

ШЛЯХИ ПОЛІПШЕННЯ ЯКІСНИХ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ОБ'ЄКТІВ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ В ІСНУЮЧИХ ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ РОЗПІЗНАВАННЯ ОПЕРАТИВНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

В статті розглянуті шляхи і методи поліпшення якісних ідентифікаційних показників об'єктів радіолокаційного моніторингу в існуючих та перспективних системах розпізнавання, за рахунок виміру їх інформативних ознак з використанням сучасних надрозрізнявальних методів цифрового спектрального аналізу.

Ключові слова: ознака, об'єкт розпізнавання, радіотехнічна система.

Підвищення ефективності функціонування радіотехнічних систем розпізнавання (РТСР) неможливо без наявності оперативної і якісної інформації про об'єкти радіолокаційного моніторингу (ОРЛМ). Вирішенням проблеми виміру найбільш інформативних ідентифікаційних ознак може стати застосування багатопозиційних системи радіолокаційного моніторингу з синтезування апертури антени (БПРСА).

Особливість БПРСА полягає в тому, що окремі елементи в її складі функціонально пов'язані між собою, що дозволяє з високою ефективністю вирішувати завдання виявлення ОРЛМ.

Концепція побудови БПРСА ґрунтується на використанні максимуму корисної інформації за рахунок спостереження об'єктів під різними кутами, на різних частотах, з різними поляризаціями. При цьому сама система може бути змішаного базування і містити в собі приймачі і передавачі, розташовані на космічних (мікросупутники), авіаційних (безпілотні літальні апарати), наземних і морських носіях. Одним з найбільш важливих принципів виміру ідентифікаційних ознак ОРЛМ є використання максимального числа доступних сигналів, які відбиваються від поверхні об'єкту, у тому числі і сигналів інших передавачів, що підвищує інформативність отриманих даних при мінімальних витратах [1].

Особливість БПРСА по відношенню до моностатичних систем полягає в тому, що окремі елементи в її складі функціонально пов'язані між собою і призначені для вирішення певних завдань. Основні елементи у складі БПРСА - це пункти випромінювання, прийому і обробки інформації, а також пункти передачі даних по каналах зв'язку.

По просторовій конфігурації БПРСА можуть бути розділені на:

- системи з великою базою (відстань між окремими елементами істотно більше довжини хвилі);
- системи з середньою і малою базою;
- системи з постійною відносною просторовою конфігурацією (відстань між окремими елементами БПРСА постійна в часі);
- системи зі змінною відносною просторовою конфігурацією (відстань між окремими елементами БПРСА змінюється в часі).

Ці визначення в основному відносяться до пунктів передачі і прийому інформації, оскільки саме їх просторова конфігурація визначає основні характеристики БПРСА.

За способом вилучення інформації багатопозиційні системи можна розділити на:

- активні системи (приймальні і передавальні пункти поєднані в просторі);
- напівактивні системи (приймальні і передавальні елементи рознесені в просторі, причому немає поєднаних приймачів і передавачів);
- пасивні системи (у складі БПРСА є присутніми тільки пункти прийому інформації);
- змішані системи (у складі БПРСА є частина поєднаних в просторі пунктів випромінювання і прийому інформації, частина приймальних і/або передавальних пунктів, не поєднаних між собою).

За місцем базування БПРСА можна розділити на системи космічного, авіаційного, наземного, морського і змішаного базування.

Багатопозиційна радіолокаційна система з синтезуванням апертури антени, створена на підставі розроблених методів оптимальної спільної обробки, має усі переваги існуючих радіолокаційних систем, функціонує у будь-яку пору року, вдень і вночі, в складних метеорологічних умовах, за наявності опадів, хмарності, туману і т. ін. Окрім цього, БПРСА має ряд істотних переваг по відношенню до однопозиційних систем:

- висока точність картографування поверхні за рахунок спільної обробки результатів, отриманих різними бістатичними парами;

- можливість тривалішого спостереження за окремими ділянками поверхні (окремими об'єктами), частіший моніторинг одних і тих же ділянок поверхні - висока оперативність отримання інформації;

- більш високу роздільну здатність радіолокаційних зображень при заданому відношенні сигнал/шум, у порівнянні з аналогічними однопозиційними системами;

- можливість картографування з мінімальним розміром зон затінювання за рахунок оптимізації просторової конфігурації і алгоритмів спільної обробки;

- більш висока надійність і достовірність інтерпретації радіолокаційних даних, за рахунок обробки інформації отриманої на різних кутах, поляризаціях, частотах;

- висока імовірність правильного виявлення точкових і протяжних об'єктів при низькій імовірності неправдивої тривоги навіть за умови затінювання цих об'єктів для деяких елементів системи;

- збільшення області огляду радіолокаційної системи аж до моніторингу усієї поверхні Землі в реальному масштабі часу як за рахунок збільшення числа радіолокаційних супутників, так і за рахунок збільшення області огляду кожного супутника при збереженні однозначності вимірів;

- висока розрізнявальна спроможність і точність побудови цифрових карт рельєфу поверхні з можливістю визначення зон затінювання;

- можливість розгортання багатобазових інтерферометричних систем, які дозволяють здійснювати побудову топографічних карт з високою роздільною здатністю і великим інтервалом однозначних вимірів за рахунок використання різних несучих частот;

- можливість побудови тривимірних радіолокаційних зображень природних і штучних об'єктів за рахунок обробки даних, отриманих з різних ракурсів;

- більш ефективно виявлення і супровід об'єктів, що рухаються з широким діапазоном швидкостей в різних напрямках, за рахунок спостереження під різними кутами, з різних відстаней;

- можливість використання ряду режимів радіолокаційної зйомки недоступних або неефективних в моностатичних конфігураціях;

- можливість використання мікросупутників і наносупутників, що дозволяють істотно зменшити вартість системи в цілому зі збереженням високих якісних показників її функціонування;

- низька вартість виготовлення одного носія внаслідок їх технологічної повторюваності;

- можливість використання безперервних сигналів для моноапертурних РСА, що дозволяє істотно понизити вимоги до характеристик потужності передавальних елементів, використати шумоподібні і ширококугові/надширококугові сигнали;

- БПРСА володіє високою реконфігурацією, тобто можливістю зміни параметрів спостереження (взаємного просторового положення і напрямку векторів швидкості, частотного діапазону, поляризації, законів модуляції сигналів) і алгоритмів обробки з метою найбільш ефективного рішення поставлених завдань;

- можливість оптимізації просторової конфігурації дозволяє зменшити вимоги до енергетичного потенціалу БПРСА, використати ансамблі квазіортогональні, неортогональні і навіть однакові сигнали при збереженні високої якості рішення завдань радіолокаційного дистанційного зондування;

- висока завадозахищеність по відношенню до природних і штучних шумових процесів дозволяє здійснювати радіолокаційне дистанційне зондування при несприятливій обстановці в умовах дії перешкод;

- висока живучість - система здатна ефективно вирішувати завдання радіолокаційного дистанційного зондування навіть при виході з ладу ряду її елементів.

Проте БПРСА властиві, такі недоліки, як необхідність взаємної часової і фазової синхронізації, необхідність використання високопродуктивних обчислювальних пристроїв і визначення взаємних векторів положення, але на цьому етапі розвитку техніки і технології перераховані недоліки можуть бути усунені. Тому враховуючі всі переваги БПРСА їх застосування дозволить значно підвищити якісні характеристики РТСР, а саме оперативність, точність та вірогідність ідентифікації ОРЛМ.

Відомо, що найбільш інформативними ознаками розпізнавання є ознаки радіолокаційних далекомірних портретів (РЛДП) ОРЛМ комбінацій [2].

Цифрами на діаграмі, що приведена на рис. 1, позначені: 1 – нормовані поляризаційні ознаки; 2 – двочастотний сигнал; 3 – РЛДП при ширині спектру 10 МГц; 4 – амплітудна ознака; 5 – РЛДП при ширині спектра 30 МГц; 6 – спектр роторної модуляції; 7 – 3 елемента ПМР; 8 – 5 елементів ПМР; 9 – РЛДП при ширині спектру 60 МГц; 10 – траєкторна ознака; 11 – РЛДП при ширині спектра 100 МГц; 12 – поєднання РЛДП з шириною спектра 30 МГц, з поляризаційними ознаками і траєкторними ознаками; 13 – поєднання РЛДП з шириною спектра 100 МГц, з амплітудними і траєкторними.

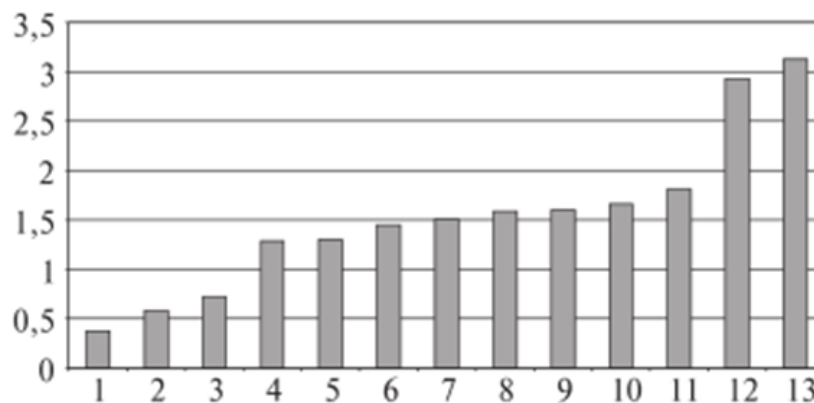


Рис. 1 Інформативність різних ознак розпізнавання і їх комбінацій

Як видно з приведеної діаграми (рис. 1), найбільшу інформативність мають амплітудні і траєкторні ознаки розпізнавання, за умови їх спільного застосуванні з РЛДП. При цьому ширина спектра зондуючого сигналу має бути не менше ніж 100 МГц. Це пояснюється тим, що в РЛДП присутня інформація про розмір ОРЛМ, кількість локальних джерел вторинного випромінювання на ньому, відстаней між ними, їх амплітуди і т. ін.[3].

Виходячи з цього запропоновано вимірювати такі РЛДП за допомогою сучасних методів цифрового спектрального аналізу, які на відміну від класичного спектрального перетворення по Фур'є дають суттєву перевагу в розрізненні за частотою (дальністю).

Відомо, що застосування сучасних методів цифрового спектрального аналізу (ЦСА) за умови високого відношення сигнал/шум дозволяє у декілька разів підвищити розрізняльну здатність за частотою [3, 4]. Наприклад, метод Кейпона в порівнянні з класичним спектральним аналізом по Фур'є в К разів покращує розрізняльну здатність за двома рівнопотужними гармоніками

$$\hat{E} = \frac{1}{1,44 \sqrt{\frac{2\gamma - 1}{q^2}}} \quad (1)$$

де γ - критерій розрізнення. Для релеєвського критерію ($\gamma = 2$). Формула (1) емпірично виведена нашим співвітчизником, професором Леховицьким Д.І.

Більші значення K можуть бути отримані використовуючи інші методи надрозрізнення при певному збільшенні часу спостереження за об'єктом. Проте, в реальній обстановці локальні джерела вторинного випромінювання ОРЛМ, що розрізняються, можуть мати не рівнозначні за потужністю відбиті від них сигнали і час їх спостереження гранично обмежений. Отже важливо показати особливості поведінки методів ЦСА при вимірі РЛДП об'єктів спостереження саме в таких умовах.

Проведені експериментальні дослідження дозволили практично виміряти K для методу Кейпона (2) та методу тепловий шум (3) і порівняти їх з теоретичними розрахунками [5].

$$S(\Omega) = [X^*(\Omega) \cdot \Psi \cdot X(\Omega)]^{-1}, \quad (2)$$

$$S(\Omega) = [X^*(\Omega) \cdot \Psi^2 \cdot X(\Omega)]^{-1}, \quad (3)$$

де $X(\Omega) = \{1, e^{-j\Omega\Delta t}, e^{-j2\Omega\Delta t}, \dots, e^{-j(M-1)\Omega\Delta t}\} = \{x_i(\Omega)\}$, $i = \overline{1, M}$ - M -мірний вимірвальний вектор огляду; $\Psi = \{w_{ij}\} = \Phi^{-1}$, $i, j = \overline{1, M}$ - $M \times M$ ермітова матриця, зворотна кореляційній матриці $\Phi = \{f_{ij}\} = \overline{Y \cdot Y^*}$, $i, j = \overline{1, M}$ - кореляційна матриця M -мірного вектора відліків комплексних амплітуд $Y = \{y_i\}$, $i = \overline{1, M}$, аналізованого процесу; Ω -поточне значення частоти; знак (*) і риска зверху - символи ермітового сполучення і статичного усереднення відповідно.

На рис. 2 наведені графіки залежностей K від q для методів Кейпона і тепловий шум.

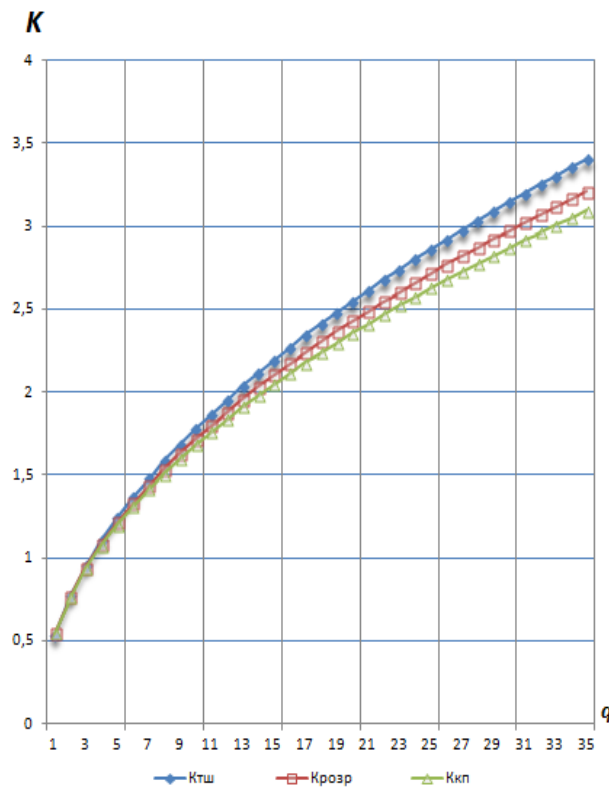


Рис. 2. Графіки залежностей K від q для методів Кейпона і тепловий шум.

На рисунку 2 прийняті наступні позначення: $K_{розр}$ - розрахункові значення коефіцієнта поліпшення розрізнявальної здатності для методу Кейпона, розраховані за формулою (1); $K_{КП}$ - виміряні значення коефіцієнта поліпшення розрізнявальної здатності для методу Кейпона; $K_{ТШ}$ – виміряні значення коефіцієнта поліпшення розрізнявальної здатності для методу тепловий шум.

Аналіз графіків приведених на рис. 2 показує, що експериментальні значення коефіцієнта поліпшення розрізнявальної здатності методу Кейпона практично співпадають з розрахунковими. При цьому розбіжності склали не більше (4-6) % і викликані недостатньо високою статистикою отриманих експериментальних значень та інструментальними погрішностями експериментального вимірювального комплексу.

Аналіз графіків на рис. 2 в області малих значень q показує, що коефіцієнт поліпшення розрізнявальної здатності для методів Кейпона і теплового шуму практично співпадають і стають менше одиниці при $q \leq 3$ дБ. З рис. 2 також спостерігається повсюдне перевищення значень коефіцієнта $K_{ТШ}$ над значеннями коефіцієнта $K_{КП}$ при $q > 5$ дБ. Таке перевищення стає тим більшим, чим більше величини відношення сигнал/шум. При цьому графік для коефіцієнта $K_{ТШ}$ за характером поведінки практично не відрізняється від графіку розрахованого за формулою (1). Отже, узявши за основу вираз (1) і використовуючи виміряні значення коефіцієнта поліпшення розрізнявальної здатності методу тепловий шум $K_{ТШ}$, можна отримати вираз для його розрахунку.

Таким чином, евристично, шляхом підбору відповідних коефіцієнтів у формулі (1) і порівнюючи отримані результати з виміряними значеннями уперше отримано вираз для розрахунку коефіцієнта поліпшення розрізнявальної здатності для методу тепловий шум:

$$\hat{E} = \frac{1}{1,43,85 \sqrt{\frac{2\gamma - 1}{q^2}}} . \quad (4)$$

З виразу (4) видно, що його відмінність від виразу (1) полягає в тому, що у знаменнику отриманої формули корінь має бути в ступені 3,85. Крім того, проаналізувавши графік $K_{КП}$ і порівнявши його значення зі значеннями $K_{розр}$ розрахованими за формулою (1) доходимо висновку, що ці графіки можуть повністю збігатися коли корінь у знаменнику виразу (4) буде в ступені 4,11.

Підводячи підсумок проведеного експерименту слід зазначити, що значення $K_{КП}$, отримані експериментальним шляхом, майже співпадають з розрахунковими, що підтверджує достовірність виведеної формули (1). Крім того, аналіз графіків рис. 2 також показав, що значення коефіцієнта поліпшення розрізнявальної здатності для методу тепловий шум майже всюди перевершують аналогічні показники для методу Кейпона, і це перевищення в залежності від величини відношення сигнал/шум складає від 1% до 8%. Так, для отримання істотного виграшу в розрізнявальній здатності близько розташованих локальних джерел випромінювання, наприклад $\hat{E} = 3$ необхідно, щоб відношення сигнал/шум по кожній з них було не менше 33,5 дБ, при використанні методу Кейпона і 27 дБ, при використанні методу теплового шуму, тобто різниця складає майже 6,5 дБ. Виходячи з цього можна стверджувати, що застосування надрозрізнявальних методів ЦСА Кейпона і тепловий шум, дозволяють з високим ступенем вірогідності вимірювати РЛДП ОРЛМ, тим самим забезпечуючи систему розпізнавання якісними та інформативними ознаками об'єктів.

Висновки

Враховуючи високий рівень сучасних обчислювальних засобів і припускаючи, що зведення в другу ступінь ермітову матрицю Ψ^2 у формулі (3) здійснюватиметься практично в реальному масштабі часу, можна стверджувати, що при проектуванні, створенні і експлуатації радіотехнічних систем радіолокаційного моніторингу і розпізнавання в якості методу пеленгації з надрозрізняванням для виміру інформативних ознак розпізнаваного ОРЛМ перевагу слід віддати методу тепловий шум, оскільки він за рівних умов проведення експерименту забезпечив перевищення розрізнявальної здатності над методом Кейпона майже на 6,5 дБ, або 8%.

Література

1. Ерошенков М.Г. Радиолокационный мониторинг / М.Г. Ерошенков. – М.: МАКС Пресс, 2004. – 452 с.
2. Лещенко С.П. Развитие теории и техники радиолокационного распознавания воздушных целей. Прикладная радиоэлектроника / С.П. Лещенко. – 2009. - Т8, № 4. - С. 490-496.
3. Наконечний В.С. Шляхи підвищення інформативності радіолокаційних дальнісних портретів повітряних об'єктів оперативного супроводження / В.С. Наконечний, В.А. Дружинін // Сучасний захист інформації. - 2013. - №2. - С. 78-81.
4. Наконечний В.С. Исследование возможности измерений радиолокационных дальностных портретов воздушных целей при использовании современных методов цифрового спектрального анализа / В.С. Наконечний, Н.В.Мордвицев, К.В.Садовый // Контрольно-измерительные приборы и автоматика. – Х.:ФТИ. – 2005. – Вып. май/июнь. – С. 43 – 47.
5. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: пер. с англ. О.И. Хабарова / Марпл-мл. С.Л.; Хабаров О.И., Сидорова Г.А., под ред. И.С. Рыжак С.Л. - М.: 1990.-584с.

Надійшла 29.04.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Толюпа С.В.