

УДК 621.396

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЛГОРИТМА ОЦЕНИВАНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА РАДИОСИГНАЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ ВХОДНЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ

Сафонова Анастасия Владимировна

аспирант кафедры радиотехнических систем
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

E-mail: anastasia-altair@mail.ru.

Адрес: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

Аннотация: Исследовано влияние структуры алгоритма на эффективность оценки угловых координат. Рассмотрены случаи применения антенной решетки с параллельным расположением элементов, а также антенных решеток L-формы и 2D-L-формы. Приведены результаты моделирования и сравнительный анализ предложенных алгоритмов.

Ключевые слова: угловые координаты, точность определения угловых координат, СКО, алгоритм оценки угловых координат, вычислительные затраты.

Введение

В настоящее время проблема оценки координат источников радиоизлучений является актуальной и имеет практическое применение в радиолокации [1], гидролокации [2], мобильных телекоммуникационных системах [3] и во многих других областях современной радиотехники [4,5]. Основные алгоритмы оценки направления прихода сигнала глубоко изучены и имеют множество модификаций [6-9]. Алгебраический подход к обработке сигналов в антенных решетках (АР) позволяет создавать все новые алгоритмы спектрального оценивания [10,11]. Многие современные алгоритмы обладают высокой точностью определения угловых координат источника радиосигнала, однако большинство известных алгоритмов требуют разложения кросс-спектральной матрицы по собственным векторам или сингулярного разложения матрицы полученных данных [12]. Эти операции связаны с большими вычислительными затратами [13], поэтому их применение ограничено в ряде задач обработки сигнала в реальном времени.

Чтобы уменьшить вычислительные затраты при оценке направления прихода сигнала Маркосом предложен Propagator-метод (PM), не требующий разложения на собственные векторы кросс-спектральной матрицы или сингулярного разложения матрицы полученных данных [14]. Информация об угловых координатах

извлекается из полученного сигнала путем разделения сформированной матрицы управляющих векторов при условии парного соответствия между азимутом и углом места пеленгуемых источников излучения. Кроме того, если угол места лежит в секторе от 70 до 90 градусов, то его оценка может быть недостаточно точной. Этот диапазон является типичным для мобильных телекоммуникационных систем, что существенно ограничивает применение предложенного алгоритма.

Существующую проблему можно решить путем использования антенной решетки L-формы. Идея использования таких АР не нова [15], она описана еще в 1997 году Фемендесом де Рио и Катедро-Пересом, но АР L-формы в данной работе отличаются от [15]. В предложенном методе элементы расположены на осях x-z и y-z, в то время как в [15] – на осях x-y.

Цель данной работы показать, как влияет изменение структуры алгоритма на точность оценки координат источника излучения.

Алгоритм оценки угловых координат применительно к антенной решетке L-формы

При использовании АР L-формы проблема с оцениванием координат, лежащих в секторе от 70 до 90 градусов устраняется, но появляется аналогичная проблема, если азимут лежит в секторе от 0 до 20 градусов. Однако при использовании двух АР L-формы в плоскостях x-z

и y-z данная проблема может быть полностью устранена, а СКО существенно сокращена.

На рис. 1 представлена АР L-формы, которая работает в плоскости x-z вместо плоскости x-y, используемой в [15]. Каждая линейная АР состоит из N-1 элементов. Пусть X и Y – две подрешетки линейной АР на оси z, а Z и W – две подрешетки линейной АР на оси x. Каждая подрешетка состоит из N-1 элементов. Предположим, что имеется K узкополосных ИИ, где k-ый источник имеет координаты $(\phi_k; \theta_k)$, где ϕ_k – азимут, а θ_k – угол места ИИ, $k=1, \dots, K$.

Пусть векторы сигнала размерностью $(N-1) \times 1$, принятые подрешетками X и Y, равны $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_{N-1}(t)]^T$ и $Y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_{N-1}(t)]^T$ соответственно, где T – знак транспонирования. Принятые вектора могут быть записаны как

$$X(t) = A(\theta)S(t) + n_x(t), \quad (1)$$

$$Y(t) = A(\theta)\Phi_1 S(t) + n_y(t), \quad (2)$$

где

$$A(\theta) = (a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_K)), \quad (3)$$

$$a(\theta_k) = (1, q_k, q_k^2, \dots, q_k^{N-2})^T, k=1, \dots, K \quad (4)$$

$$q_k = \exp\left(-j \frac{2\pi d \cos \theta_k}{\lambda}\right), \quad (5)$$

а S – вектор сигнала размерностью $K \times 1$ для K источников сигнала, n_x и n_y – векторы аддитивного белого Гауссовского шума размерностью $(N-1) \times 1$. Наибольшее значение в показателе степени q в формуле (4) равно $(N-2)$, т.к. общее количество элементов на оси z равно $(N-1)$. Две подрешетки с максимальным перекрытием элементов расположены на оси z, поэтому каждая подрешетка может иметь максимум $(N-1)$ элементов. Матрица Φ_1 в выражении (2) – это диагональная матрица, размерностью $K \times K$, содержащая информацию об угле места θ_k , которая может быть записана как

$$\Phi_1 = \text{diag}(q_1, q_2, \dots, q_K). \quad (6)$$

Найдем $\hat{\theta}_k$, используя РМ[16]:

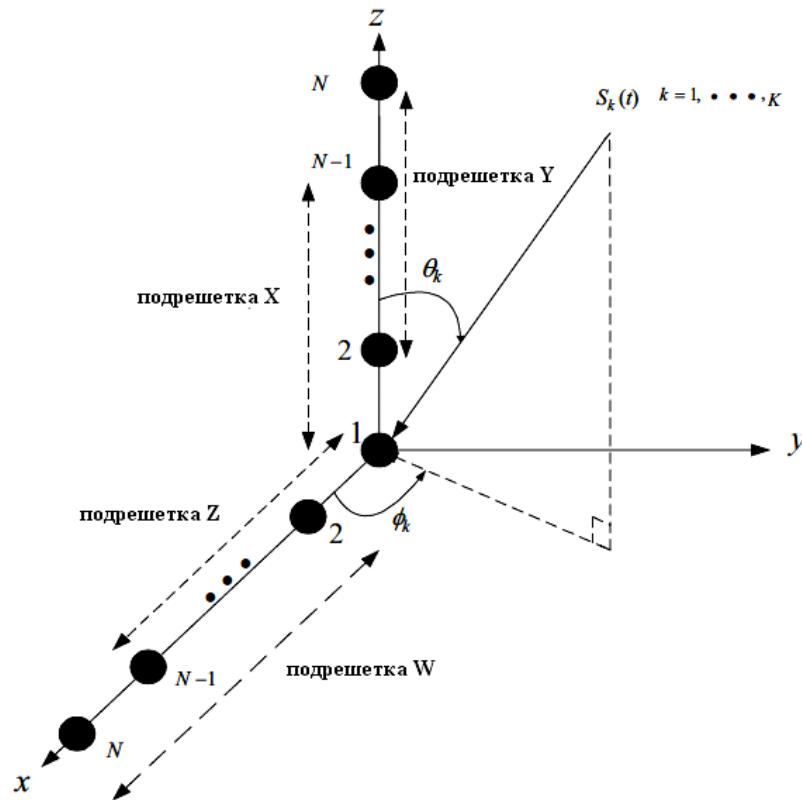


Рис. 1. АР L-формы

$$\hat{\theta}_k = \cos^{-1} \left[\frac{\lambda}{2\pi d_x} \text{phase}(\Phi_{1,k})_{k,k} \right]. \quad (7)$$

Затем найдем оценку азимута угла ϕ . Векторы принятых сигналов берем с элементов подрешетки Z и подрешетки W на оси x, которые могут быть записаны как векторы размерностью $(N-1) \times 1$ $Z(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_{N-1}(t)]^T$ и $W(t) = [w_1(t), w_2(t), \dots, w_{N-1}(t)]^T$ соответственно.

Затем полученные векторы могут быть переписаны как

$$Z(t) = A(\theta, \varphi)S(t) + n_z(t), \quad (8)$$

$$W(t) = A(\theta, \varphi)\Phi_{2,x}S(t) + n_w(t), \quad (9)$$

где

$$A(\theta, \varphi) = (a(\theta_1, \varphi_1), a(\theta_2, \varphi_2), \dots, a(\theta_k, \varphi_k)),$$

$$a(\theta_k, \varphi_k) = (1, u_k, u_k^2, \dots, u_k^{N-2})^T, k = 1, \dots, K,$$

$$u_k = \exp\left(-j \frac{2\pi d \sin \theta_k \cos \phi_k}{\lambda}\right) \quad (10)$$

и n_z, n_w - аддитивный белый гауссовский шум, представленный в виде векторов, элементы которых могут принимать значения, равные нулю и дисперсии σ^2 .

Пусть $\Phi_{2,x}$ - диагональная матрица размерностью $K \times K$, использующая ось X и содержащая информацию об азимуте и угле места (θ_k, φ_k) , которая может быть записана как

$$\Phi_{2,x} = \text{diag}(u_1, u_2, \dots, u_K). \quad (11)$$

Так матрица $\Phi_{2,x}$ и, в конечном счете, азимут, могут быть найдены путем применения РМ [16] к информации с элементов оси X (при уже известном угле места) из (10) как

$$\hat{\phi}_{k,x} = \cos^{-1} \left[\frac{\arg(\Phi_{2,x})_{kk}}{(2\pi d \sin \hat{\theta}_k) / \lambda} \right], \quad (12)$$

где угол места находится из (7).

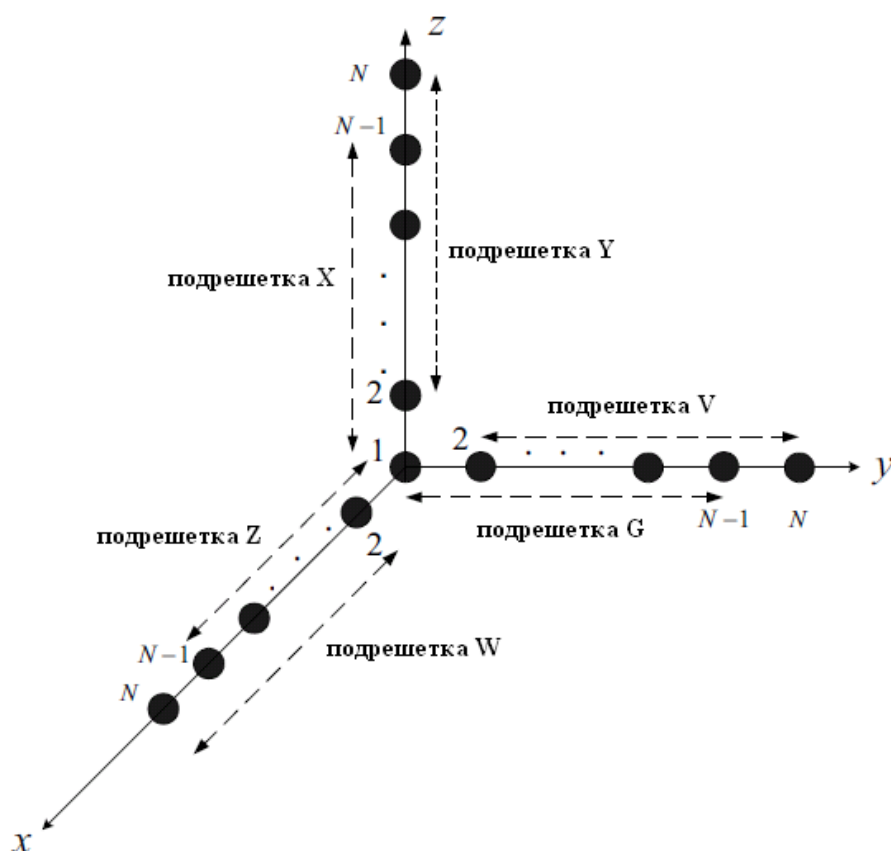


Рис. 2. AP 2DL-формы

Алгоритм оценки угловых координат применительно к антенной решетке 2DL-формы

На рис. 2 представлена АР 2DL- формы, состоящая из двух АР L-формы, расположенных в плоскостях x-z и y-z, т.е. включающая в себя 3 линейные АР, элементы которых расположены на осях x, y и z, каждая из которых состоит из N-1 элементов. При этом элемент, расположенный в центре является общим.

Пусть X и Y – две подрешетки линейной АР, расположенной на оси z, Z и W – две подрешетки линейной АР, расположенной на оси x, G и V – две подрешетки линейной АР, расположенной на оси y. Каждая подрешетка состоит из N-1 элементов.

АР L-формы, использующая подрешетки X, Y, Z и W, может обеспечить оценку азимута $\hat{\phi}_{k,x}$ и угла места $\hat{\theta}_k$. Угол места при этом определяется без ошибки, но оценка азимута может быть не достоверной, если его значение лежит в пределах от 0 до 15 градусов, в зависимости от отношения сигнал-шум. АР L-формы, использующая подрешетки X, Y, V и G, так же может обеспечить оценку азимута $\hat{\phi}_{k,y}$ и угла места $\hat{\theta}_k$. Но в этом случае оценка азимута может быть недостоверной при значении угла, лежащем в секторе от 75 до 90 градусов. Объединение этих двух АР позволяет полностью избежать ошибок в оценке азимута. Т.е. оценка азимута может быть найдена (записана) следующим образом:

$$\hat{\phi}_k = \begin{cases} \frac{1}{2}(\hat{\phi}_{k,x} + \hat{\phi}_{k,y}), & \text{если } \hat{\phi}_{k,x} \text{ и } \hat{\phi}_{k,y} \in I \\ \hat{\phi}_{k,x}, & \text{если } \hat{\phi}_{k,x} \in R, \hat{\phi}_{k,y} \in C \\ \hat{\phi}_{k,y}, & \text{если } \hat{\phi}_{k,x} \in C, \hat{\phi}_{k,y} \in R, \end{cases} \quad (13)$$

где R – множество действительных чисел, C – множество комплексных чисел.

Оценка азимута $\hat{\phi}_{k,y}$ проводится с использованием АР, элементы которой лежат на оси y, при этом мы имеем два вектора принятых сигналов с подрешеток G и V, имеющих размерность $(N-1) \times 1$, которые могут быть запи-

саны, как $G(t) = [g_1(t), g_2(t), \dots, g_{N-1}(t)]^T$ и $V(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_{N-1}(t)]^T$ соответственно. Затем принятые вектора могут быть переписаны как:

$$G(t) = A(\theta, \varphi)S(t) + n_g(t) \quad (14)$$

$$V(t) = A(\theta, \varphi)\Phi_{2,y}S(t) + n_v(t) \quad (15)$$

где

$$a(\theta_k, \varphi_k) = (1, v_k, v_k^2, \dots, v_k^{N-2})^T, k = 1, \dots, K$$

$$v_k = \exp\left(-j \frac{2\pi d \sin \theta_k \sin \varphi_k}{\lambda}\right), \quad (16)$$

$$\Phi_{2,y} = \text{diag}(v_1, v_2, \dots, v_K)$$

и n_g, n_v – аддитивный белый гауссовский шум, представленный в виде векторов, элементы которых могут принимать значения, равные нулю и дисперсии σ^2 .

Таким образом, оценка азимута $\hat{\phi}_{k,y}$ может быть найдена из (16) как

$$\hat{\phi}_{k,y} = \sin^{-1} \left[\frac{\arg(\Phi_{2,x})_{kk}}{(2\pi d \sin \hat{\theta}_k) / \lambda} \right]. \quad (17)$$

Предполагается, что имеется только один источник излучения с координатами $(\theta; \varphi)$, где θ – угол места, а φ – азимут, АР включает в себя 15 элементов, отношение сигнал-шум равно 10 дБ, расстояние между соседними элементами АР равно половине длины волны принимаемого сигнала, число независимых испытаний – 250, объем выборки – 200.

На рис. 3 представлена зависимость СКО в градусах от значений азимута и угла места, лежащих в секторе от 0 до 90 градусов, для модифицированного алгоритма РМ [16].

Из графика видно, что в секторе от 70 до 90 градусов точность оценки ухудшается и СКО принимает значения от 1 до 3 градусов. Также наблюдается увеличение СКО до 2 градусов, когда азимут и угол места принимают значения от 0 до 20 градусов.

На рис. 4 представлена зависимость СКО в градусах от значений азимута и угла места, лежащих в секторе от 0 до 90 градусов, для

LPM алгоритма (при использовании AP L-формы).

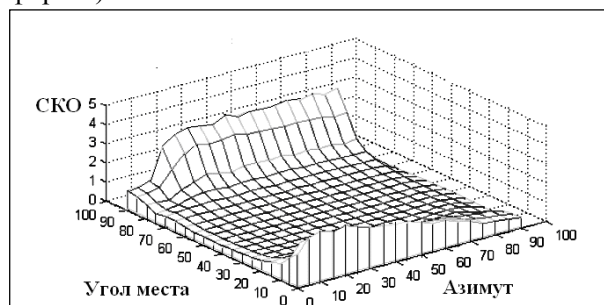


Рис. 3. Зависимость СКО в градусах от значений азимута и угла места источника излучения при использовании РМ алгоритма

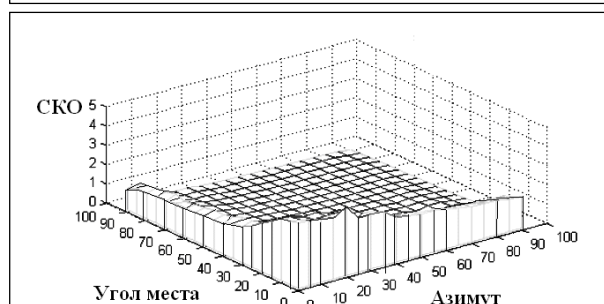


Рис. 4. Зависимость СКО в градусах от значений азимута и угла места источника излучения при использовании LPM алгоритма

Из полученных результатов можно сделать вывод, что при использовании AP L-формы точность определения координат в секторе от 70 до 90 градусов выше, чем при использовании AP с параллельным расположением элементов и СКО не превышает 1 градуса. Однако в данном случае наблюдается увеличение СКО до 2,5 градусов в секторе от 0 до 20 градусов.

На рис. 5 представлена зависимость СКО в градусах от значений азимута и угла места, лежащих в секторе от 0 до 90 градусов для 2D-LPM алгоритма (при использовании AP 2D-L-формы).

При использовании AP 2D-L-формы устраняется проблема определения азимута и угла места в секторе от 70 до 90 градусов, оценка координат производится с высокой точностью. Наибольшая ошибка наблюдается в секторе от 0 до 20 градусов, но и в этом случае СКО не превышает 1 градуса.

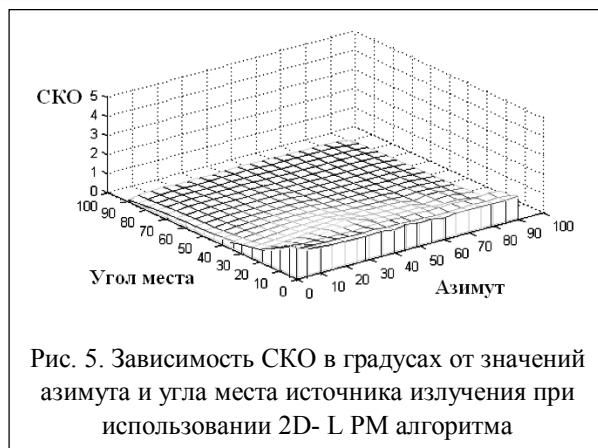


Рис. 5. Зависимость СКО в градусах от значений азимута и угла места источника излучения при использовании 2D-LPM алгоритма

Основные характеристики предложенных алгоритмов сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Основные характеристики предложенных алгоритмов

Тип AP	-форма	L-форма	2D-L-форма
Диапазон определения азимута и угла места	$(0, 2\pi), (0, \pi/2)$	$(0, 2\pi), (0, \pi)$	$(0, 2\pi), (0, \pi)$
Диапазон наибольшей ошибки оценивания координат	$70^{\circ} - 90^{\circ}$	$0^{\circ} - 20^{\circ}$	—
Парное соответствие между азимутом и углом места	требуется	не требуется	не требуется
Используемый метод	PM	PM	PM
Максимальное значение СКО, град	3	2,5	0,9

Из данных, приведенных в таблице 1, можно сделать вывод, что в зависимости от применения различных структур алгоритма определения угловых координат можно существенно повысить эффективность оценки азимута и угла места. Во-первых, использование AP L-формы увеличивает диапазон определения угла места источника излучения в 2 раза, по сравнению с использованием AP с параллельным расположением элементов. Во-вторых, при использовании LPM алгоритма и 2D-LPM алгоритма не требуется парного соответствия между угловыми координатами, т.е. оценка азимута и угла места производится независимо друг от друга.

Кроме того, при использовании AP L-формы проблема с оцениванием координат, лежащих в секторе от 70 до 90 градусов, устраняется, но появляется аналогичная проблема, если азимут лежит в секторе от 0 до 20 градусов. Однако при использовании двух AP L-формы в плоскостях x-z и y-z данная проблема может быть полностью устранена, а значение СКО существенно сокращено.

Заключение

Использование 2D-LPM алгоритма позволяет получить достоверную оценку координат независимо от угла прихода сигнала. При этом оценка азимута не зависит от оценки угла места источника излучения, и наоборот. Кроме того, 2D-LPM алгоритм превосходит PM алгоритм, использующий AP с параллельным расположением элементов, и LPM алгоритм по точности, несмотря на то, что в основе лежит один и тот же модифицированный PM. Таким образом, использование AP различной формы и изменение структуры алгоритма может существенно увеличить эффективность применяемого метода и расширить область применения.

Литература

1. Григорян Д.С. Сверхразрешение по частоте при обработке радиолокационных сигналов когерентными методами линейного предсказания вперед-назад с прореживанием данных. – Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2011. – №7. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul11/7/text.html>
2. Литвиненко С.Л. Экспериментальные исследования подсистемы пассивной гидролокации гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012 – №3. – С.92-101.
3. Flieller A., Larzabal P., Clegeot H. A placements of high resolution array processing techniques for mobile communication system, in Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp., Paris, France, pp. 606-611, 1994.
4. Зотов С.А., Нечаев Ю.Б. Метод оценки количества сигналов в задачах радиопеленгации при небольшом времени наблюдения // Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 2008. - № 6. - С. 3-9.

Работа выполнена при финансовой поддержке МинОбрНауки РФ Контракт № 14.574.21.00.12 от 17.06.2014.

Поступила 16 февраля 2015 г.

5. Аджемов С., Бокк Г.О., Зайцев А.Г. и др. Исследование алгоритмов сверхразрешения в адаптивных антенных решетках // Радиотехника. – 2000. – №11. – С. 66-71.
6. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – М.: Радио и связь, 2003. – 200 с.
7. Гейбриел У.Ф. Спектральный анализ и методы сверхразрешения с использованием адаптивных решеток// ТИИЭР. – 1980. – Т. 68. – № 6. – С. 19–32.
8. Зотов С.А., Макаров Е.С., Нечаев Ю.Б. Методы сверхразрешения в задачах радиопеленгации// Информационные процессы и технологии в обществе и экономике. – 2006. – №3. – С. 12-26.
9. Косяков В.М., Свиридов М.А. Сравнительная оценка методов спектрального анализа по совокупности показателей эффективности // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2013. – № 4. – С. 23-27.
10. Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития / Под ред. А.И. Канащенкова, В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 416 с.
11. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения пер. с англ. - М.: Мир, 1990. – 584 с.
12. Luta Liu, Qingbo Ji, Yilin Jiang, Improved Fast DOA Estimation Based on Propagator Method, APSIPA ASC 2011, URL: http://www.apsipa.org/proceedings_2011/pdf/APSIPA319.pdf.
13. Hongshu Liao, Lu Gan, Ping Wei, 2-D ESPRIT algorithm for 2-D DOA estimation, Journal of information and computational science, 10, 2011, 1961-1871.
14. Marcos S., Marsal A., Benidir M. The propagator method for source bearing estimation, Signal Processing 42 (2) (March 1995), 121–138.
15. Fernandez del Rio J. and Catendra-Peraz M. The matrix pencil method for two-dimensional direction of arrival estimation employing L-shaped array, IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol. 45, pp. 1693-1694, November 1997.
16. Кошелев В.И., Сафонова А.В. Модифицированный Propagator метод оценки направления прихода радиосигнала // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2014. – №47. – С. 53-58.

English

Effectiveness of an algorithm of angular coordinates estimation of radio signal source by various processing methods of input implementations

Anastasiya Vladimirovna Safonova – post-graduate student Department of radio engineering systems «Ryazan State Radio Engineering University».

E-mail: anastasia-altair@mail.ru.

Address: 390005, Ryazan, Gagarin Street, 59/1.

Abstract: The knowledge of angular coordinates of transmitter is indispensable in many practical tasks of radio detection, hydro acoustics and other fields of nowadays radio engineering. Current methods of spectral estimation using the data gained by the antenna array enable to form highest reliable estimates of angular coordinates of radio signal source. The works of many domestic and foreign scientists deal with the research and development of an algorithm of estimation of coordinates. Application of the algebraic approach to signal processing received by an antenna array enables to create all new algorithms of spectral estimation and to enhance effectiveness of the known ones. This work research displays the influence of algorithm structure on the effectiveness of angular coordinates estimation. Cases of application of an antenna array with parallel layout of elements, and also L-shaped antenna arrays and 2D - L-shaped are considered. The results of simulation and comparative analysis of the proposed algorithms are given. The information on angular coordinates is derived if there is matching between the azimuth and the angle of elevation when an antenna array with parallel layout of elements is used. Besides, if the angle of elevation is in the range from 0 to 90 degrees then its estimation can be uncertain. The problem of coordinates estimation in the range from 70 to 90 degrees is solved when using the L-shaped antenna array but the similar problem arises if the azimuth range is from 0 to 20 degrees. However this problem can be completely settled if two L-shaped antenna arrays in x-z and y-z planes are utilized, and SD is essentially reduced. In this way the estimation of the azimuth is not dependent on the estimation of the angle of elevation of the transmitter and vice versa. Thus the application of antenna arrays of various shapes and the change of algorithm structure can significantly increase the effectiveness of the utilized method and extend its field of application.

Key words: angular coordinates, determination accuracy of angular coordinates, SD, estimation algorithm of angular coordinates, computing efforts.

References

1. Grigoryan D.S. Super resolution as per frequency at radar signals processing by the coherent methods of the linear prediction: back and forth with the data reduction - "Zhurnal radioelektroniki" online magazine. - 2011.-№7. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul11/7/text.html>
2. Litvinenko S.L. Experimental research of subsystem of passive echo sounding of sonar navigating system with ultrashort base. - Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki.. - 2012.-№3. - p.92-101.
3. A. Flieller, P. Larzabal, H. Clegeot, A placations of high resolution array processing techniques for mobile communication system, in Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp., Paris, France, pp. 606-611, 1994.
4. Nechayev Yu.B. The estimation method of the amount of signals for radio direction finding within little observation period / S.A. Zotov, Yu.B.Nechayev. - Izv. vuzov. Radioelektronika. - 2008. - № 6 - p. 3-9.
5. Adzhemov S. The study of algorithms of super resolution in adaptive antenna arrays. - S. Adzhemov, G.O. Bokk, A.G.Zaytsev and colleagues. - Radiotekhnika. - 2000. - №11. – P. 66-71.
6. Ratynsky M.V. Adaptation and superresolution in antenna arrays. - M.: Radio i svyaz, 2003. - 200 p.
7. Gabriel U.F. The spectral analysis and methods of superresolution with usage of the adaptive arrays. - TIIER.- 1980. - Vol. 68. - № 6. - p. 19-32.
8. Zotov S.A., Makarov E.S., Nechayev Yu.B. The methods of superresolution for radio direction finding. - Informatsionnye protsessy i tekhnologii v obshchestve i ekonomike.. - 2006. - №3. - p. 12-26.
9. A comparative estimation of spectral analysis methods as per bulk of parameters of effectiveness / V. M.Kosyakov, M.A.Sviridov. - Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy. - 2013. - № 4. - p. 23-27.
10. Protection of radar detection systems against interference. Status and development trends. - Ed. by A.I. Kanashchenkova, V.I. Merkulova. - M.: Radiotekhnika, 2003. - 416 p.
11. Marple Jn. S.L. Digital spectral analysis also are more its application. Transl. from Engl. - M.: Mir, 1990. - 584 p.
12. Lutao Liu, C Qingbo Ji, C Yilin Jiang Improved Fast DOA Estimation Based on Propagator Method, APSIPA ASC 2011, URL: http://www.apsipa.org/proceedings_2011/pdf/APSIPA319.pdf.
13. Hongshu Liao, Lu Gan, Ping Wei, 2-D ESPRIT algorithm for 2-D DOA estimation, Journal of information and computational science, 10, 2011, 1961-1871.