

УДК 621.396.967

С.В. Ленков, В.П. Долгушин, В.Н. Лоза

Військовий інститут Київського національного університету імені Т. Шевченка, Київ

## АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ КУТОВОГО РОЗРІЗНЕННЯ ЦІЛЕЙ У МЕЖАХ ІМПУЛЬСНОГО ОБ'ЄМУ РЛС ПРИ ОБРОБЦІ ЗА МЕТОДОМ ПРОЕКЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ І ЧАСТКОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ВІДБИТИХ СИГНАЛІВ

Проводиться аналітична оцінка можливостей РЛС РТВ із розрізненням 2-х однотипних цілей у межах променя антени типу АР у системі виявлення, побудованої за проекційним алгоритмом MUSIC при різному ступені кореляції відбитих сигналів.

**Ключові слова:** діаграма спрямованості, антенна решітка, кореляційна матриця.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Останнім часом значна увага в публікаціях по теорії радіолокаційних систем приділяється дослідженню так званих “нових альтернативних” методів спектрального оцінювання кутових координат джерел випромінювань, у яких деякою мірою вдається подолати властивий класичному методу недолік, і тим самим підвищити роздільну здатність у порівнянні з релеєвською границею (ширина променя антени) за рахунок використання модельних уявлень про процеси, які аналізуються, що враховують властиві їм внутрішні зв'язки.

Особливе значення підвищення кутового розрізнення має для РЛС виявлення аеродинамічних цілей, у яких з усіх інформаційних характеристик (дальність дії, похибки виміру координат, розрізнення за дальністю) єдиною, що явно не задовольняє вимоги тактики, є роздільна здатність за азимутом, яка складає від 1° (РЛС сантиметрового діапазону) до 3 ... 4° і більше (РЛС метрового діапазону), що недостатньо для розрізнення групової цілі і не може бути досягнуте тільки вдосконаленням антенних систем.

**Аналіз публікацій.** Аналізу можливостей високого розрізнення за рахунок спеціальних методів спектрального оцінювання кутової координати присвячена досить велика кількість публікацій, однак в основних теоретичних дослідженнях (зокрема, [1]) прийняте положення про незалежність сигналів різних джерел випромінювання. В [3] розглянуті граничні можливості кутового розрізнення повністю корельованих (когерентних) сигналів при використанні методу оцінки за алгоритмом Кейпона. Цей випадок належить до специфічного завдання радіолокації маловисотних цілей, коли разом з корисним відбитим сигналом на вході РЛС є сигнал, перевербитий поверхнею Землі.

**Мета статті.** Провести теоретичний аналіз можливостей розрізнення двох цілей у промені діаграми спрямованості (ДС) при використанні найбільш ефективного з точки зору розрізнення методу спектрального оцінювання, заснованого на проекційному

алгоритмі обробки сигналів, за умови як повністю, так і частково корельованих відбитих сигналів.

### Зміст основного матеріалу

*Проекційні* алгоритми інакше називають алгоритмами *власних значень*. З точки зору якості виявлення вони відносяться до квазіоптимальних алгоритмів. Найбільш відомим із проекційних алгоритмів є алгоритм MUSIC, який передбачає обчислення цільової функції наступного вигляду:

$$v(\beta_0) = \frac{1}{N - x^H(\beta_0) \sum_{i=1}^{M_r} h_i h_i^H \cdot x(\beta_0)}, \quad (1)$$

де  $h_i$  – власні вектори кореляційної матриці (КМ) вихідних сигналів антенної решітки (АР);  $M_r$  – ранг КМ.

В обчислювальній математиці завдання пошуку власних значень і векторів ставиться стосовно до будь-якої квадратної матриці (без зв'язку з рішенням диференціальних рівнянь) і називається повною проблемою власних значень. Для її розв'язку розроблена велика кількість різних алгоритмів. Однак при кожному з таких алгоритмів потрібні великі обчислювальні ресурси системи обробки, тому при вирішенні завдання аналізу істотним етапом є перетворення цільової функції до виду, при якому спрощуються обчислювальні операції, що засновані на властивостях поставленого завдання.

Найбільш коректно це завдання виконується за умови повністю корельованих сигналів. Результати її розв'язку далі поширюються на загальний випадок довільної (часткової) кореляції.

**Аналіз для корельованих сигналів.** При наявності на вході двох повністю корельованих сигналів ранг матриці в (1) рівний 1. Із цього випливає, що для оцінки КМ може бути використана рівність:

$$h_1 \equiv s_0, \quad (2)$$

де  $s_0$  – корисний сигнал на вході від групової цілі.

При виконанні умови (2) вихідний вираз алгоритму (1) можна перетворити до наступного вигляду:

$$v(\beta_0) = \frac{1}{N - x^H(\beta_0)u \cdot (u^H u)^{-1} \cdot u^H x(\beta_0)}, \quad (3)$$

де  $N$  – кількість елементів АР;  $x(\beta_0)$  – пошуковий вектор з елементами  $x_k^H(\beta_0) = [\exp(-j\pi(k-1) \cdot \sin \beta_0)]$ ;  $k = 1, N$ ;  $x_k$  – амплітудно-фазовий розподіл (АФР) для сигналів відбитих від  $k$ -ї цілі;  $u$  – результуючий сигнал, рівний  $(x_1^H, x_2^H) u_{c1}$ ;  $u_{c1}$  – сигнал, прийнятий 1-м елементом АР. Вектор  $x^H(\beta_0)$  визначає значення множника АР залежно від напрямку опорного (пошукового) вектора й напрямку прийнятого сигналу й відповідає виразу:

$$E_{ok} = \frac{x_k x_k^H(\beta_0)}{N} = \frac{\sin[0,5\pi N(\sin \beta_0 - \sin \beta_k)]}{N \sin[0,5\pi(\sin \beta_0 - \sin \beta_k)]}. \quad (4)$$

При підстановці (2) в (3), вираз для сигналу з врахуванням (4) отримаємо:

$$v = N^{-1} \left( 1 - \frac{E_{o1}^2 + E_{o2}^2 + 2E_{o1}E_{o2} \cos \Delta\psi_{12}}{2Nq(1 - E_{12} \cos \Delta\psi_{12})} \right), \quad (5)$$

де  $\Delta\psi_{12}$  – різниця фаз відбитих сигналів;  $q$  – інтегральне відношення с/ш на виході прийомних каналів.

Аналіз отриманого розв'язку (5) можна виконати за більш простою функцією  $H(\beta_0)$ , монотонно пов'язаною з виразом (5):

$$H(\beta_0) = \frac{E_{o1}^2 + E_{o2}^2 + 2E_{o1}E_{o2} \cos \Delta\psi_{12}}{2Nq(1 - E_{12} \cos \Delta\psi_{12})}. \quad (6)$$

Порівняльний аналіз монотонної функції  $H(\beta_0)$  з отриманою в [3] результуючою функцією для алгоритму Кейпона показує, що вони відрізняються тільки нормуючим множником. Отже, висновок, зроблений в [3], про відсутність властивості високого розрізнення алгоритму спектрального оцінювання кутової координати за методом Кейпона при повністю корельованих сигналах 2-х цілей відповідає й алгоритму MUSIC.

Однак, як відомо з [2], при розрізненні некорельованих сигналів можливості проєкційних алгоритмів суттєво вищі в порівнянні з алгоритмом Кейпона. Тому подальший аналіз присвячений випадку частково корельованих сигналів двох цілей.

**Аналіз для сигналів з довільним ступенем кореляції.** Випадок повної кореляції відбитих від різних цілей сигналів є граничним, тому що, незважаючи на однотипність літаків, діаграми зворотного вторинного випромінювання цілей явно відрізняються й, отже, відрізняються значення комплексного моделюючого первинний сигнал множника, а також початкові фази. Таким чином, за винятком особливих випадків (як, наприклад, прямий і перевернутий сигнали при малій висоті цілі) у реальній обстановці виявлення групових цілей має місце випадок частково корельованих сигналів з передбачуваним значенням модуля коефіцієнта кореляції в інтервалі 0,4 ... 0,7.

Умова (2) для власних значень КМ виконується при частково корельованих сигналах з певним наближенням, яке однак цілком припустимо при оцінці граничних можливостей аналізованого алгоритму по кутовому розрізненню.

Шляхом прямих обчислень вихідної функції з використанням співвідношення (5) можна одержати значення цільової функції (опускаючи окремі проміжні перетворення, які звичайно представляють у додатках) при довільному коефіцієнті кореляції з модульним значенням  $r$ :

$$v(\beta) = \left( 1 + 2q(1 + E_{12} r \cos \Delta\psi_{12}) + q(1 - r^2)(1 - E_{12}^2) \right) / \left( N + q \left( (1 - E_{o1}^2) + (1 - E_{o2}^2) \right) + 2qZ_1(\beta) \cdot r \cos \Delta\psi_{12} + q^2 Z_2(\beta)(1 - r^2) \right), \quad (7)$$

$$\text{де} \quad Z_1(\beta) = E_{12} - E_{o1}E_{o2}, \quad (8a)$$

$$Z_2(\beta) = 1 - E_{12}^2 - E_{o1}^2 - E_{o2}^2 + 2E_{12}E_{o1}E_{o2}. \quad (8b)$$

Розрізнення двох цілей відповідає випадку, коли кожна ціль може бути виявлена на фоні іншої, "що заважає", тобто при виконанні умов:

$$v(\beta_0 = \beta_1) > U_{\text{порога}} \quad v(\beta_0 = \beta_2) > U_{\text{порога}}.$$

При виявленні 1-ї цілі 2-а є перешкодою й навпаки.

Розглянемо випадок виявлення 1-ї цілі, коли  $\beta_0 = \beta_1$ . При цьому мають місце наступні співвідношення параметрів у загальному виразі (7):

$$E_{o1} = 1; \quad E_{o2} = E_{12}; \quad Z_1(\beta) = 0; \quad Z_2(\beta) = 0. \quad (9)$$

При підстановці (9) в (7) з врахуванням, що  $q \gg 1$ , одержимо:

$$v(\beta_1) \cong \frac{2q(1 + E_{12} \cos \Delta\psi_{12}) + 2q(1 - r^2)(1 - E_{12}^2)}{N + q[2 + (E_{o2}^2 - 1)]}. \quad (10)$$

Порівняння (10) з (7) показує, що при збігу  $\beta_0$  з напрямком на ціль (1-у) має місце збільшення вихідного сигналу за рахунок зменшення знаменника на величину, рівну:

$$2qZ_1 r \cos \Delta\psi_{12} + q^2 Z_2(1 - r^2) > 1.$$

Таким чином, у напрямку цілі виникає збільшення амплітуди гармоніки просторового спектра. Аналогічний результат має місце для випадку  $\beta_0 = \beta_2$  (виявленні 2-ї цілі при 1-й "що заважає"). Зазначений вище факт свідчить про те, що усередині огинаючої ДС амплітуди двох просторових гармонік, відповідних до напрямків на цілі, що розрізняються, мають перевищення над іншими. При виборі необхідного порога й достатньої енергії сигналів виявляється можливим розрізнення двох цілей у межах променя ДС. При цьому принципове значення має величина втрат у відношенні сигнал/шум за рахунок неоптимальності алгоритму виявлення й ступеня кореляції відбитих від цілей сигналів. Втрати на неоптимальність обробки оцінені в роботах [3, 4]

для алгоритму Кейпона, з яким при повній кореляції сигналів, як показано вище, збігається з точністю до постійного коефіцієнта вихідний сигнал аналізованого алгоритму MUSIC. Отриманий в [3] результат відповідає величині втрат до 7 ... 8 Дб. Для розрахунків втрат за рахунок часткової кореляції сигналів введемо коефіцієнт  $\mu$ , що визначає відношення амплітуд вихідного сигналу при наявності цілі на контрольованому напрямку і його відсутності:

$$\mu = \frac{v(\beta_0 = \beta_k)}{v(\beta_0 \neq \beta_k)}, \quad k = \overline{1, 2}. \quad (11)$$

Коефіцієнт втрат визначиться при цьому відношенням:

$$L = \frac{\mu_{пк}}{\mu_{чк}}, \quad (12)$$

де  $\mu_{пк}$ ,  $\mu_{чк}$  – значення коефіцієнта (12) відповідно при повній кореляції й частковій.

Вираз коефіцієнта втрат одержимо після підстановки в (11) основних співвідношень (6), (7), (9) і потім результату в (12). Розрахунковий вираз можна привести до вигляду:

$$L = \frac{2q + q^2(1 - E_{12}^2)}{2q + q^2(1 - E_{12}^2)(1 - r^2) + 2rE_{12}q \cos \Delta\psi_{12}}. \quad (13)$$

Графік залежності  $L = f(r)$ , що відповідає виразу (13), представлений на рис. 1 для наступних даних:

$$q = 20 \text{ Дб}, \quad \Delta\beta = |\beta_2 - \beta_1| = 0,5\beta_{0,5P}, \quad \Delta\psi_{12} = 90^\circ.$$

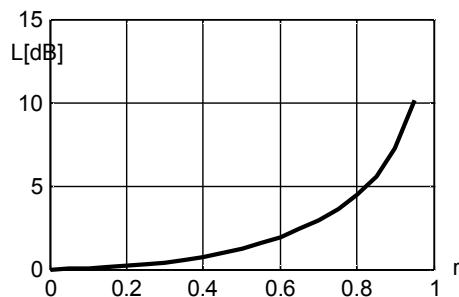


Рис. 1. Залежність втрат від коефіцієнта кореляції

З аналізу графіка (рис. 1) можна зробити висновки, що при практично прийнятних значеннях

$r = 0,5 \dots 0,7$  втрати за рахунок кореляції сигналів не перевищують 1 ... 2 Дб, а при повній кореляції досягають 12 Дб.

Для оцінки кутового інтервалу розрізнення використовуємо умову [2]:

$$\Delta\omega = 2\pi(d/\lambda)\sin\Delta\beta \geq 0,2. \quad (14)$$

Так, для РЛС із параметрами:  $\lambda = 1\text{м}$ ,  $N = 40$ ,  $\beta_{0,5P} = 3^\circ$  границя “високого” розрізнення відповідає  $\Delta\beta = 1,5^\circ$ , тобто в 2 рази вище релеєвського.

## Висновки

1. При повністю корельованих сигналах двох близьких цілей проекційні алгоритми обробки не забезпечують розв'язок завдання високого розрізнення.

2. При частковій кореляції сигналів ( $\leq 0,5 \dots 0,6$ ) і забезпеченні достатнього енергетичного потенціалу РЛС дві цілі в промені ДС можуть бути розрізнені при кутовому розносі між ними порядку  $0,5\beta_{0,5P}$ .

## Список літератури

1. Марлп мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его применение / С.Л. Марлп мл.; пер. с англ. – М.: Мир, 1990.
2. Джонсон Д.Х. Применение методов спектрального оценивания к задачам определения угловых координат источников излучения / Д.Х. Джонсон // ТИИЭР, 82. – Т. 70, № 9. – С. 87-92.
3. Качество обнаружения и предельное разрешение коррелированных сигналов в обнаружителях на основе алгоритма Кейпона / Б.Ф. Бондаренко и др. // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 2004. – Т.44, № 7. – С. 35-39.
4. Бондаренко Б.Ф. Алгоритмы обработки, обеспечивающие высокое разрешение сигналов / Б.Ф. Бондаренко, В.Ю. Тимчук // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 2004. – Т. 46, № 4. – С. 24-28.

Надійшла до редколегії 8.04.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, професор А.І. Сбітнєв, Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ.

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УГЛОВОГО РАЗРЕШЕНИЯ ЦЕЛЕЙ В ПРЕДЕЛАХ ИМПУЛЬСНОГО ОБЪЕМА РЛС ПРИ ОБРАБОТКЕ ПО МЕТОДУ ПРОЕКЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ И ЧАСТИЧНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ

С.В. Ленков, В.П. Долгушин, В.Н. Лоза

*Производится аналитическая оценка возможностей РЛС РТВ по разрешению 2-х однотипных целей в пределах луча антенны типа AP в системе обнаружения, построенной по проекционному алгоритму MUSIC при различной степени корреляции отражённых сигналов.*

**Ключевые слова:** диаграмма направленности, антенная решетка, корреляционная матрица.

## OPPORTUNITY ANALYSIS OF THE ANGULAR DISCRIMINATION OF THE TARGETS WITHIN PULSE VOLUME OF RADIO DETECTION AND RANGING EQUIPMENT WHILE PROCESSING ACCORDING TO THE METHOD OF PROJECTIVE ALGORITHMS AND PARTIAL CORRELATION OF THE REFLECTED SIGNALS

S.V. Lenkov, V.P. Dolgushyn, V.M. Loza

*The analytical estimation of possibilities RDRE RRT on the permission of 2 same targets within antenna beam of type AP in the system of the detection constructed on projection algorithm MUSIC at various degree of correlation of reflected signals is made.*

**Keywords:** diagram of orientation, aerial grate, correlation matrix.