

УДК 621.391.26

В.А. Васильєв<sup>1</sup>, С.Т. Багдасарян<sup>2</sup>, В.А. Таршин<sup>1</sup><sup>1</sup>Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків<sup>2</sup>Державне підприємство МО України НДІ РЕТ

## УСУНЕННЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ КУТОВОЇ КООРДИНАТИ ЦІЛІ ПРИ АДАПТАЦІЇ ДО АКТИВНИХ ЗАВАД

*В інтересах підвищення точності розділення-вимірювання кутової координати цілі при багатоканальному прийманні та адаптації до активних завад розглянуті можливості усунення неоднозначності її вимірювання на основі використання різних видів додаткової інформації.*

*ціль, розділення-вимірювання, кутова координата, активна завада*

### Вступ

**Постановка проблеми.** Аналіз локальних конфліктів останніх років показав, що функціонування радіотехнічних засобів відбувається в умовах інтенсивної дії по головних і бічних пелюстках їх діаграм спрямованості (ДС) різного роду завад, у тому числі активних завад. Розділення-вимірювання кутової координати цілі при цьому, як правило, забезпечується адаптивною просторовою обробкою. Така обробка при дії завад по головній пелюстці поряд зі збільшенням дисперсії й зсуву оцінки кутової координати цілі може привести до неоднозначності її оцінки. Однак методи усунення неоднозначності кутової координати цілі, яка обумовлена адаптацією до завад, у відомій літературі не розглянуті, хоча викликають важливий практичний інтерес.

**Аналіз літератури.** Сучасна статистична теорія розділення-виявлення й розділення-вимірювання часових і просторово-часових сигналів на фоні активних маскувальних завад отримала розвиток у ряді робіт [1 – 3]. Розділення-вимірювання кутової координати цілі передбачає операції накопичення корисного сигналу й адаптивну компенсацію завад. При компенсації завад, що діють по головній пелюстці узгодженої характеристики спрямованості антени, має місце істотне перекручування головної пелюстки, що може проявлятися в зсуві його максимуму, зміні крутості в області максимуму [4, 5], а також в утворенні декількох максимумів (багатопіковості) у межах головної пелюстки. Особливості мінімізації похибок регулярного вимірювання напрямку приходу сигналу з урахуванням корекції зсуву максимуму характеристики спрямованості (систематичної похибки) розглянуті в [4]. Багатопіковість у межах головної пелюстки може привести до неоднозначної оцінки напрямку приходу сигналу й погіршення результуючої точності вимірювання кутової координати цілі в цілому. У розвиток [4, 5] це призводить до необхідності аналізу особливостей

неоднозначних вимірів при адаптації до завад і розробки методів їх усунення.

**Мета статті.** Аналіз особливостей та розробка методів забезпечення однозначності вимірювання напрямку приходу сигналу при багатоканальному прийманні й адаптації до активних завад.

Для синтезу алгоритмів розділення-вимірювання широко використовують максимально правдоподібну оцінку [1 – 3]. Така оцінка напрямку приходу сигналу може визначатися за максимумами достатніх статистик логарифма відношення правдоподібності

$$\ln \ell_1(y/\alpha) = \frac{q^2(\alpha) |\dot{Z}_n(\alpha)|^2}{4(1+q^2(\alpha)/2)} - \ln \left( 1 + \frac{q^2(\alpha)}{2} \right),$$

модуля нормованого комплексного вагового інтеграла

$$|\dot{Z}_n(\alpha)| = |\dot{Z}(\bar{\alpha})|/q(\alpha)$$

або модуля комплексного вагового інтеграла

$$|\dot{Z}(\alpha)| = \left| \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{Y}^T(t) \dot{R}^*(t, \alpha) dt \right|.$$

У даних виразах позначені:  $\dot{R}(t, \alpha)$  – ваговий вектор-стовпець обробки сигналу на фоні внутрішніх шумів і зовнішніх корельованих завад;  $\alpha$  – напрям приходу сподіваного сигналу;  $\dot{Y}(t)$  – вектор-стовпець комплексної амплітуди прийнятого коливання;  $q^2(\alpha) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}(t, \alpha) \dot{R}^*(t, \alpha) dt$  – параметр виявлення.

Припускається, що в одному елементі розділення за дальністю є тільки одне джерело сигналу. Точкові джерела сигналу й активних шумових завад (АШП) знаходяться у дальній зоні М-елементної приймальної лінійної антенної решітки (АР). На АР поряд із внутрішніми шумами діють плоскі хвилі сигналу й завад з різних напрямів, обробка прийнятих коливань розділяється на просторову і часову,

тобто  $\dot{\hat{X}}(t, \alpha)$  й  $\dot{\hat{R}}(t, \alpha)$  розділяються на просторові

$$\dot{\hat{X}}(\alpha) = \|\dot{\hat{X}}_i(\alpha)\|, \quad \dot{\hat{R}}(\alpha) = \|\dot{\hat{R}}_i(\alpha)\|$$

і часові

$$\dot{\hat{X}}(t), \quad \dot{\hat{R}}(t) = 2\dot{\hat{X}}(t) / N_0$$

співмножники, де  $N_0$  – спектральна щільність потужності шумів. Напрямок приходу сподіваного сигналу  $\alpha = Md \sin(\theta) / \lambda$ , де  $d = \lambda / 2$  – крок решітки,  $\theta$  – кут приходу хвилі,  $\lambda$  – довжина хвилі, визначається в частках півширини (по нулях) узгодженої ДС решітки. Вектор-стовпець

$$\dot{\hat{R}}(\alpha) = \dot{\hat{\Phi}}^{-1}(\alpha_n) \dot{\hat{X}}(\alpha),$$

де  $\dot{\hat{X}}(\alpha) = \|\exp\{-j\pi(2i - M - 1)/M\alpha\}\| \quad i = 1 \dots M$ ,  $\dot{\hat{\Phi}}^{-1}(\alpha_n)$  – обернена просторова кореляційна матриця завод [1, 3].

Вектор-стовпець прийнятих коливань

$$\dot{\hat{Y}}(t) = \dot{\hat{X}}(t, \alpha_c, \vec{\beta}_c) + \dot{\hat{N}}(t),$$

де  $\dot{\hat{X}}(t, \alpha_c, \vec{\beta}_c)$  – вектор-стовпець корисного сигналу з інформативним параметром  $\alpha_c$  і вектором неінформативних параметрів  $\vec{\beta}_c$ ;  $\dot{\hat{N}}(t)$  – представляє адитивну суміш внутрішніх шумів приймальних каналів  $\dot{\hat{N}}_0(t)$  і просторово корельованих завод  $\dot{\hat{N}}_n(t)$  від  $n$  дискретних за простором джерел, тобто

$$\dot{\hat{N}}(t) = \dot{\hat{N}}_0(t) + \dot{\hat{N}}_n(t) = \dot{\hat{N}}_0(t) + \sum_{\mu=1}^n \dot{\hat{X}}(\alpha_{n\mu}) \dot{\hat{N}}_{\mu}(t) \dots$$

Тут  $\alpha_{n\mu} = Md \sin \theta_{n\mu} / \lambda$  характеризує кутове положення  $\mu$ -го джерела заводи.

При знаходженні оцінки напрямку приходу сигналу за максимумом статистики  $\ln \ell_1(y/\alpha)$ ,  $|\dot{\hat{Z}}_n(\alpha)|$  або  $|\dot{\hat{Z}}(\alpha)|$  характерне виникнення неоднозначних оцінок, особливо істотних при малій різниці  $\Delta\alpha = |\alpha_c - \alpha_n|$  між напрямками приходу корисного сигналу  $\alpha_c$  й заводи  $\alpha_n$ , що діє в межах головної пелюстки ДС АР. Це ілюструється на рис. 1 для статистики  $|\dot{\hat{Z}}(\alpha)|$ , де  $q_0$  – параметр виявлення при відсутності зовнішньої заводи,  $h$  – відношення завад до шуму для одного елемента решітки.

Напрями приходу сигналу й заводи показані стрілками, штрихова лінія відповідає дії заводи з напрямку  $\alpha_{n1}$ , а суцільна лінія – з напрямку  $\alpha_{n2}$ . Тут же для порівняння точковою лінією наведена залежність  $|\dot{\hat{Z}}(\alpha)|$  при відсутності активних завод. У цій ситуації статистика  $|\dot{\hat{Z}}(\alpha)|$  має один явно виражений максимум, що збігається в середньому з напрямком приходу сигналу:  $M(\hat{\alpha}_y) = \alpha_c$ .

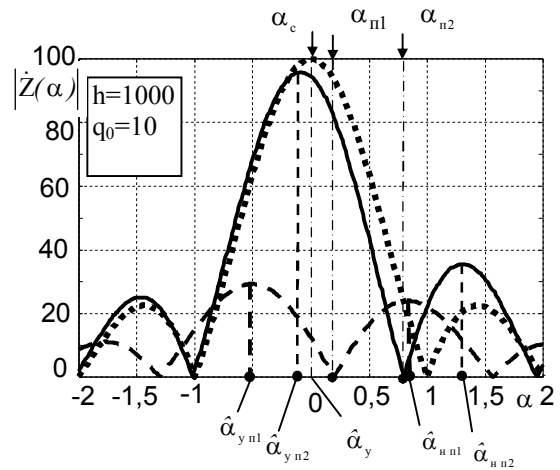


Рис. 1. Залежність  $|\dot{\hat{Z}}(\alpha)|$  від сподіваного напрямку приходу  $\alpha$  для різних ситуацій дії перешкод

Для напрямків  $\alpha_c = 0$  і  $\alpha_{n1}$  статистика  $|\dot{\hat{Z}}(\alpha)|$  (штрихова лінія) має два практично рівнозначних максимуми, яким відповідають істинна  $\hat{\alpha}_{y,n1}$  й неоднозначна  $\hat{\alpha}_{n,n1}$  оцінки.

При збільшенні різниці між ціллю й джерелом заводи (суцільна лінія) максимуми статистики  $|\dot{\hat{Z}}(\alpha)|$  стають нерівнозначними, але ймовірність виникнення неоднозначної оцінки (істинна  $\hat{\alpha}_{y,n2}$  і неоднозначна  $\hat{\alpha}_{n,n2}$ ) зберігається. Поряд з заводою, що діє по головній пелюстці, дія завод по бічних пелюстках не порушує розглянуті особливості виникнення неоднозначної оцінки. Наведені позначення оцінок прийняті на основі результатів розрахунку для відомого напрямку приходу сигналу. Оскільки напрям приходу сигналу апіорі не відомий, не відомо і яка з оцінок є істинною.

Аналогічний ефект спостерігається й при знаходженні оцінки вимірювачем дискримінаційного виду, алгоритми синтезу якого для статистик  $|\dot{\hat{Z}}(\alpha)|$  і  $\dot{\hat{Z}}_n(\alpha)$  відповідно визначаються виразами [1, 3]:

$$\Delta_Z(\alpha) = \text{Re} \left[ \dot{\hat{Z}}'(\alpha) \dot{\hat{Z}}^*(\alpha) \right] / |\dot{\hat{Z}}(\alpha)|^2,$$

$$\Delta_{Zn}(\alpha) = \frac{\text{Re} \left[ \dot{\hat{Z}}'(\alpha) \dot{\hat{Z}}^*(\alpha) \right]}{|\dot{\hat{Z}}(\alpha)|^2} - \frac{\text{Re} \left[ \dot{\hat{X}}^T(\alpha) \dot{\hat{R}}'(\alpha) \right]}{\dot{\hat{X}}^T(\alpha) \dot{\hat{R}}^*(\alpha)}.$$

Для ситуації  $\alpha_c = 0$  й  $\alpha_{n1} = 0,2$  дискримінаційні характеристики  $\Delta_Z(\alpha)$  й  $\Delta_{Zn}(\alpha)$  наведені на рис. 2, на якому показані істинна  $\hat{\alpha}_{y,n1}$  й неоднозначна  $\hat{\alpha}_{n,n1}$  оцінки стосовно до кожної із статистик.

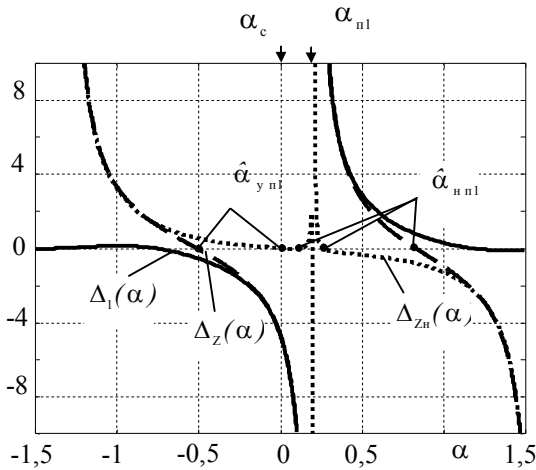


Рис. 2. Дискримінаційні характеристики для режиму адаптації

Неоднозначність оцінки напрямку приходу сигналу при дії активних завад по головній пелюстці ДС обмежує використання методу визначення й корекції систематичної похибки оцінки за максимумом статистики  $|\dot{Z}(\alpha)|$  шляхом додаткової адаптивної просторової фільтрації контрольного (пілот) сигналу в режимі сканування ДС решітки [4]. Для усунення даного обмеження доцільно використовувати додаткову інформацію про:

- значення статистики в напрямках невідомих істинної  $\hat{\alpha}_{y n1}$  й неоднозначної  $\hat{\alpha}_{n n1}$  оцінок;
- напрям дії завади;
- характер зміни нормованого значення похідної параметра виявлення.

Найбільш просто використовувати різницю значень статистики  $|\dot{Z}(\alpha)|$  в напрямках невідомих оцінок  $\hat{\alpha}_{y n1}$  й  $\hat{\alpha}_{n n1}$  (рис. 1). Однак по мірі наближення джерел сигналу й завади ефективність використання цієї інформації знижується.

Практичний інтерес викликає інформація про кутові координати джерел завад. В адаптивних системах, особливо в системах з ФАР, вона може бути отримана з точністю, набагато вище точності оцінки напрямку цілі, що обумовлено достатньою інтенсивністю завади. Дана інформація також корисна як для усунення неоднозначності вимірювання, так і для визначення діапазону можливих значень контрольного сигналу.

За результатами розрахунків показано, що залежності оцінок  $\hat{\alpha}_{y n1}$  і  $\hat{\alpha}_{n n1}$  від напрямку приходу сигналу  $\alpha_c$  носять монотонний характер (рис. 3).

Це підтверджується й результатами марематичного моделювання, яке проведено на 10-ти-

елементній лінійній антенній решітці при  $q_0 = 10$ ,  $h=30$  дБ (рис. 4).

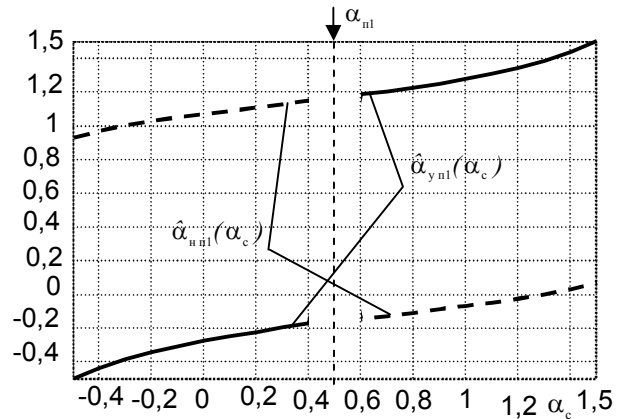


Рис. 3. Залежність оцінок кугової координати від напрямку приходу сигналу

У силу зазначених монотонних залежностей для будь-яких напрямів джерела сигналу  $\alpha_c$  відносно джерела завади в межах головної пелюстки виконується умова  $|\hat{\alpha}_{y n1} - \hat{\alpha}_{n1}| > |\hat{\alpha}_{n n1} - \hat{\alpha}_{n1}|$  (рис. 5), що дозволяє однозначно знайти істинну оцінку  $\hat{\alpha}_{y n1}$ , яка відповідає положенню джерела сигналу.

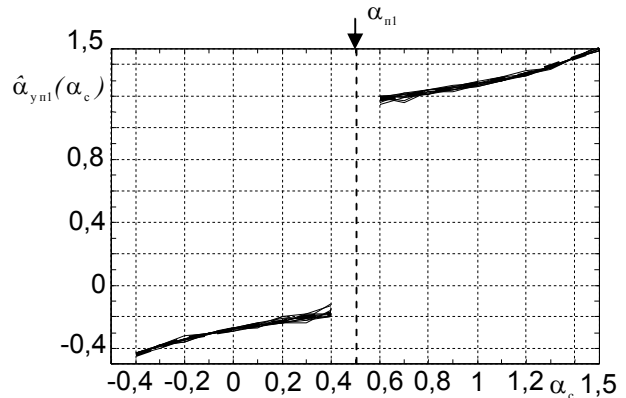


Рис. 4. Результати моделювання залежності істинної оцінки кугової координати від напрямку приходу сигналу

При наближенні цілі й постановника завади для зазначених значень  $q_0 = 10$ ,  $h=30$  дБ і  $|\alpha_c - \hat{\alpha}_{n1}| < 0,1$  внаслідок зменшення параметра виявлення наростає дисперсія похибки вимірювання кугової координати цілі, і можливість її оцінки виключається. Відзначимо також, що усунення неоднозначності вимірювання дозволяє зменшити величину сектора сканування контрольного сигналу в околиці істинної оцінки  $\hat{\alpha}_{y n1}$  й спростити реалізацію методу усунення зсуву оцінки [4].

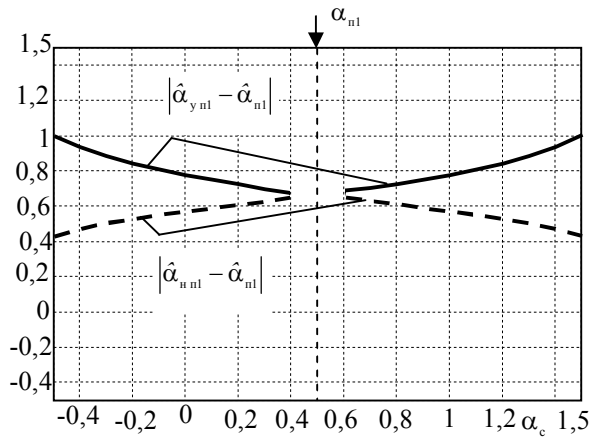


Рис. 5. Залежність різниць модулів оцінок від напрямку приходу сигналу при адаптації до активних завад

Характер зміни нормованої похідної параметра виявлення

$$\Delta_1(\alpha) = \frac{[q^2(\alpha)]}{q^2(\alpha)} = \frac{\operatorname{Re}[\dot{X}^T(\alpha)\dot{R}'(\alpha)]}{\dot{X}^T(\alpha)\dot{R}^*(\alpha)}$$

не залежить від напрямку приходу сигналу й самостійно не може бути використаний для усунення неоднозначності.

Однак його доцільно використовувати разом з інформацією про значення статистики в напрямках оцінок  $\hat{\alpha}_{ypl}$  й  $\hat{\alpha}_{npl}$  або з інформацією про напрям дії завади.

В околі оцінки  $\hat{\alpha}_{ypl}$  залежність  $\Delta_1(\alpha) < 0$ , а в околі  $\hat{\alpha}_{npl}$   $\Delta_1(\alpha) > 0$  у випадку розміщення джерела завади правіше джерела сигналу (рис. 2) і навпаки при розміщенні завади лівіше джерела сигналу. Крім того, інформація про характер зміни  $\Delta_1(\alpha)$  й  $\Delta_2(\alpha)$  корисна для усунення неоднозначності вимірювання за максимумом статистики  $\dot{Z}_n(\alpha)$ .

Наведені рішення щодо усунення неоднозначності визначення кутової координати цілі становлять практичний інтерес для ситуації, коли одне джерело активних завад діє по головній пелюстці ДС АР, а інші по бічних пелюстках. Різноманітні ситуації дії завад від двох і більше джерел по головній пелюстці мають специфічні особливості й потребують окремих досліджень.

## Висновки

1. Показано, що при адаптації до активних завад, що діють по головній пелюстці узгодженої характеристики спрямованості антенної решітки вимірювача, поряд з відомими даними про збільшення дисперсії й зсуву оцінки кутової координати цілі може мати місце неоднозначність її визначення.

2. Наведені методи усунення неоднозначності вимірювання напрямку приходу сигналу в режимі сканування простору на основі окремого й спільного використання цілком доступних видів додаткової інформації.

На основі розрахунків і математичного моделювання виявлено, що при використанні додаткової інформації тільки про напрям джерела завади  $\hat{\alpha}_{nl}$  усунення неоднозначної оцінки  $\hat{\alpha}_{npl}$  напрямку цілі можна забезпечити на основі порівняння модулів різниць оцінок  $|\hat{\alpha}_{ypl} - \hat{\alpha}_{nl}|$  й  $|\hat{\alpha}_{npl} - \hat{\alpha}_{nl}|$ .

## Список літератури

1. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь. 1981. – 344 с.
2. Вопросы статистической теории радиолокации / Под ред. Г. П. Тартаковского. – М.: Сов. радио, 1964. – Т. 2. – 1080 с.
3. Радиозлектронные системы: основы построения и теория: Справочник / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев и др. / Под ред. Я.Д. Ширмана: – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.
4. Таршин В.А., Васильев В.А. Повышение точности измерения угловых координат в РЛС с антенной решеткой на фоне активных шумовых помех // Системы обработки информации. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вып. 3(19). – С. 113-118.
5. Багдасарян С.Т., Хачатуров В.Р., Васильев В.А., Таршин В.А. О корректном оценивании направления прихода сигнала на фоне пространственно-коррелированных шумовых помех // МРФ: Сб. научн. тр. – 2005. – Т. 2. – С. 193-195.

Надійшла до редколегії 5.02.2007

Рецензент: д-р техн. наук проф. І.І. Обод, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.