

УДК 530.1.537.86+621.396.96

В. І. Воробйов, В. К. Іванов, Т. А. Сутюшев, Р. Е. Пашенко, Д. В. Павлов

СЕЛЕКЦІЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ-ЦІЛЕЙ НА ОБМЕЖЕНО ВІДКРИТИХ ДІЛЯНКАХ МІСЦЕВОСТІ ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ ВИКОРИСТАННІ КОНЦЕПЦІЙ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ

Розглянуто актуальність використання переносних РЛС у бойових порядках елементів оперативного шикуння військ під час проведення спеціальної операції за умови обмеженості кількості військ. Запропоновано комплексне використання концепцій нелінійної динаміки для аналізу структури сигналів когерентно-імпульсної РЛС. Розглянуто можливість використання фазових портретів, перерізів Пуанкаре і фрактальної розмірності для селекції об'єктів, що рухаються.

Постановка проблеми й аналіз літератури.

При виконанні військами певних завдань тактичного рівня для розвідувального забезпечення їхніх дій залишається досить перспективним використання технічних засобів розвідки, і в тому числі радіоелектронної. Особливо доцільним вбачається їхнє використання в умовах, коли не очікується серйозної радіоелектронної протидії з боку противника, наприклад, у ході внутрішнього збройного конфлікту. В умовах недостатності особового складу для проведення масштабних дій вбачається досить ефективним використання переносних наземних радіолокаційних станцій (РЛС) ближньої розвідки з метою прикриття проміжків бойових порядків. Наприклад, використання таких РЛС може бути доцільним для прикриття проміжків бойових порядків підрозділів у ешелоні ізоляції при проведенні спеціальної операції (рис. 1). У першу чергу мова йде про ділянки місцевості, які придатні для зосередження НЗФ перед просочуванням крізь ешелон ізоляції або для його прориву. При проведенні спеціальної операції у прикордонному районі може бути доцільним застосування РЛС у складі мобільних груп Державної прикордонної служби, які будуть діяти спільно з формуваннями внутрішніх військ. Одним із пріоритетних завдань зазначених РЛС є не тільки виявлення рухомих об'єктів (в основному, груп противника, що переміщуються у пішому порядку на несприятливому для засобів розвідки видимого й інфрачервоного діапазону фоні), але і їхнє розпізнавання і, можливо, ідентифікація. Слід зазначити, що граничні дальності виявлення, якими володіють РЛС ближньої розвідки, є задовільними з погляду на достатність часу для прийняття начальником ешелону ізоляції рішення на перегруповування сил і засобів при виявленні РЛС певної загрози.

На сучасному етапі розвитку засобів розвідки наземних цілей (РНЦ) [1] для виконання завдання селекції рухомих цілей найбільше застосування одержали когерентно-імпульсні РЛС, що включають до свого складу системи селекції рухомих цілей (СРЦ) [2 – 4]. Застосування систем

СРЦ у РЛС РНЦ дозволяє ефективно виділяти об'єкти, що рухаються, а також за частотою звуку в головних телефонах здійснювати їхнє розпізнавання (людина, автомобіль і т. д.) за швидкістю (частотою Доплера) [3]. Однак при виділенні об'єктів, що рухаються, на обмежено відкритих ділянках місцевості виникають труднощі, пов'язані з тим, що сигнали, відбиті від чагарнику, дерев і т. д., мають свій набір частот Доплера (обумовлений швидкістю вітру й інших природних факторів). Це спричиняє маскуванню

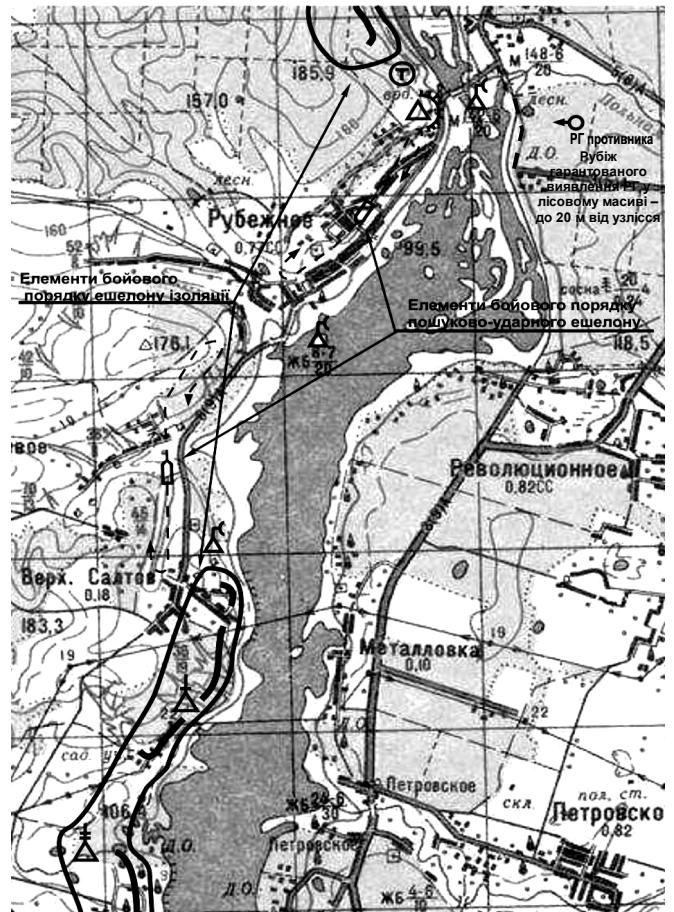


Рис. 1. Приклад можливого використання РЛС наземної розвідки підрозділами в ешелоні ізоляції (наведений з прив'язуванням до району проведення експериментальних досліджень РЛС ближньої розвідки)

корисного сигналу й утрудняє селекцію об'єктів, що рухаються, у таких умовах.

У цій статті аналізуються сигнальні вибірки з виходу фазового детектора (вхід головних телефонів оператора РЛС) когерентно-імпульсної РЛС РНЦ сантиметрового діапазону [4], отримані експериментально при зондуванні рухомих об'єктів. При цьому аналізована вибірка відбиває накопичені за певний проміжок часу (одну секунду) низькочастотні коливання, модульовані частотою Доплера. Рух об'єктів певним чином проявляється в аналізованому сигналі, змінюючи його за амплітудою, частотою, фазою й формою. Вбачається актуальним різнобічний аналіз складної форми сигналів з виходу фазового детектора і її використання як ознаки селекції об'єктів на обмежено відкритих ділянках місцевості.

В останні роки перспективним напрямком у дослідженні різноманітних структур стає використання нових математичних методів, заснованих на застосуванні нелінійних процедур (реконструкція атракторів, фрактальний аналіз, вейвлет аналіз) [5 – 7].

Мета статті – розглянути можливість селекції рухомих об'єктів на обмежено відкритих ділянках місцевості за даними когерентно-імпульсної РЛС розвідки наземних цілей з використанням фазових портретів, перерізів Пуанкаре та фрактальної розмірності.

Опис експерименту. Експеримент проводився на базі навчального центру Академії внутрішніх військ МВС України.

Завдання одержання сигналів з виходу фазового детектора при зондуванні групи людей на фоні вирішувалося апаратно-програмним способом і полягало у реєстрації сигналів і їхній підготовці до обробки. Основними елементами експериментальної установки були когерентно-імпульсна РЛС РНЦ 1РЛ133 сантиметрового діапазону (простий сигнал, $\lambda = 1,8$ см, $\tau_i = 0,4$ мкс) [4], цифровий осцилограф (аналогово-цифровий перетворювач – АЦП) і персональний комп'ютер (ПЕОМ). Структурна схема експериментальної установки зображена на рис. 2.

Сигнали з виходу фазового детектора (входу головних телефонів) РЛС за допомогою цифрового осцилографа (частота дискретизації АЦП $f_d = 20$ МГц, розрядність 1024 дискрет) перетворювали в цифрові коди і зберігалися в пам'яті ПЕОМ для подальшого аналізу. Отриманий цифровий код за допомогою відповідного програмного забезпечення цифрового осцилографа подавався у вигляді

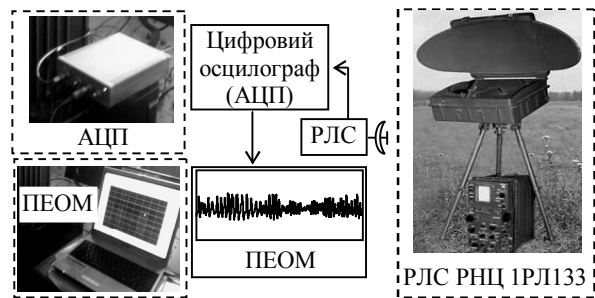


Рис. 2. Структурна схема експериментальної установки

текстового файлу, доступного для різних комп'ютерних математичних пакетів.

При проведенні експерименту положення діаграми спрямованості за азимутом та кутом місця фіксувалося (здавалася траса зондування, яка охоплювала район зосередження груп "противника"). Запис здійснювався при настроюванні стробу дальності радіолокаційної станції на певну дистанцію на трасі зондування, де перебувала рухома група людей. Для досліджень було вибрано трасу зондування, що зображена на рис. 3. На трасі зондування група імітації дій противника рухалася в лісі на різних відстанях від краю лісу, а також на березі за очеретами. Дальність від РЛС до межі лісу і берега ріки становила 650 м. Зондування



Рис. 3. Траса зондування групи

здійснювалося при русі зазначеної групи у глибокому лісі, а також при виході з лісу. При цьому візуально група на фоні лісу й очеретів не спостерігалася.

Виділення рухомої групи на фоні лісу здійснювалося оператором РЛС на убудованому індикаторі системи СРЦ і за звуком в штатних головних телефонах. Крім того, сигнали із входу головних телефонів подавалися на цифровий осцилограф і записувалися на жорсткий диск ПЕОМ. Зафіксовані в цифровому вигляді реалізації сигналів надалі використовувалися для аналізу його форми. Аналіз інформації,

відображуваної на індикаторі системи СРЦ РЛС, при зондуванні лісу (фона) на дальності 650 м і групи у лісі, показав, що з використанням даного індикатора здійснити селекцію групи, що рухається, на фоні лісу неможливо, тому що сигнали на індикаторі не розрізняються. Сигнали на вході головних телефонів при зондуванні фону і групи мають деякі відмінності, однак форми сигналів розрізняються незначно, а селекція групи, що рухається, на фоні лісу є досить складним завданням і вимагає високого рівня підготовки оператора РЛС.

Таким чином, селекція рухомої групи на фоні лісу з використанням штатних засобів РЛС РНЦ є складним завданням. Відмінність форми аналізованих сигналів може бути використана для автоматизації процесу селекції рухомих цілей.

Аналіз структури сигналів при комплексному використанні концепцій нелінійної динаміки. Деякі важливі властивості реалізації сигналів, які неможливо або важко досліджувати аналітично, піддаються наочному поданню і якісному дослідженню за допомогою концепцій нелінійної динаміки [фазової площини і відображень (перерізів) Пуанкаре].

Можливість аналізу радіолокаційних сигналів з використанням фазової площини описано у [8, 9]. У загальному випадку фазову площину можна визначити як абстрактну математичну площину, на якій осями координат є стан системи і її похідна. Оскільки площина має два виміри x і y , то ясно, що метод фазової площини може бути застосований до аналізу руху систем, які описуються диференціальними рівняннями другого порядку. У цьому випадку рішення диференціального рівняння можна одержати не інтегруванням, а його поданням на площині із прямокутною системою координат. Таким чином, якщо початкове рівняння системи є рівнянням другого порядку, то як змінну y можна вибрати швидкість зміни координати x , тобто $y = dx/dt$.

Для аналізу стану динамічної системи, у якій відомий тільки один параметр (якщо неможливо знайти першу похідну сигналу), можна використати метод побудови псевдофазової площини з тимчасовою затримкою [5], заснований на теоремі Такенса [10]. Для аналізу таких сигналів (систем) будується залежність сигналу від його ж величини в інший момент часу, що відстає або випереджає даний момент на постійну величину τ : $[x(t), x(t + \tau)]$. Сигнал $x(t + \tau)$ пов'язаний з $x(t)$ і результат має ті ж властивості, що й при використанні дійсної фазової площини. Підходи до вибору τ описані у [5].

З концепцією фазової площини тісно пов'язана ще одна основна концепція нелінійної динаміки – відображення (переріз) Пуанкаре. Припустимо, що аналізується структура (форма) сигналу, що відображена на псевдофазовій площині. Якщо замість того, щоб безупинно стежити за рухом точки по фазовому портрету, фіксувати характер зміни сигналу тільки в окремі моменти, то рух буде представлено послідовністю точок на псевдофазовій площині. Якщо моменти вибірки в часі відповідають певному правилу, то це відображення називається відображенням (перерізом) Пуанкаре [5].

Далі побудову фазової площини і перерізів Пуанкаре будемо використовувати при аналізі сигналів з виходу фазового детектора, отриманих у результаті експерименту.

Як зазначалося вище, на практиці різні рухи людини певним чином змінюють форму сигналу на виході фазового детектора. Ступінь зрізаності (форма) сигналу може бути оцінена за допомогою фрактальної концепції нелінійної динаміки, основу якої становить поняття фрактальної розмірності D .

Фрактальна розмірність, як правило, є ненегативним нецілим числом, що відбиває деяким чином форму сигналу. При двовимірному поданні прийнятого сигналу величина фрактальної розмірності лежить у межах $1,0 < D < 2,0$ [6]. Більшому значенню фрактальної розмірності відповідає більший ступінь зрізаності сигналу (складності форми). Для гладких сигналів фрактальна розмірність буде близька до $D = 1,0$, тобто практично збігатися з топологічною розмірністю лінії, а для порізаних, таких, що заповнюють всю площину сигналів, – $D = 2,0$ (практично збігатися з топологічною розмірністю площини).

Існують різні методи визначення фрактальної розмірності [5, 6]. На практиці найчастіше при обробці тимчасових рядів використовують метод покриття. Коротко розглянемо порядок розрахунку фрактальної розмірності з використанням даного методу.

Алгоритм визначення фрактальної розмірності методом покриття містить такі кроки.

1. Задається деяке ε , розбивається тимчасова область існування вихідних даних на квадрати зі стороною ε і підраховується, скільки квадратів накривають всі відомі точки (див. рис. 4). Виходить одне значення $N(\varepsilon)$.

2. Припустимо, що були проведені обчислення $N(\varepsilon)$ для різних значень ε (на рис. 3 це значення $\varepsilon_1, \varepsilon_2 = \varepsilon_{1/2}, \varepsilon_3 = \varepsilon_{1/4}$). Як впливає з визначення

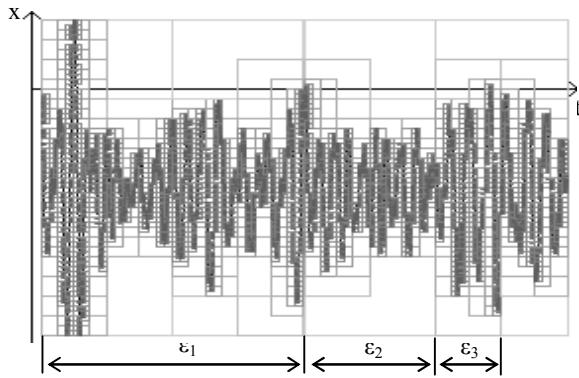


Рис. 4. Організація покриття вихідної вибірки фрактальної розмірності [6], при малих значеннях ε число елементів покриття $N(\varepsilon)$ має поводитися як $\sim e^{-D}$, а в такому випадку $\log N(\varepsilon) = -D \cdot \log \varepsilon$. Тепер за отриманими даними будується залежність $\log N(\varepsilon)$ від $\log \varepsilon$ (рис. 5).

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

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

наприклад, за методом найменших квадратів (МНК) (рис. 5). Як оцінка фрактальної розмірності береться $D = -b$, тобто кут нахилу прямої МНК.

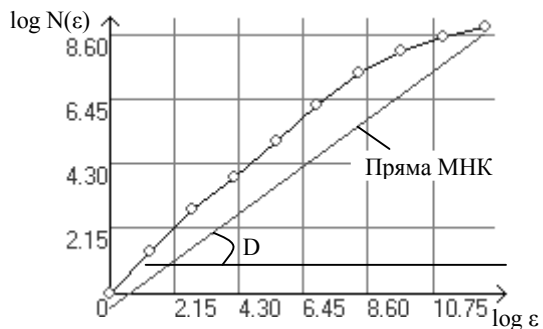


Рис. 5. Визначення фрактальної розмірності

Таким чином, фрактальну розмірність можна використати для кількісної оцінки форми сигналів. Надалі розрахунок фрактальної розмірності будемо використовувати при аналізі сигналів з виходу фазового детектора.

Селекція групи, що рухається, на фоні лісу за даними експерименту. Для вирішення завдання селекції групи людей, що рухається, скористаємося методом аналізу структури тимчасового ряду з побудовою фазових портретів, перерізів Пуанкаре і розрахунком фрактальних розмірностей.

На рис. 6 наведені тимчасові реалізації сигналів з виходу фазового детектора, отримані експериментально, при зондуванні: лісу на трасі (а); групи людей, що пересуваються у лісі на

відстані 20 – 25 м від краю лісу (від берега) (б); що пересуваються у лісі на відстані 10 – 12 м від краю лісу (в); що виходять з лісу (на березі, на фоні очеретів) (г); групи людей, що пересуваються у лісі перебіжками на відстані 10 – 12 м від берега (д); що виходять з лісу перебіжками (на фоні очеретів) (е).

Візуальний аналіз вихідних тимчасових рядів показує, що сигнали з виходу фазового детектора змінюються залежно від відстані, на якій перебуває група людей від краю лісу, а також від характеру їхнього руху. Однак селекція людей, що рухаються у лісі на відстані 20 – 25 м (рис. 6, б), і особливо перебіжками на відстані 10 – 12 м від краю лісу (рис. 6, д), за сигналами головних телефонів є важким завданням, тому що рівень і форма цих сигналів практично не розрізняються. Виділення людей у цих умовах потребує високої тренованості оператора РЛС.

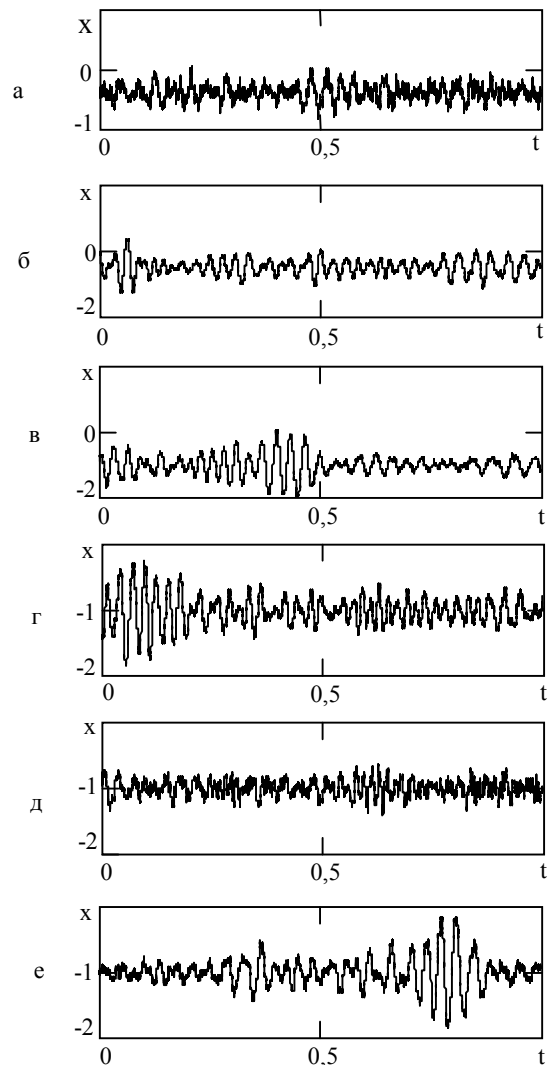


Рис. 6. Часові реалізації сигналів з виходу фазового детектора, отримані у результаті експерименту

Для автоматизації процесу селекції рухомих цілей на фоні лісу проведемо аналіз форми тимчасових реалізацій сигналів з виходу фазового детектора з використанням фазових портретів і фрактальної розмірності.

На рис. 7 показані фазові портрети сигналів з виходу фазового детектора, побудовані при тимчасовій затримці $\tau = 50$ точок тимчасового ряду, що близько до першого нуля автокореляційної функції вихідних тимчасових рядів. Літерні позначення на рис. 7 відповідають позначенням, уведеним на рис. 6.

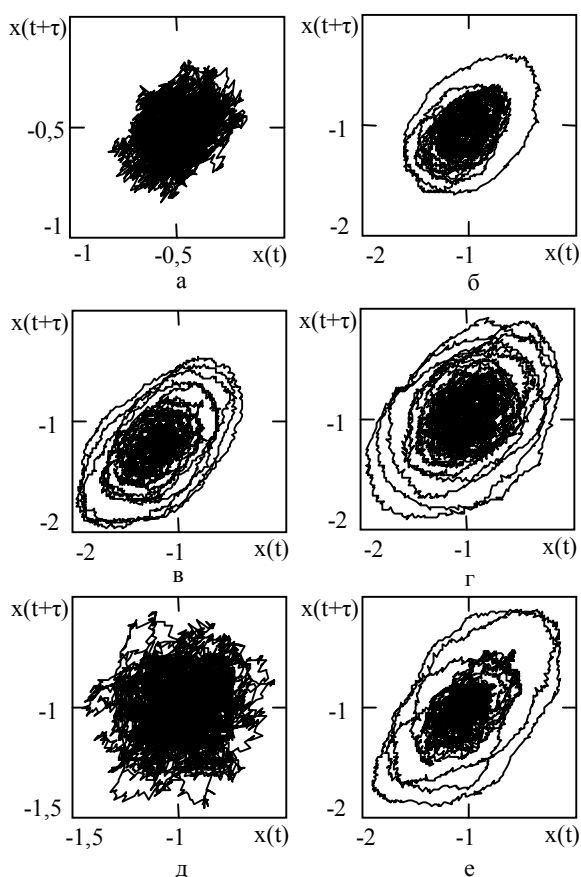


Рис. 7. Фазові портрети сигналів з виходу фазового детектора

Аналіз даних рис. 7 свідчить про те, що форми фазових портретів мають відмінні риси. Як видно на рис. 7 (б, в, г), фазові портрети групи людей, що рухається на різних відстанях від краю лісу, схожі за формою. Однак при наближенні групи до краю лісу фазові портрети розширюються, що обумовлено більшими амплітудними змінами вихідної вибірки. Відмінність форми фазових портретів групи людей, що рухається у лісі (рис. 7, б, в, г), від фонових (рис. 7, а) дозволяє здійснити їхню селекцію.

Особливо цікавий фазовий портрет групи людей, що пересуваються перебіжками на відстані 10 – 12 м від краю лісу (рис. 7, д). По

тимчасовій реалізації сигналу, отриманого експериментально, здійснити селекцію групи людей, що рухаються перебіжками, з використанням штатних засобів РЛС неможливо. Використання фазового портрета дозволяє відокремити цей сигнал від фоновому.

Порівняння рис. 7, д (люди, що виходять з лісу на фоні очеретів) і рис. 7, е (люди, що виходять перебіжками з лісу на фоні очеретів) показує, що очерет практично не чинить впливу на форму фазових портретів, які явно відрізняються від фазових портретів фону (рис. 7, а). Це дозволяє здійснювати селекцію групи людей на фоні очерету.

Розглянемо, як змінюється структура перерізів Пуанкаре сигналів з виходу фазового детектора (рис. 8) при зондуванні групи людей на фоні лісу. Літерні позначення на рис. 8 відповідають позначенням, уведеним на рис. 6.

Випадковість характеру відбитого від лісу (фону) сигналу спричиняє структуру перерізу

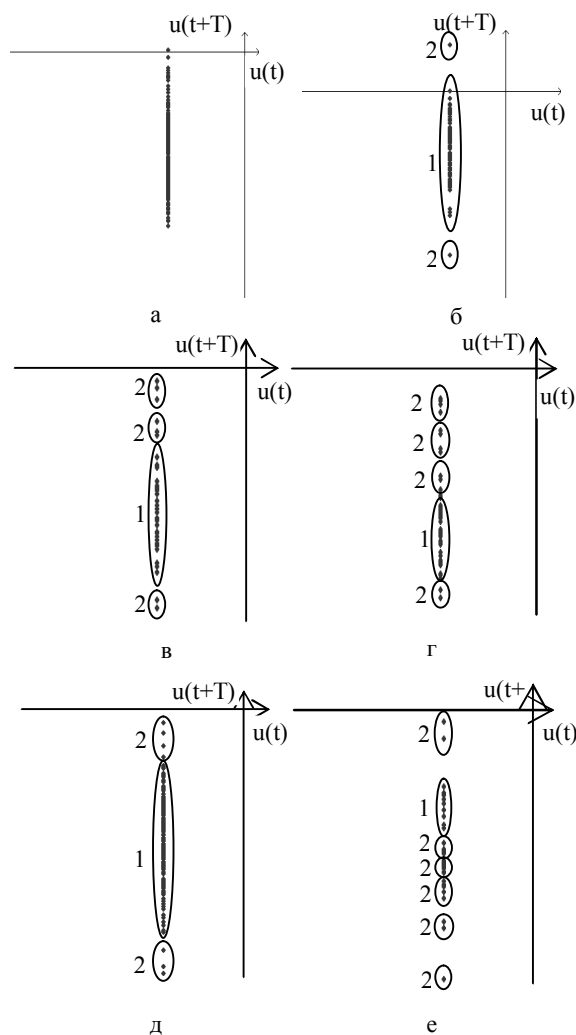


Рис. 8. Перерізи Пуанкаре сигналів з виходу фазового детектора

Т а б л и ц я 1

Фрактальні розмірності тимчасових реалізацій сигналів

Характер руху групи людей	Фрактальна розмірність D
Фон, ліс на трасі зондування	1,5675
Група людей на відстані 20 – 25 м від краю лісу	1,4686
Група людей на відстані 10 – 12 м від краю лісу	1,4370
Група людей на краю лісу (на фоні очеретів)	1,4314
Група людей, що пересуваються перебіжками на відстані 10 – 12 м від краю лісу	1,6161
Група людей, що пересуваються перебіжками на фоні очеретів	1,3569

Для розрахунку фрактальної розмірності застосовувався описаний вище метод покриття.

Аналіз даних табл. 1 свідчить про те, що величина фрактальної розмірності сигналу залежить від відстані до краю лісу і характеру руху групи людей. Так, при поглибленні в ліс величина фрактальної розмірності сигналу з виходу фазового детектора збільшується з $D = 1,4314$ (люди на краю лісу) до $D = 1,4686$ (люди на відстані 20 – 25 м від краю лісу), тобто спостерігається тенденція збільшення фрактальної розмірності до фоновій. Це обумовлено тим, що при русі людей у глиб лісу сигнал більшою мірою визначається фоном, ніж рухом людей.

Фрактальні розмірності сигналів, отримані при зондуванні групи людей, що пересуваються перебіжками ($D = 1,6161$ і $D = 1,3569$), відрізняються від фонових ($D = 1,5675$), що дозволяє здійснити селекцію. Найбільш важким завданням селекції виявилось відокремлення фоновому сигналу від сигналу групи людей, що пересуваються перебіжками на відстані 10 – 12 м від краю лісу, тому що фрактальна розмірність цього сигналу виявилася більш фоновію.

Таким чином, використання фазових портретів, перерізів Пуанкаре і фрактальної розмірності дозволяє створити систему СРЦ РЛС РНЦ, що базується на обліку зміни форми сигналу на виході фазового детектора.

Висновки

Застосування РЛС у процесі виконання завдань розвідувального забезпечення у службово-бойовій діяльності внутрішніх військ може бути доцільним, особливо в умовах, коли

Пуанкаре фону (рис. 8, а) у вигляді практично безперервного набору точок, витягнутих уздовж осі $x(t+T)$.

Структура перерізу Пуанкаре сигналу при русі людей у лісі на відстані 20 – 25 м від краю (рис. 8, б) має дві області, обумовлені фоном (перша область) і рухом людей (друга область). Перша область являє собою згрупований набір точок, витягнутих уздовж осі $x(t+T)$, що пояснюється більшим впливом лісу на відбитий сигнал, друга область при цьому містить одиниці точок.

У міру наближення людей до краю лісу структура перерізу Пуанкаре змінюється: перша область (згрупований набір точок) зменшується в розмірах (див. рис. 8, в, г), а у другій області з'являються підобласті. На рис. 8, в з'явилася одна підобласть, обумовлена рухом людей, а на рис. 8, г – дві підобласті.

Переріз Пуанкаре сигналу з виходу фазового детектора при русі людей у лісі перебіжками на відстані 10 – 12 м від краю (рис. 8, д) також має дві області, обумовлені фоном (перша область) і рухом людей (друга область). На відміну від перерізу Пуанкаре, отриманого при русі людей кроком у лісі на відстані 20 – 25 м від краю (рис. 8, б), даний переріз характеризується більшою довжиною першої області, а у другій області з'являється більша кількість точок. Однак структура перерізу Пуанкаре групи людей, що рухається у лісі, відрізняється від перерізу фоновому сигналу, що дозволяє виділити людей у лісі. При виході людей перебіжками з лісу структура перерізу Пуанкаре сигналу з виходу фазового детектора (рис. 8, е) змінюється подібно до структури, показаної на рис. 8, г (одна перша область і багато других). Однак кількість точок у других областях різна, що обумовлено, швидше за все, характером руху людей.

Таким чином, використання фазових портретів і перерізів Пуанкаре дає змогу якісно досліджувати властивості сигналів з виходу фазового детектора, а характерні риси форми фазових портретів і структури перерізів Пуанкаре дозволяють здійснити селекцію групи людей на фоні лісу.

Для кількісної оцінки форми сигналів з виходу фазового детектора (виходу головних телефонів), отриманих у результаті експерименту, проведемо аналіз їх фрактальних властивостей.

У табл. 1 наведені чисельні значення фрактальних розмірностей тимчасових реалізацій сигналів, що відповідають розглянутим вище умовам (див. рис. 6).

застосування засобів розвідки видимого й інфрачервоного діапазону за умов обстановки є неможливим. Наприклад, за допомогою РЛС наземної розвідки можливе перекриття проміжків у ешелоні ізоляції, які зумовлені недостатністю особового складу для суцільного заповнення смуги ізоляції під час проведення спеціальної операції.

Наразі існує можливість модернізації існуючих зразків РЛС наземної розвідки у напрямку аналізу структури сигналу з виходу фазового детектора. Подання сигналів з виходу фазового детектора у вигляді фазових портретів і перерізів Пуанкаре дозволяє якісно досліджувати їх властивості, а характерні риси форми фазових портретів і структури перерізів Пуанкаре дають можливість здійснити селекцію групи людей на обмежено відкритих ділянках місцевості.

У процесі подальших досліджень доцільно розглянути можливість комплексного використання концепцій нелінійної динаміки для селекції інших рухомих об'єктів на фоні різних підстильних поверхонь.

Список використаних джерел

1. Лифанов Ю. С. Направления развития современных радиолокационных средств и систем разведки наземных целей. Ч. 3. Наземные РЛС наблюдения за полем боя / Ю. С. Лифанов, В. Н. Саблин, А. Н. Федоринов, В. И. Шапошников // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – № 7. – С. 3 – 9.

2. Бакулев П. А. Методы и устройства селекции движущихся целей / П. А. Бакулев, В. М. Степин. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.

3. Радиотехнические системы / под ред. Ю. М. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.

4. Изделие 1РЛ133. Техническое описание. БД 1.400.009 ТО. – 1974. – 232 с.

5. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров / Ф. Мун. – М.: Мир, 1990. – 312 с.

6. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

7. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: монография / под ред. Р. Э. Пашенко. – Х.: ХООО “НЭО “ЭкоПерспектива”, 2006. – 348 с.

8. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. – М.: Сов. радио, 1977. – 511 с.

9. Пашенко Р. Э. Основы теории формирования фрактальных сигналов / Р. Э. Пашенко. – Харьков: ХООО “НЭО “ЭкоПерспектива”, 2005. – 296 с.

10. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. //Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics, edited by D. A. Rand L. S. Young. – Heidelberg: Springer-Verlag, 1981. P. 366–381.

Стаття надійшла до редакції 24.03.2010 р.