірному представленні сигналу, що приймається, величина фрактальної розмірності лежить у межах  $1,0 < D < 2,0$  [5]. Більшому значенню фрактальної розмірності відповідає велика ступінь флуктуацій (заповнення площини). Для гладких сигналів фрактальна розмірність буде близька  $D = 1,0$ , тобто практично співпадати з топологічною розмірністю лінії, а для порізаних, що заповнюють всю площину сигналів, –  $D = 2,0$  (практично співпадати з топологічною розмірністю площини).

Важливе місце у визначенні фрактальної розмірності  $D$  займає поняття відстані між точками у просторі [5]. Визначаючи міру величини безлічі точок в просторі  $G$ , вибирають деяку пробну функцію  $h(\epsilon) = \gamma(d)\epsilon^d$  – відрізок прямої, квадрат, коло, кулю або куб – і покривають множину, утворюючи міру  $M_d = \sum h(\epsilon)$ . Для прямолінійних відрізків, квадратів і кубів геометричний коефіцієнт, для кіл  $\gamma(d) = \pi/4$  і для сфер  $\gamma(d) = \pi/6$ . У загальному випадку при  $\epsilon \rightarrow 0$  міра  $M_d$  рівна нулю або нескінченності залежно від вибору  $d$ -розмірності міри. Фрактальна розмірність  $D$  множини  $G$  є критична розмірність, при якій міра  $M_d$  змінює своє значення з нуля на нескінченність

$$M_d = \sum \gamma(d)\epsilon^d = \gamma(d)N(\epsilon)\epsilon^d \rightarrow \begin{cases} 0 & \text{якщо } d > D; \\ \infty & \text{якщо } d < D. \end{cases} \quad (2)$$

Значення  $M_d$  при  $d = D$  часто кінцеве, але може бути рівне нулю або нескінченності. Суттєво при якому саме значенні  $d$  величина  $M_d$  змінюється

стрибком. З формули (2) асимптотично витікає, що у межі при малих  $\epsilon$ ,

$$N(\epsilon) \sim 1/\epsilon^D, \quad (3)$$

і можна визначити фрактальну розмірність.

Існують різні методи визначення фрактальної розмірності [4, 5]. На практиці найчастіше при обробці часових рядів використовують метод покриття. Стисло розглянемо порядок розрахунку фрактальної розмірності з використанням даного методу.

Алгоритм визначення фрактальної розмірності методом покриття містить наступні кроки.

1. Задається деяке  $\epsilon$ , потім розбивається часова область існування вихідних даних на квадрати з стороною  $\epsilon$  і підраховується скільки квадратів накривають всі відомі точки (рис. 4). Отримують одне значення  $N(\epsilon)$ .

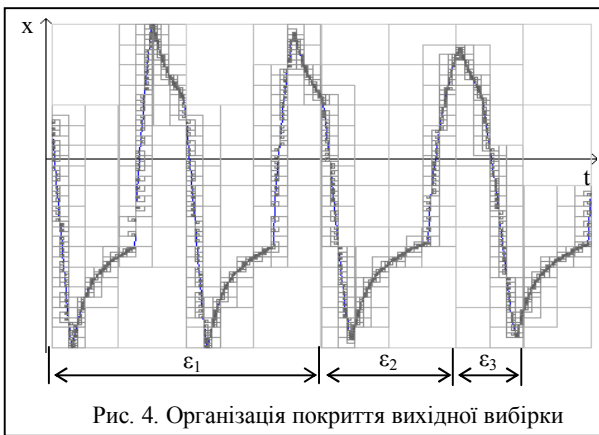


Рис. 4. Організація покриття вихідної вибірки

2. Припустимо, що були проведені розрахунки  $N(\epsilon)$  для різних  $\epsilon$  (на рис. 4 це значення  $\epsilon_1, \epsilon_2 = \epsilon_1/2, \epsilon_3 = \epsilon_1/4$ ). Як впливає з визначення фрактальної розмірності [5], при малих  $\epsilon$  величина  $N(\epsilon)$  повинна поводитися як  $\sim \epsilon^{-D}$ , а у такому разі

$$\log N(\epsilon) = -D \cdot \log \epsilon.$$

Тепер за одержаними даними будується залежність  $\log N(\epsilon)$  від  $\log \epsilon$  (рис. 5).

3. Оцінювання фрактальної розмірності за одержаними даними зводиться до побудови лінійної апроксимації залежності  $\log N(\epsilon)$  від  $\log \epsilon$  виду

$$\log N(\epsilon) = -b \cdot \log \epsilon + C,$$

наприклад, за допомогою методу найменших квадратів (МНК) (рис. 5).



Рис. 5. Визначення фрактальної розмірності

Як оцінка фрактальної розмірності береться  $D = -b$ , тобто кут нахилу прямої МНК.

Надалі розрахунок фрактальної розмірності будемо використовувати під час аналізу сигналів з виходу фазового детектора.

Таким чином, новий метод аналізу структури сигналів з виходу фазового детектора когерентно-імпульсної РЛС передбачає побудову фазових портретів на псевдофазовій площині, що дозволяє здійснити якісну оцінку структури сигналу, а також розрахунок фрактальних розмірностей часових реалізацій сигналів, що дозволить кількісно оцінити форму сигналів.

### Аналіз експериментальних результатів

Для вирішення задачі розпізнавання характеру руху людини скористаємося методом аналізу структури часового ряду з побудовою фазових портретів і розрахунком фрактальних розмірностей.

На рис. 6 наведені часові реалізації сигналів з виходу фазового детектора, одержані експериментально, при зондуванні фону на трасі (а), людини, що йде кроком (б), біжить (в), здійснює перебіг (г), переповзання (д), що стоїть на місці і розмахує руками (е).

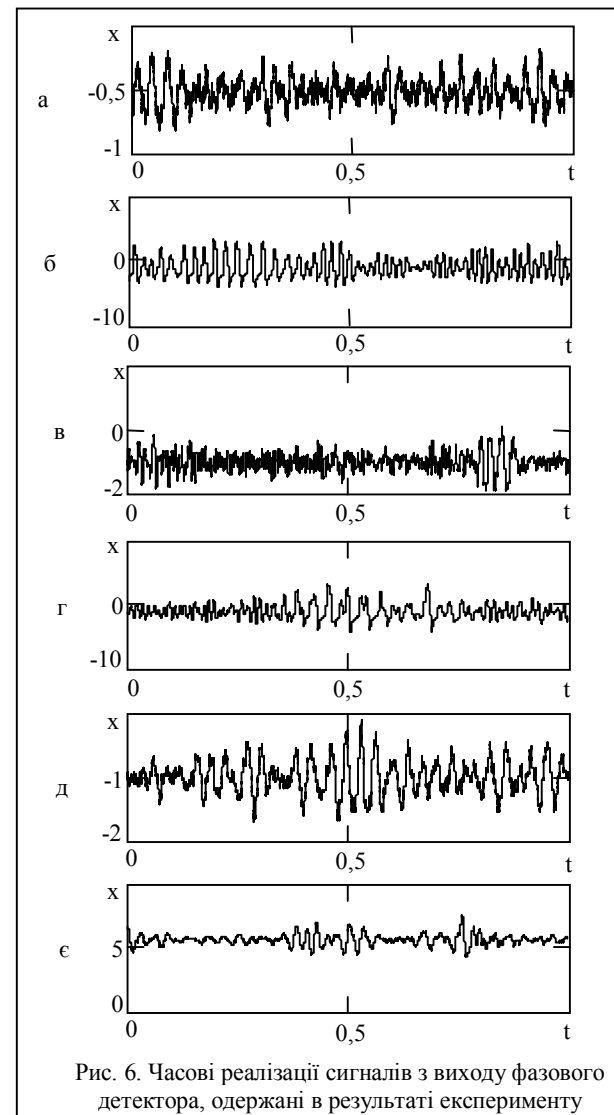


Рис. 6. Часові реалізації сигналів з виходу фазового детектора, одержані в результаті експерименту

Візуальний аналіз вихідних часових рядів показує, що сигнали з виходу фазового детектора змінюються залежно від характеру руху людини, але розпізнавання в цих умовах є важкою задачею, і вимагає високої тренуваності операторів РЛС, крім того приводить до помилок у визначенні характеру руху. Так, сигнал, одержаний при русі людини бігом, практично не відрізняється від фонового сигналу (рис. 6, а, в), а сигнал, одержаний при русі людини перебігом, схожий на сигнал від людини, що стоїть і розмахує руками (рис. 6, г, є). При зондуванні людини, що повзе, сигнали в головних телефонах і на індикаторі системи СРЦ не відрізняються від фонових, і розпізнати таку людину з використанням штатних засобів РЛС неможливо.

На рис. 7 показані фазові портрети сигналів з виходу фазового детектора, побудовані при часовій затримці  $\tau = 50$  точок ряду, що близько першому нулю автокореляційної функції вихідних часових рядів. Автокореляційна функція розраховувалася з використанням виразу (1). Буквені позначення на рис. 7 відповідають позначенням характеру руху людини, що введені на рис. 6.

Аналіз даних рис. 7 показує, що форма фазових портретів має відмітні особливості, що дозволяє здійснити розпізнавання характеру руху людини.

Як видно з рис. 7, фазові портрети людини, що рухається, явно відрізняються від фазового портрета фону. Особливо виділяється фазовий портрет людини, що йде кроком (рис. 7, б), що дозволяє по його формі здійснювати селекцію людини, що йде. Якщо по часовій реалізації сигналу, одержаного при русі людини бігом (рис. 6, в), дуже важко виділити характер руху з фону, то характерний вигляд фазового портрету (рис. 7, в), дозволяє впевнено здійснювати селекцію даного виду руху. Фазовий портрет сигналу, одержаного при русі людини перебігом (рис. 7, г), є суміш фазових портретів фонового сигналу і людини, що йде кроком. Це обумовлено тим, що для перебігу властива зміна характеру руху, спочатку нешвидкий біг (фазовий портрет людини, що йде), потім нерухомий стан людини (фазовий портрет фону). Але вид фазового портрета дозволяє здійснювати селекцію даного виду руху. Як наголошувалося вище розпізнати людину, що повзе, з використанням штатних засобів РЛС неможливо. Використання фазового портрета (рис. 7, д) дозволяє розділити сигнали, одержані від людини, що повзе, і від фону. Крім того, фазовий портрет дозволив виділити сигнал від людини, що стоїть і розмахує руками (рис. 7, є).

Таким чином, використання фазових портретів дозволяє якісно досліджувати властивості сигналів з виходу фазового детектора. Характерні особливості фазових портретів, обумовлені характером руху людини, дозволяють здійснити розпізнавання людини, що йде кроком, що біжить, перебігає, переповзає, а також, що стоїть і розмахує руками.

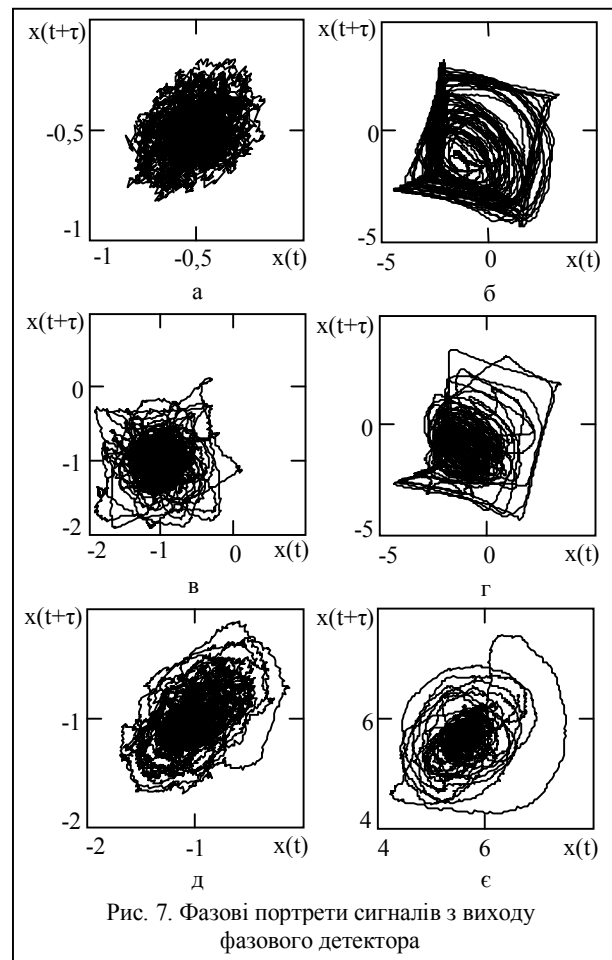


Рис. 7. Фазові портрети сигналів з виходу фазового детектора

Для кількісної оцінки форми сигналу, що залежить від характеру руху людини, проведемо аналіз фрактальних властивостей сигналів з виходу фазового детектора (виходу головних телефонів), одержаних у результаті експерименту.

У табл. 1 наведені чисельні значення фрактальних розмірностей часових реалізацій сигналів, що відповідають розглянутим вище характеристикам руху людини (див. рис. 6). Для розрахунку фрактальної розмірності застосовувався описаний вище метод покриття.

Аналіз даних табл. 1 показує, що величина фрактальної розмірності залежить від зміни характеру руху людини (ступеню флуктуації сигналу), що дозволяє чисельно оцінити фрактальні властивості сигналу з виходу фазового детектора.

Таблиця 1  
Фрактальні розмірності часових реалізацій сигналів

Характер руху людини	Фрактальна розмірність D
Фон	1,5328
Людина, що йде кроком	1,6332
Людина, що біжить	1,5830
Людина, що перебігає	1,5497
Людина, що переповзає	1,4771
Людина, що стоїть і розмахує руками	1,4064

Також як і при використанні фазового портрета, фрактальна розмірність сигналу, одержаного при зондуванні людини, що йде кроком ( $D = 1,6332$ ), суттєво відрізняється від фрактальної розмірності фоновому сигналу ( $D = 1,5328$ ), що дозволяє використовувати фрактальну розмірність для розпізнавання і селекції людини, що йде.

Фрактальні розмірності сигналів, одержані при зондуванні людини, що біжить ( $D = 1,583$ ), і що переповзає ( $D = 1,4771$ ), а також, що стоїть і розмахує руками ( $D = 1,4064$ ) дозволяють розпізнати характер руху людини. Найбільш важким завданням при визначенні характеру руху людини виявилось розподіл сигналів людини, що перебігає, і фоновому сигналу, тому що фрактальні розмірності цих сигналів відрізняються лише на величину  $\Delta D = 0,0169$ .

Таким чином, використання фрактальної розмірності при розпізнаванні і селекції характеру руху людини дозволило виділити недоступні візуальному аналізу приховані закономірності форми сигналу з виходу фазового детектора.

### Висновки

1. Основою розпізнавання і селекції характеру руху людини є розроблений метод аналізу структури сигналів з виходу фазового детектора когерентно-імпульсної РЛС на основі побудови фазових портретів і розрахунку фрактальних розмірностей.

2. Представлення сигналів з виходу фазового детектора у вигляді фазових портретів дозволяє якісно досліджувати властивості сигналів, що одержані в результаті проведення експерименту.

Характерні особливості фазових портретів обумовлені характером руху людини і дозволяють здійснити розпізнавання людини, що йде кроком, що біжить, перебігає, переповзає, а також, що стоїть і розмахує руками.

3. Використання фрактальної розмірності при розпізнаванні і селекції характеру руху людини дозволило виділити недоступні візуальному аналізу приховані закономірності форми сигналу з виходу фазового детектора.

4. При проведенні подальших досліджень доцільно розглянути можливість застосування розробленого методу для розпізнавання і селекції характеру рухів групи людей.

### Список літератури

1. Красюк Н.П., Коблов В.Л., Красюк В.Н. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
2. Радиотехнические системы / Под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.
3. Изделие 1РЛ133. Техническое описание. БД 1.400.009 ТО. – 1974. – 232 с.
4. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров. – М.: Мир, 1990. – 312 с.
5. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
6. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов. Коллективная монография / Под ред. Р.Э. Пащенко. – Х.: ХООО "НЭО "ЭкоПерспектива", 2006. – 348 с.
7. Анализ фрактальных характеристик отраженных радиолокационных сигналов / В.К. Иванов, Р.Э. Пащенко, А.С. Фатеев, А.И. Вовк // Системы обработки информации. – Х.: ХУ ПС? 2007. – Вып. 2 (60). – С. 31-34.
8. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Сов. радио, 1977. – 511 с.
9. Пащенко Р.Э. Основы теории формирования фрактальных сигналов. – Х.: ХООО "НЭО "ЭкоПерспектива", 2005. – 296 с.
10. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence // Dynamical Systems and Turbulence: Lecture Notes in Mathematics. – Heidelberg: Springer-Verlag, 1981. – P. 366-381.

Надійшла до редколегії 30.10.2007

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