

УДК 621.396.663

КОМБИНИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ АРР/КЕЙПОНА ДЛЯ ПЕЛЕНГА МНОЖЕСТВЕННЫХ ЦЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ОДНОРОДНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ

Коробков Михаил Александрович

Инженер-исследователь второй категории филиала ОАО «ОРКК»-«НИИ КП».

E-mail: Korobkov.M.A@yandex.ru.

Адрес: г.Москва, ул. Авиамоторная, д.53.

Аннотация: Предложен и проанализирован комбинированный метод пеленга множественных источников радиоизлучения (ИРИ), основанный на сочетании алгоритма Кейпона и алгоритма редукции ранга (АРР). Приведены результаты численного моделирования предлагаемого алгоритма, реализованного на однородной кольцевой антенной решетке (ОКАР), показавшие его работоспособность и устойчивость в условиях априорной неопределённости числа пеленгуемых ИРИ.

Ключевые слова: пеленгация, кольцевая решётка, алгоритм редукции ранга, обобщённый метод Кейпона.

Введение

Среди разрабатываемых за последние несколько десятилетий ковариационных алгоритмов пеленгования множественных источников радиоизлучения наиболее популярным остается алгоритм многосигнальной классификации (МСК), в иностранной литературе обозначаемый аббревиатурой MUSIC (Multiple Signal Classification) [1]. Пеленг ИРИ алгоритмом МСК помимо выполнения процедуры полного двумерного поиска по всему пространству азимута и угла места требует для корректной работы точной информации о числе пеленгуемых ИРИ. Оно может быть определено любым из известных алгоритмов, описанных, например, в работах [2], [3] и [4]. Подобная вычислительная процедура необходима для точного разделения ковариационной матрицы на два подпространства: сигнала и шума. Неверное определение числа пеленгуемых ИРИ приводит к появлению в спектре функции МСК ложных пиков, которые могут быть приняты за координаты несуществующего источника, а также к расширению спектральных пиков. Пример влияния точного и неточного определения числа пеленгуемых ИРИ на двумерный спектр МСК приведён на рис. 1.

К сожалению, в алгоритме МСК выполнение процедуры полного двумерного поиска по азимуту и углу места требует значительных вычислительных затрат, что ограничивает его применение в системах, работающих в режиме оперативного представления данных или си-

стемах реального времени. Одним из возможных решений проблемы быстрогодействия алгоритма МСК стал АРР [5], который позволил заменить процедуру полного двумерного поиска на процедуру вычисления корней полинома при сохранении фундаментального свойства разделения подпространства сигнала и шума.

Для АРР алгоритм МСК является основообразующим. Однако, если алгоритм МСК сохраняет свою работоспособность в случае, если вычисленное число источников больше заданного, то АРР является более чувствительным к точности определения числа пеленгуемых ИРИ. Если определяемое число пеленгуемых ИРИ не совпадает с заданным, то АРР оказывается неработоспособным. Это показано на рис. 2, где на комплексной плоскости отображены единичная окружность (символ « \circ »), заданные положения (символ « Δ »), а также корни АРР полинома (символ « \bullet ») для разного определяемого числа пеленгуемых ИРИ.

Исходя из приведённых примеров следует, что для сохранения работоспособности АРР при неверном определении числа пеленгуемых ИРИ следует выбирать такие ковариационные алгоритмы пеленга множественных ИРИ, которые уже в двумерной версии нечувствительны к ошибкам определения числа пеленгуемых ИРИ.

Цель работы состоит в разработке и анализе комбинированного алгоритма, позволяющего сохранить быстродействие АРР, при этом

устойчивого к априорно неизвестному числу пеленгуемых ИРИ.

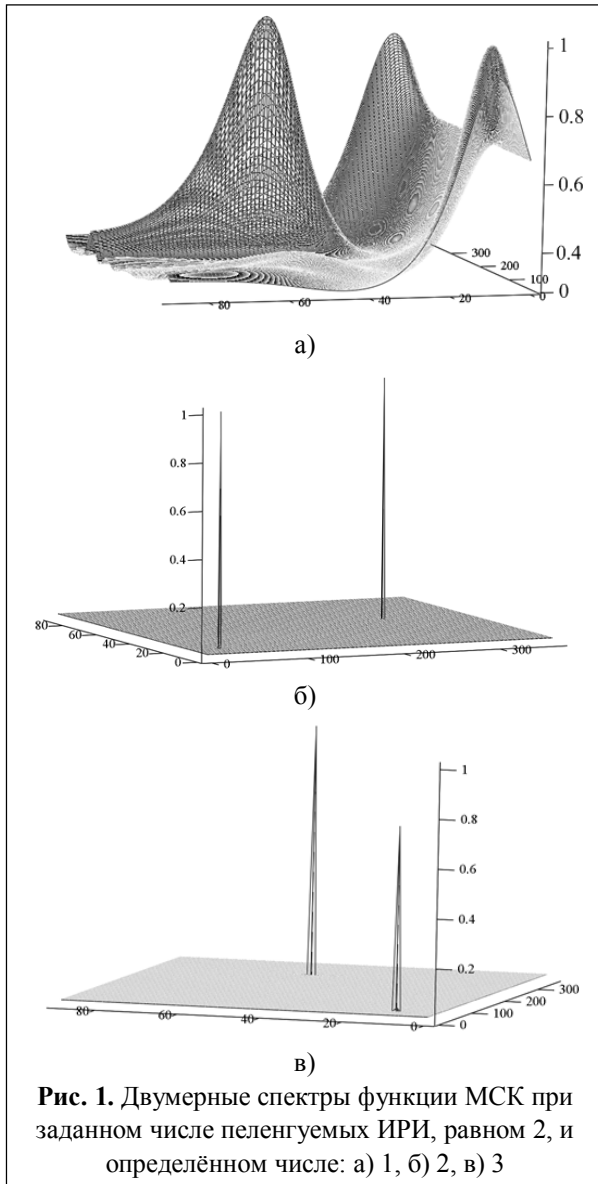


Рис. 1. Двумерные спектры функции МСК при заданном числе пеленгуемых ИРИ, равном 2, и определённом числе: а) 1, б) 2, в) 3

Теоретические исследования

Среди алгоритмов, не требующих информации о точном числе пеленгуемых ИРИ, следует выделить те, которые не используют принцип разделения подпространств сигнала и шума ковариационной матрицы. Это могут быть, например, алгоритмы сканирования лучом [6], адаптивной угловой характеристики [7], Кейпона [8], теплового шума [9], обобщённый алгоритм Кейпона [10]. Приведённые в работе [11] двумерные спектры и соответствующие формулы вычисления вышперечисленных

алгоритмов показывают, что наиболее подходящим для комбинации с АРР является обобщённый алгоритм Кейпона, двумерная функция которого имеет следующее представление:

$$f(\varphi, \theta) = [\mathbf{a}(\varphi, \theta)^H \mathbf{R}^{-m} \mathbf{a}(\varphi, \theta)]^{-1}, \quad (1)$$

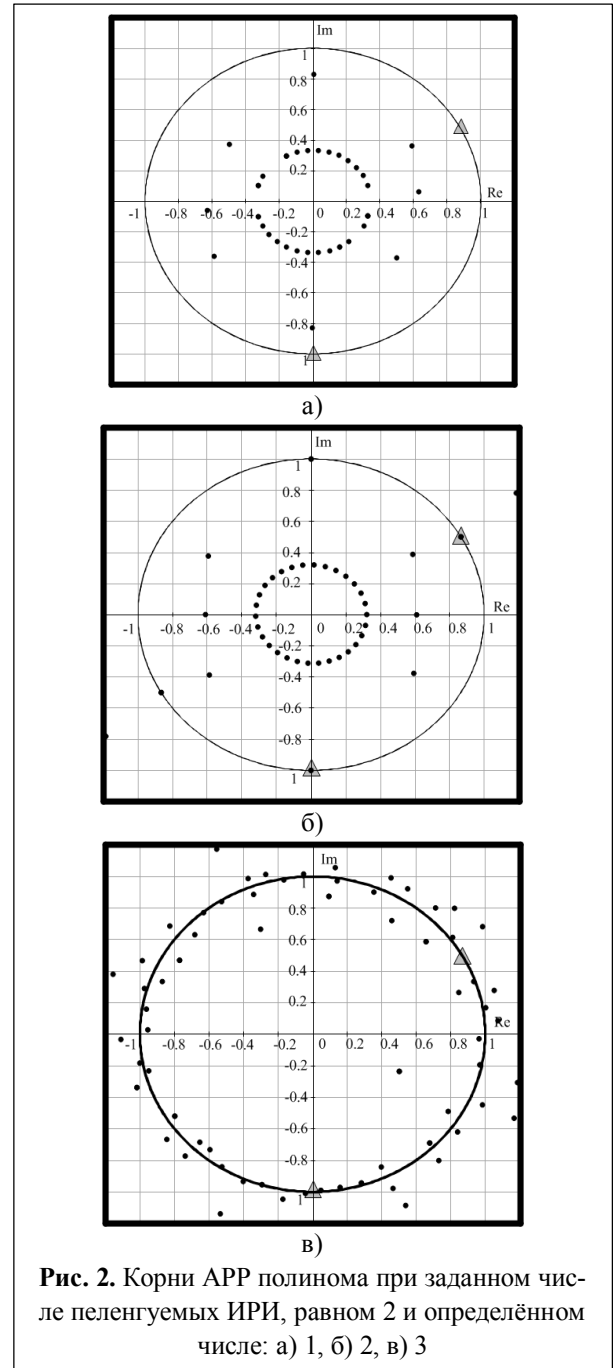


Рис. 2. Корни АРР полинома при заданном числе пеленгуемых ИРИ, равном 2 и определённом числе: а) 1, б) 2, в) 3

где $\mathbf{a}(\varphi, \theta)$ – вектор отклика ОКАР, \mathbf{R} – ковариационная матрица, m – степень, в которую возводится матрица \mathbf{R} . При $m=1$ формула (1)

соответствует алгоритму Кейпона, при $m = 2$ алгоритму теплового шума, при $m \geq 3$ – обобщённому алгоритму Кейпона.

Получение спектра по функции (1) не требует определения числа пеленгуемых ИРИ, что позволяет алгоритму сохранить работоспособность даже при их неверном определении.

Однако все вышеперечисленные ковариационные алгоритмы требуют выполнения процедуры полного двумерного поиска, что сказывается на их быстродействии. Выполняя над (1) преобразования, необходимые для получения АРР [12], придём к следующей формулировке комбинированного алгоритма АРР/Кейпона:

$$f(z) = \det \left\{ \mathbf{T}(1/z)^T \mathbf{R}_b^{-m} \mathbf{T}(z) \right\} = 0, \quad (2)$$

где $\det \{ \cdot \}$ – определитель матрицы, \mathbf{R}_b – ковариационная матрица в пространстве лучей,

$$\mathbf{T}(z) = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}(z) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 \\ \mathbf{PQ}(1/z) & \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

размера $(2M+1) \times (M+1)$,

$$\mathbf{Q}(z) = \text{diag} \left\{ z^{-M}, z^{-(M-1)}, \dots, z^{-2}, z^{-1} \right\},$$

размера $M \times M$,

$$z = e^{j\varphi},$$

$\mathbf{\Pi}$ – это $M \times M$ обменная матрица:

$$\mathbf{\Pi} = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

M – это наивысший порядок моды, возбуждающейся в ОКАР. Правило определения M [13]:

$$M = \lfloor k_0 r \rfloor$$

$k_0 = 2\pi / \lambda$ – волновое число, λ – длина волны пеленгуемого сигнала, r – радиус ОКАР, символ $\lfloor \cdot \rfloor$ определяет целую часть числа.

Для корректной работы предлагаемого смешанного алгоритма требуется также выполнить условие [13]:

$$N > 2M,$$

где N – количество элементов в ОКАР.

В отличие от оригинальных алгоритмов АРР и Кейпона, для получения результата предлагаемым комбинированным алгоритмом не требуется ни процедура разделения подпространств, ни полный двумерный поиск. Необходимо лишь отображение данных из пространства элементов в пространство лучей [13], вычисление обратной ковариационной матрицы данных в пространстве лучей и нахождение корней полинома.

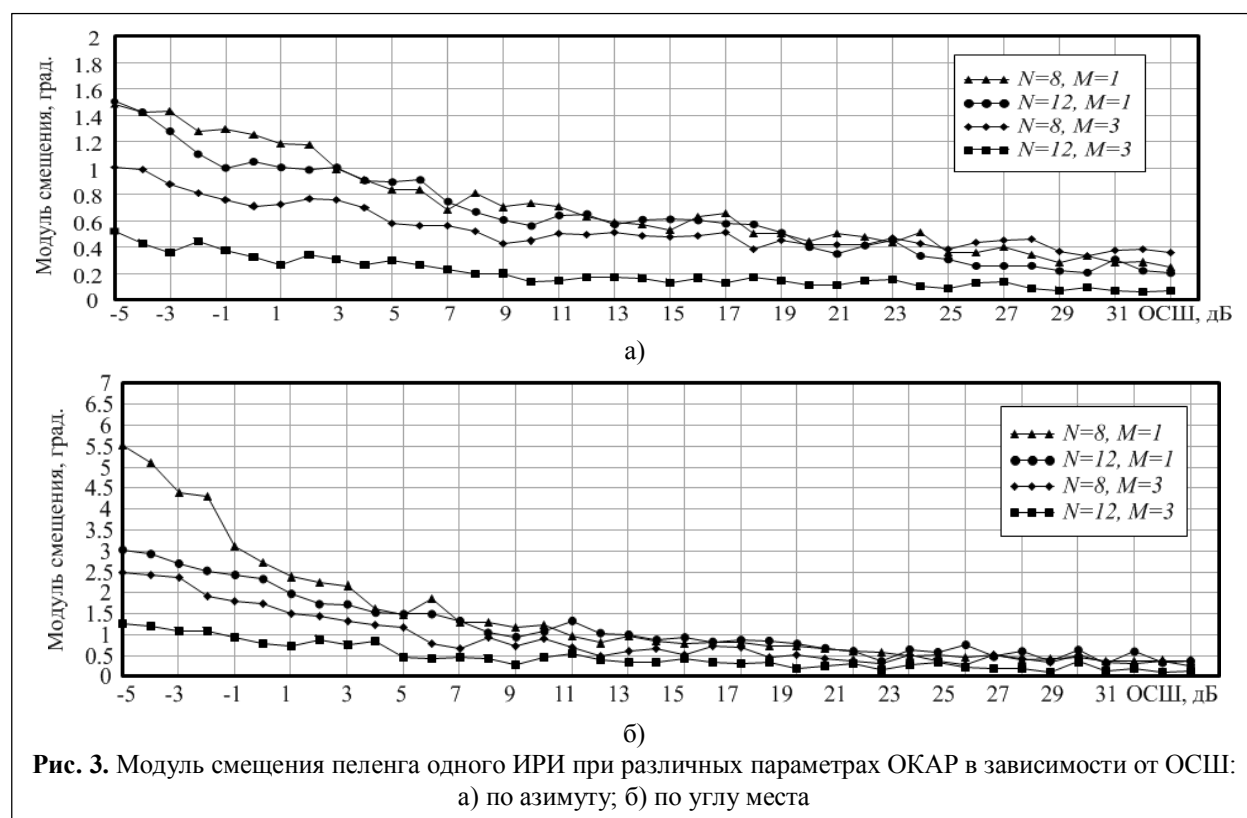
Так же следует отметить, что для выделения корней, соответствующих азимуту пеленгуемых ИРИ, можно использовать метод, описанный в [14], заменяя алгоритм МСК на алгоритм Кейпона.

Экспериментальные исследования

Рассмотрим поведение модуля смещения пеленга для различных ОКАР в зависимости от отношения сигнал-шум. Для построения нижеприведённых зависимостей проведено более 2200 испытаний алгоритма. Число выборок сигнала при этом составляло $K=226$. Пеленговался один ИРИ, координаты которого задавались случайным образом.

При фиксированных геометрических размерах антенной решётки (при $M=1$) количество элементов в ней оказывает незначительное влияние на модуль смещения пеленга (кривые отличаются не более чем на 0.3°). Такое поведение наблюдается и в случае традиционного АРР. При увеличении геометрических размеров ОКАР, что соответственно увеличивает число возбуждаемых фазовых мод ($M=3$), погрешность определения пеленга отличается примерно вдвое между ОКАР с $N=8$ и $N=12$ на протяжении всего исследуемого диапазона отношения сигнал-шум.

Проведём дополнительное исследование, выявляющее зависимость модуля отклонения рассчитанного пеленга от заданного при различном количестве доступных выборок сигнала. Моделирование проводится для ОКАР с различным количеством элементов



$N = 8$, $N = 12$ для количества выборок сигнала $K = 16$ и $K = 32$. Максимальное количество возбуждаемых фазовых мод для обеих ОКАР составляет $M = 3$.

Проведенное исследование показывает, что для получения приемлемой (не более 5°) погрешности пеленга следует применять алгоритм при наличии не менее 32 отсчётов сигнала с каждого элемента ОКАР. Отметим, что при столь малом числе выборок сигнала погрешность практически не зависит от геометрических размеров ОКАР.

Заключение

Предложен и проанализирован комбинированный алгоритм, объединяющий АРР и алгоритм Кейпона. Достоинство предлагаемого сочетания состоит в отсутствии необходимости определения точного числа пеленгуемых ИРИ при сохранении быстродействия, которым обладает АРР по сравнению с алгоритмами двумерного поиска. Показано, что при радиусе ОКАР от $r = 0.48\lambda$ до $r = 0.63\lambda$ даже при малом количестве выборок сигнала $K \geq 32$ ошибка пеленга не превышает 5° . Результаты проведён-

ного моделирования подтвердили теоретические предпосылки об эффективности комбинированного алгоритма.

Литература

1. Schmidt R.O. Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Trans. Antenna Propagation, vol. AP-34, 1986, Mar. pp. 271–280.
2. Huang L., Long T., Wu S. Source enumeration for high-resolution array processing using improved Gerschgorin radii without eigendecomposition // IEEE Trans. Signal Processing, vol. 56, pp. 5916–5925, Dec. 2008.
3. Wax M., Kailath T. Detection of signals by information theoretic criteria // IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 2, pp. 387–392, Apr. 1985.
4. Wax M., Ziskind I. Detection of the number of coherent signals by the MDL principle // IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 37, pp. 1190–1196, Aug. 1989.
5. Pesavento M., Bohme J.F. Eigenstructure-based azimuth and elevation estimation in sparse uniform rectangular arrays // Proc. SAM'02, Rosslyn, VA, Aug. 2002.
6. Barabell A.J., Capon J., DeLong D.F., Johnson J.R., Senne K.D. Performance Comparison of Super-resolution Array Processing Algorithms. – Lincoln Laboratory. MIT, June 1998. – 193 pp.

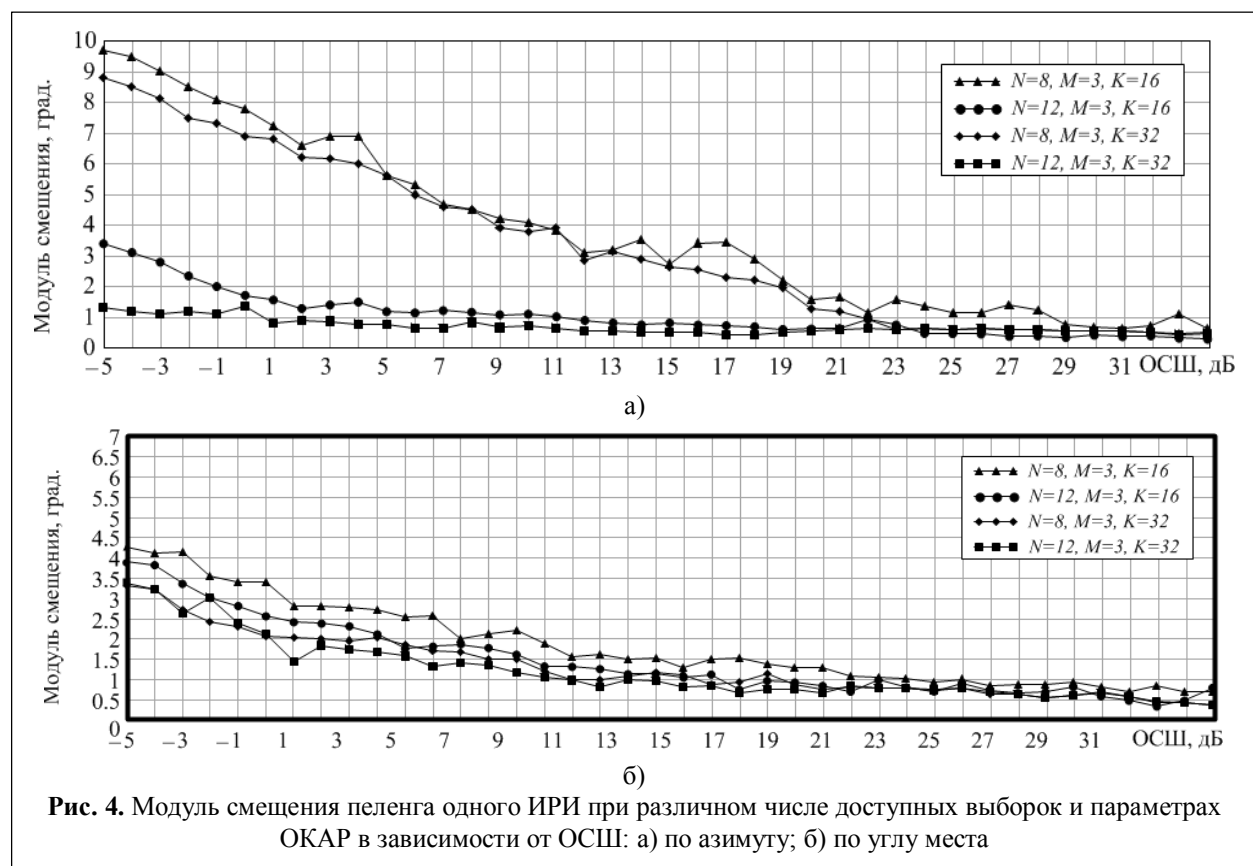


Рис. 4. Модуль смещения пеленга одного ИРИ при различном числе доступных выборок и параметрах ОКАР в зависимости от ОСШ: а) по азимуту; б) по углу места

7. Borgiotti G.V., Kaplan L.J. Super resolution of Uncorrelated Interference Sources by Using Adaptive Array Techniques // Trans. Antennas Propagation, AP-27, 842 (1979).”

8. Capon J. High-Resolution Frequency Wave number Spectrum Analysis // Proc. IEEE, 57, 1408 (1969).

9. Gabriel W. Spectral Analysis and Adaptive Array Superresolution Techniques // Proc. IEEE, 68, 654, 1980.

10. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Новые подходы к проблемам генерации, обработки, передачи, хранения, защиты информации и их применение». Нижний Новгород, 2007, 98 с.

11. Коробков М. А. Корреляционные методы пеленгования источников излучения // Молодой ученый. — 2014. — №13. — С. 55-58.

Поступила 12 февраля 2015 г.

12. Sherif A.E., Gershman A.B., Wong K.M. Rank Reduction Direction-of-Arrival Estimators With an Improved Robustness Against Subarray Orientation Errors // IEEE Transactions on signal processing, vol. 54, no. 5, may 2006.

13. Mathews C.P., Zoltowski M.D. Eigenstructure techniques for 2-D angle estimation with uniform circular arrays // IEEE Signal Processing. 1994. No 42(9). P. 2395–2407.

14. Коробков М.А. Метод устранения ложного пеленга множественных источников радиоизлучения при использовании пеленгационного алгоритма редукции ранга // Вестник РГРТУ – 2014 – №4 (50, часть 2) – С.16-20.

15. Коробков М.А. Алгоритм UCA–Root–Rare для задач пеленгования источников радиоизлучения однородной кольцевой антенной решёткой // Молодой ученый. – 2014. — №13. — С.47-54.

English

ARR/Capon combined algorithm for detection multiple targets by means of homogeneous circular antenna array

Mikhail Aleksandrovich Korobkov – research engineer (2 category), branch of OJSC «Integrated Aerospace Corporation» - «Research Institution of Space Instrument Engineering».

E-mail: Korobkov.M.A@yandex.ru.

Address: Moscow, Aviamotornaya Str., 53-2.

Abstract: Modern detection algorithms can be classified into some subgroups: amplitude, phase and covariance. The advantage of the latter is simultaneous detection capability of several radio-frequency sources. However detection by conventional covariance algorithms, such as MUSIC, Capon, Thermal noise, Adaptive angle performance, etc. involves heavy computing efforts caused by complete two-dimensional search according to azimuth and elevation. "Prompt" modifications of such algorithms which use geometrical singularities of antenna array are known. For example, "prompt" modification of MUSIC algorithm is Root-MUSIC algorithm which is applicable only with homogeneous linear antenna arrays and rank reduction algorithm that is applicable to homogeneous circular antenna arrays. The disadvantage of the two given "prompt" algorithms is "hereditary" predisposition to necessity of precise determination of located sources number. This routine is indispensable when sharing subspaces of a signal and noise. The paper demonstrates that "prompt" algorithms can appear inefficient in case of incorrect calculation of the located sources number. Therefore the purpose of this research is the development of the combined algorithm which would keep high-speed performance algorithm of rank reduction and be steady in operation under the conditions of the prior uncertainty of the located sources number. Critical analysis of the known methods reveals that the most suitable for combination with rank reduction algorithm is a class of generalized Capon algorithms, in particular conventional Capon algorithm for the operation of which prior information or precise determination of the located source number are not required. Experimental investigations of bearing accuracy by means of the proposed mixed algorithm have been conducted by detection simulation with the help of homogeneous circular antenna arrays of various configurations as well as at different number of available signal selection. The results of simulation showed that bearing error did not exceed 5° at radius of OKAR from $r = 0,48\lambda$ to $r = 0,63\lambda$, even at little number of signal selections $K \geq 32$.

Key words: detection, grid, circular antenna arrays, rank reduction algorithm, generalized Capon method.

References

1. Schmidt R.O. Multiple emitter location and signal parameter estimation. - IEEE Trans. Antenna Propagation, vol. AP-34, 1986, Mar. pp. 271-280.
2. Huang L., Long T., Wu S. Source enumeration for high-resolution array processing using improved Gerschgorin radii without eigendecomposition. - IEEE Trans. Signal Processing, vol. 56, pp. 5916-5925, Dec. 2008.
3. Wax M., Kailath T. Detection of signals by information theoretic criteria. - IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 2, pp. 387-392, Apr. 1985.
4. Wax M., Ziskind I. Detection of the number of coherent signals by the MDL principle. - IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 37, pp. 1190-1196, Aug. 1989.
5. Pesavento M., Bohme J.F. Eigenstructure-base azimuth and elevation estimation in sparse uniform rectangular arrays. - Proc. SAM' 02, Rosslyn, VA, Aug.2002.
6. Barabell A.J., Capon J., DeLong D.F., Johnson J.R., Senne K.D. Performance Comparison of Superresolution Array Processing Algorithms. - Lincoln Laboratory. MIT, June 1998. - 193 pp.
7. Borgiotti G.V., Kaplan L.J. Super resolution of Uncorrelated Interference Sources by Using Adaptive Array Techniques. - Trans. Antennas Propagation, AP-27, 842 (1979)."
8. Capon J. High-Resolution Frequency Wave number Spectrum Analysis. - Proc. IEEE, 57, 1408 (1969).
9. Gabriel W. Spectral Analysis and Adaptive Array Superresolution Techniques. - Proc. IEEE, 68, 654, 1980
10. Yermolaev V.T., Flaksman A.G. Methods of parameter estimation of signal sources and noises received by an antenna array. Teaching material for the program of advanced training «New approaches to problems of generation, processing, transmission, storing, protection of information and their application». Nizhny Novgorod, 2007, 98 p.
11. Korobkov M.A. Correlation methods of detection of radiation sources. - Molodoy Ucheny. - 2014. - №13. - P. 55-58.
12. Sherif A.E., Gershman A.B., Wong K.M. Rank Reduction Direction-of-Arrival Estimators With an Improved Robustness Against Subarray Orientation Errors.- IEEE Transactions on signal processing, vol. 54, no. 5, may 2006.
13. Mathews C.P., Zoltowski M.D. Eigenstructure techniques for 2-D angle estimation with uniform circular arrays. - IEEE Signal Processing. 1994. No 42 (9). P. 2395-2407.
14. Korobkov M.A. Removal methods of false detection of multiple sources of radio-frequency when using detection algorithm of rank reduction. - Vestnik RGRTU - 2014 - №4 (50, a part 2) - P.16-20.
15. Korobkov M.A. UCA-Root-Rare Algorithm for detection of radio-frequency sources of homogeneous circular array. - Molodoy Uchony. - 2014. - №13. - P.47-54.