В.Є. Кудряшов, С.Г. Леушин, А.Є. Присяжний

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ ПЕЛЕНГАЦІЇ МАЛОВИСОТНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ПОСТАНОВНИКІВ АКТИВНИХ ШУМОВИХ ПЕРЕШКОД

Стаття присвячена порівняльному аналізу адаптивних алгоритмів просторової обробки сигналів в фазованих антенних решітках (ФАР) з точки зору точності оцінювання кутових координат джерел випромінювання та розрізняльної здатності за кутовими координатами. Запропонований новий модифікований алгоритм просторової обробки сигналів, що має кращі показники за точністю та розрізняльною здатністю за кутовими координатами порівняно з класичними алгоритмами. Наведені результати моделювання пеленгаційних характеристик лінійних ФАР з просторовою обробкою сигналів в середовищі Matlab. Показані переваги додаткового нормування коефіцієнтів передачі каналів просторової обробки сигналів ФАР.

Ключові слова: пеленгація, безпілотні постановники перешкод, адаптивні алгоритми, лінійна ФАР.

Вступ

Постановка проблеми. Актуальність рішення проблеми пеленгації постановників активних шумових перешкод (ПАШП) значно зросла в зв'язку з появою маловисотних постановників на основі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [1]. Розробкою БПЛА – ПАШП найбільш активно займаються оборонні підприємства США (ADM-160 MALD, MALD-J, Remedy), Ізраїлю (герон-ТП) та Китаю (ASN-205,206). Наприклад, апаратурою РЕБ планується оснащати безпілотний літальний апарат RQ-7A (“Шэдоу-200”). Для нього створена апаратура для радіоподавлення РЛС супротивника, що працює на глибині до 150 км від лінії розмежування військ.

В РЛС військового призначення пеленгація ПАШП реалізується шляхом оцінки кутового положення максимуму діаграми спрямованості антени, що приймає їх сигнали, або шляхом порівняння рівня перешкодового сигналу в основній та додатковій антені, діаграма спрямованості (ДС) якої перекриває бокові пелюстки ДС основної антени. При цьому кількість ПАШП, які пеленгуються в зоні огляду, значно обмежена. Тому в сучасній повітряній обстановці ефективна пеленгація великої кількості безпілотних ПАШП можлива лише за допомогою активних ФАР з просторовою обробкою сигналів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасний стан розвитку підсилювальної техніки та техніки аналого-цифрового перетворення сигналів дозволяє створювати навіть в верхній частині сантиметрового діапазону хвиль ФАР з просторовою обробкою сигналів у вигляді чисто цифрових ФАР, коли замість складних та громіздких діаграмостворюючих СВЧ схем на виходах елементів решітки встановлені гібридні та інтегральні мікросхеми [7].

У роботах [2–7; 10–12] описані адаптивні методи, які дозволяють забезпечити пеленгацію значної кількості ПАШП з достатньо високими точністю та розрізняльною здатністю. Наприклад, показано, що розрізняльна здатність за кутовими координатами при застосуванні цих методів може досягати чверті ширини головного пелюстка ДС.

Мета статті – оцінити можливість модифікації відомих адаптивних алгоритмів вимірювання кутових координат джерел електромагнітного випромінювання, які забезпечують пеленгацію великої кількості безпілотних ПАШП з розрізняльною здатністю за кутовими координатами, що має значення менше чверті ширини головного пелюстка ДС.

Виклад основного матеріалу

Через порівняно невелику висоту польоту безпілотних ПАШП при їх пеленгації треба враховувати наявність на вході приймальних каналів РЛС, відбитих від земної або морської поверхні додаткових перешкодових сигналів, а також перешкодових сигналів, відбитих від місцевих предметів. Така велика кількість шумових сигналів означає, що закон розподілення їх суми можна вважати нормальним. Відомо [9], що оптимальним алгоритмом оцінки потужності таких сигналів є оцінка максимуму післядослідної щільності ймовірності $p_{cs}(Y)$ (1), бо при достатньо великій потужності перешкодових сигналів щільність ймовірності при їх відсутності можна вважати сталою. У випадку пеленгації ПАШП за допомогою активних приймальних ФАР їх сигнали Y становляться m -мірними з післядослідною щільністю ймовірності [8]:

$$p_{cs}(Y) = (2\pi)^{-m/2} (\det \Phi)^{-1/2} \times \exp \left[(-1/2) \left((Y - u_c X)^T \Phi^{-1} (Y - u_c X) \right) \right], \quad (1)$$

де Y – m -мірний вектор-стовпець всіх перешкодових сигналів та сигналу ПАШП, що пеленгується;

m – кількість приймальних каналів;

u_c – напруга сигналу ПАШП, що пеленгується;

$\Phi_3 = M(Y_3 Y_3^T)$ – кореляційна матриця перешкодових сигналів без сигналу ПАШП, що пеленгується;

M – знак статистичного усереднення;

$X^T = (1, e^{j \cdot 2\pi d \sin \theta / \lambda}, \dots, e^{j \cdot (m-1) \cdot 2\pi d \sin \theta / \lambda})$ – вектор фазового розподілення сигналу ПАШП, що пеленгується, в елементах лінійної ФАР при кутовому положенні “ θ ” ПАШП відносно нормалі до апертури антени;

d – відстань між елементами ФАР;

λ – довжина хвилі сигналів, що приймаються.

Відомо [9], що оцінка напруги сигналу, що приймається, за методом ММП (максимальної правдоподібності) має вигляд

$$u_c = (Y^T \Phi_3^{-1} X) / (X^T \Phi_3^{-1} X) = Y^T K, \quad (2)$$

де K – вектор комплексних коефіцієнтів передачі приймальних каналів ФАР.

При комплексному представленні сигналів знак транспонування одночасно визначає і комплексне спряження. Тоді величина потужності сигналу, що оцінюється, дорівнює

$$P_c = KM(Y Y^T)K = (\Phi_3^{-1} X / X^T \Phi_3^{-1} X) \Phi (\Phi_3^{-1} X / X^T \Phi_3^{-1} X), \quad (3)$$

де M – знак статистичного усереднення;

Φ – кореляційна матриця всіх перешкодових сигналів.

Крім вищевказаного алгоритму ММП існує декілька алгоритмів, отриманих за другими критеріями, а також декілька евристичних алгоритмів оцінки кутових координат джерел випромінювання [3; 10–12], котрі мають більшу швидкодію або спрощену технічну реалізацію при незначних енергетичних втратах порівняно з оптимальним алгоритмом (3). Найбільш високоточними з них є алгоритм Кейпона (4), теплового шуму (5), Борджотті-Лагунаса (6) та максимуму ентропії (7):

$$S_k = 1 / (X^T \Phi^{-1} X); \quad (4)$$

$$S_{TII} = 1 / (X^T \Phi^{-2} X); \quad (5)$$

$$S_{BL} = X^T \Phi^{-1} X / (X^T \Phi^{-2} X); \quad (6)$$

$$S_{ME} = r_{11} / |E_1 \Phi^{-1} X|^2, \quad (7)$$

де r_{11} – перший елемент кореляційної матриці Φ ;

E_1 – перший рядок одиничної матриці.

Метою даної роботи є порівняльна оцінка можливостей вищевказаних алгоритмів при наявності великої кількості безпілотних ПАШП та їх сигналів, відбитих від місцевих предметів. Під можливостями мається на увазі точність визначення кутових координат ПАШП та розрізнявальна здатність за кутовими координатами. Крім того, значний інтерес має оцінка цих можливостей при обмеженій потужності перешкодових сигналів безпілотних ПАШП, обмеженій кількості “ m ” приймальних каналів ФАР та обмеженій кількості “ n ” ітерацій, необхідних для обчислення кореляційної матриці Φ .

На рис. 1...4 в залежності від кута θ в градусах представлені нормовані пеленгаційні характеристики S (4–5), які розраховані в пакеті Mathlab (S_K – пунктирна лінія, S_{TII} – штрихова лінія), а також пеленгаційна характеристика неадаптивної ФАР (алгоритм Бартлетта (8), суцільна лінія)

$$S_B = X^T \Phi X \quad (8)$$

та пеленгаційна характеристика згідно з запропонованим модифікованим алгоритмом теплового шуму S_{MTII} (9), штрих-пунктирна лінія.

$$S_{MTII} = 1 / (X^T \Phi^{-3} X). \quad (9)$$

Як відомо, в алгоритмі теплового шуму обчислюється величина, зворотно пропорційна потужності власних шумів приймальних каналів ФАР, коефіцієнт передачі яких отриманий за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки $K = c \Phi^{-1} X$ [9], де c – константа. При пеленгації можна вважати $c = 1$, тоді

$$S_{TII} = 1 / K^T K = 1 / X^T \Phi^{-1} \Phi^{-1} X.$$

Модифікований алгоритм S_{MTII} (9) виконує додаткове нормування коефіцієнтів передачі “ K ” каналів просторової обробки сигналів ФАР з урахуванням їх фазового розподілу в цих каналах.

Приклади пеленгаційних характеристик, що показані на рис. 1...4, демонструють можливості неадаптивного (8) та адаптивних (4, 5, 9) алгоритмів по точності і розрізняльній здатності ПАШП за кутовою координатою θ . Пеленгаційні характеристики за алгоритмами Борджотті-Лагунаса (6) та максимуму ентропії (7) не моделювались, бо перший не забезпечує зростання розрізняльній здатності при збільшенні відношення Q потужності безпілотних ПАШП до власних шумів приймальних каналів ФАР, а другий дає хибні максимуми в пеленгаційних характеристиках [3]. Буквою “ n ” на рис. 1...4 позначена кількість випробувань Y , яка застосована при усередненні матриці Φ .

Рис. 1, а. $Q_1 = Q_2 = 20\text{дБ}$; $\theta_1 = -0,5^\circ$, $\theta_2 = 0,5^\circ$;
 $m = 200$; $n = 20$

Рис. 1, б. $Q_1 = Q_2 = 10\text{дБ}$; $\theta_1 = -2^\circ$, $\theta_2 = 2^\circ$;
 $m = 20$; $n = 200$

Джерело: розроблено авторами.

З рис. 1, а бачимо, що два джерела шумових сигналів порівняно невеликої потужності (відношення перешкода-шум дорівнює $Q = 20\text{дБ}$), що знаходяться в межах чверті ширини головного пелюстки діаграми спрямованості неадаптивної 20-елементної ФАР ($\Delta\theta_{0,5\text{Р}} \sim 5^\circ$), не розрізняються за кутовою координатою при застосуванні алгоритму Бартлетта та алгоритму Кейпона, але розрізняються за критерієм 3 дБ при застосуванні алгоритмів ТШ і МТШ. При цьому алгоритм МТШ забезпечує більший перепад між максимумами та мінімумами пеленгаційної характеристики та має дещо менші зміщення її максимумів відносно істинних кутових координат ПАШП.

Рис. 1, б відповідає випадку знаходження двох ПАШП навіть малої потужності у межах головної пелюстки діаграми спрямованості неадаптивної ФАР на рівні половинної потужності. З рис. 1, б бачимо, що ПАШП не розрізняються по кутовим координатам при застосуванні алгоритму Бартлетта та розрізняються при застосуванні будь-яких адаптивних алгоритмів, але алгоритм МТШ (9) забезпечує найменшу ширину максимумів пеленгаційної характеристики.

На рис. 2 наведений приклад вимірювання кутових координат 6-ти ПАШП однакової потужності

$Q = 23\text{дБ}$, чотири з яких знаходяться в межах головної пелюстки діаграми спрямованості неадаптивної 20-елементної ФАР.

Рис. 2. $Q_1 = Q_2 = \dots Q_6 = 23\text{дБ}$; $\theta_1 = -2^\circ$, $\theta_2 = -5^\circ$,
 $\theta_3 = -2^\circ$, $\theta_4 = 2^\circ$, $\theta_5 = 5^\circ$, $\theta_6 = 8^\circ$, $m = 20$; $n = 200$
Джерело: розроблено авторами.

Рис. 3. $Q_1 = 17\text{дБ}$, $Q_2 = Q_3 = 20\text{дБ}$, $Q_4 = 14\text{дБ}$;
 $\theta_1 = -8^\circ$, $\theta_2 = -3^\circ$, $\theta_3 = 3^\circ$, $\theta_4 = 8^\circ$, $m = 20$; $n = 200$
Джерело: розроблено авторами.

Рис. 4. $Q_1 = 17\text{дБ}$, $Q_2 = Q_3 = 20\text{дБ}$, $Q_4 = 14\text{дБ}$;
 $\theta_1 = -8^\circ$, $\theta_2 = -3^\circ$, $\theta_3 = 3^\circ$, $\theta_4 = 8^\circ$, $m = 10$; $n = 200$
Джерело: розроблено авторами.

З рис. 2 бачимо, що при застосуванні алгоритму Бартлетта не розрізняється по кутовим координатам жоден з ПАШП. Також бачимо, що алгоритм

МТШ забезпечує більший перепад між максимумами та мінімумами пеленгаційної характеристики, ніж алгоритм ТШ, та має дещо менші зміщення її максимумів відносно істинних кутових координат ПАШП. Також з рис. 2 бачимо, що в складній перешкодовій обстановці алгоритм Кейпона не розрізняє всіх ПАШП.

На рис. 3 та 4 наведений приклад однакової перешкодової обстановки (4 джерела випромінювання різної потужності), але кількість “ m ” приймальних каналів ФАР (тобто розмірність кореляційної матриці Φ) на рис. 4 в 2 рази менша. Бачимо, що при пеленгації двох близькорозташованих ПАШП потужністю 20 дБ та при наявності місцевих предметів, що утворюють перешкоди потужністю 14дБ та 17дБ, навіть при кількості $m = 10$ алгоритм Кейпона не розрізняє ПАШП. Знову бачимо, що алгоритм МТШ забезпечує більший перепад між максимумами та мінімумами пеленгаційної характеристики ніж алгоритм ТШ та має дещо менші зміщення її максимумів відносно істинних кутових координат ПАШП. В результаті алгоритм ТШ розрізняє тільки 3 джерела випромінювання, а алгоритм МТШ розрізняє всі 4 джерела.

Відомо, що ПАШП в правилах стрільби будь-якого зенітного ракетного комплексу визначені як цілі, що мають бути обстріляні в першу чергу, Тому ще одним варіантом застосування ПАШП є їх використання в якості цілі – приманки (“decoy”).

Висновки

1. Поряд з інформацією про появу ударних БПЛА, призначених для дії на малих висотах, також з'явилась інформація щодо розробки безпілотних ПАШП, які перешкоджають виявленню ударних цілей або грають роль приманки (“decoy”).

2. Вимірювання кутових координат безпілотних ПАШП необхідно для реалізації відповідного режиму стрільби будь-якого зенітного ракетного комплексу.

3. Для порівняно невеликої потужності безпілотних ПАШП та обмеженої кількості приймальних каналів ФАР серед адаптивних алгоритмів пеленгації перевагу має запропонований модифікований алгоритм теплового шуму, бо особливо в складній перешкодовій обстановці він забезпечує більший перепад між максимумами та мінімумами пеленгаційних характеристик та має дещо менші зміщення їх максимумів відносно істинних кутових координат ПАШП.

4. Для ефективної пеленгації великої кількості “ k ” близько розташованих джерел випромінювання кількість приймальних каналів адаптивної ФАР має бути як мінімум в 2 рази більша “ k ”.

Список літератури

1. Турчин Н. С. Состояние развития беспилотных летательных систем Израиля. *Военное обозрение*. 2019. № 7. С. 53-59.
2. Джонсон Д. Х. Применение методов спектрального оценивания к задачам определения угловых координат источников излучения. *ТНУЭР*. 1982. Т.70, №9. С.126-139.
3. Москалец Н. В. Сравнительный анализ методов оценки направления прихода сигналов. *Радиотехника*. 2017. Вып. 188. С. 126-135.
4. Коробков М. А. Корреляционные методы пеленгования источников излучения. *Молодой учёный*. 2014. № 13. С. 55-58.
5. Штрунова Е. С. Алгоритмы пространственного подавления активных шумовых помех в радиотехнических системах с частично адаптивными ФАР : дис. канд. техн. наук : 05.12.04 / Рязанский государственный радиотехнический университет. Рязань, 2013. 127 с.
6. Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. *Радио и связь*. 2003. С. 200.
7. Чиркунова Ж. В. Пространственная обработка сигналов в цифровых антенных решетках : дис. канд. техн. наук : 05.12.07 / Московский государственный институт электронной техники (Технический университет). Москва, 2009. 147 с.
8. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / науч. ред. В. С. Корольок. Москва : Наука, 1985. 138 с.
9. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решётки. Москва : Радио и связь, 1986. С. 81.
10. Gabriel W. F. Spectral analysis and adaptive array superresolution technique. *Proc IEEE. Antennas and Propag.* 1980. Vol.68, No.6. P. 654-667.
11. Borgiotti G. V., Kaplan L. J. Superresolutions of uncorrelated interference sources by using adaptive array. *Proc IEEE Trans. Antennas and Propag.* 1979. Vol. 27, No. 6. P. 842-845.
12. Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proc. IEEE. Antennas and Propag.* 1969. Vol. 57, No. 8. P. 1408-1418.

Надійшла до редколегії 16.03.2021

Схвалена до друку 13.04.2021

Відомості про авторів:

Кудряшов Валерій Євгенович

кандидат технічних наук
доцент кафедри Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8517-0513>

Леушин Сергій Геннадійович

старший викладач кафедри
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0345-588X>

Присяжний Анатолій Євгенович

кандидат технічних наук
старший викладач кафедри Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5891-8584>

Information about the authors:

Valeriy Kudryashov

Candidate of Technical Sciences
Senior Lecturer of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8517-0513>

Serhii Leushyn

Senior Instructor
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0345-588X>

Anatoliy Prisiazhniy

Candidate of Technical Sciences
Senior Instructor of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5891-8584>

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЕЛЕНГАЦИИ МАЛОВЫСОТНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ПОСТАНОВЩИКОВ
АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ**

В.Е. Кудряшов, С.Г. Леушин, А.Е. Присяжний

Статья посвящена сравнительному анализу адаптивных алгоритмов пространственной обработки сигналов в фазированных антенных решетках (ФАР) с точки зрения точности оценки угловых координат источников излучения и разрешающей способности по угловым координатам. Предложен новый модифицированный алгоритм пространственной обработки сигналов, имеющий лучшие показатели по точности и разрешающей способности по угловым координатам по сравнению с классическими методами. Приведены результаты моделирования пеленгационных характеристик линейных ФАР с пространственной обработкой сигналов в среде Matlab.

Ключевые слова: пеленгация, беспилотные постановщики помех, адаптивные алгоритмы, линейная ФАР.

**ASSESSMENT OF THE POSSIBILITIES OF DIRECTION FINDING OF LOW-ALTITUDE
UNMANNED PRODUCERS OF ACTIVE NOISE INTERFERENCE**

V. Kudryashov, S. Leushyn, A. Prisiazhniy

The article is devoted to the comparative analysis of adaptive algorithms of spatial signal processing in phased array antennas (FAR) in terms of accuracy of estimation of angular coordinates of radiation sources and resolution by angular coordinates. The current state of development of amplification technology and analog-to-digital signal conversion technology allows to create even in the upper part of the centimeter range of headlights with spatial processing of signals in the form of purely digital headlights, when instead of complex and cumbersome The urgency of solving the problem of direction finding of active noise generators (PAS) has increased significantly due to the emergence of low-altitude directors based on unmanned aerial vehicles (UAVs). In military radars, PASH direction finding is realized by estimating the angular position of the maximum of the antenna pattern receiving their signals, or by comparing the noise level in the main and auxiliary antenna, the pattern of which overlaps the side lobes of the main antenna. The number of targeted PASH in the field of view is significantly limited. Therefore, in modern air conditions, effective direction finding of a large number of unmanned PASH is possible only with the help of active headlights with spatial signal processing. A new modified algorithm for spatial signal processing is proposed, which has better indicators in terms of accuracy and resolution in angular coordinates compared to classical algorithms. The results of modeling the direction finding characteristics of linear headlights with spatial signal processing in Matlab environment are presented. The advantages of additional normalization of transmission coefficients of SPARE signal processing channels are shown.

Keywords: direction finding, unmanned interference detectors, adaptive algorithms, linear headlights.