

Моноимпульсный радиопеленгатор с использованием цифровой антенной решетки

Чистяков В.А.

*Компания «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф.
Решетнёва, ул. Ленина, 52, Железногорск, Красноярский край, 662972, Россия
e-mail: vitalys1367@mail.ru*

Статья поступила 11.11.2020

Аннотация

В статье предлагается цифровой метод формирования суммарного и разностного каналов моноимпульсного радиолокатора с использованием малоэлементной плоской антенной решетки, для определения азимута и угла места объекта. Получена пеленгационная характеристика для данной антенной решетки, а также дан вид диаграммы направленности в различных плоскостях. Определены характеристики сигнально-пространственной обстановки, влияющие на эффективность работы моноимпульсного радиопеленгатора.

Ключевые слова: цифровая антенная решетка, суммарно-разностный метод пеленгования, пеленгационная характеристика, диаграмма направленности, моноимпульсный пеленгатор.

В настоящее время в задачах радиолокации широкое применение находят антенные системы, выполненные в виде цифровых фазированных антенных решеток

(ЦФАР) [1-8]. Традиционно в моноимпульсных системах пеленгации используют суммарно-разностный метод оценки азимута φ и угла места θ исследуемого объекта. ЦФАР позволяет за счет правильно подобранных весовых коэффициентов (ВК) сформировать суммарный U_{Σ} и разностный U_{Δ} сигналы [9-14]. Принцип действия данного метода оценки направления предполагает сравнение амплитуд суммарного и разностного сигналов.

Рассмотрим способ цифрового формирования сигналов U_{Σ} и U_{Δ} на примере плоской 16-ти элементной антенной решетки, элементы которой расположены в плоскости X – Y.

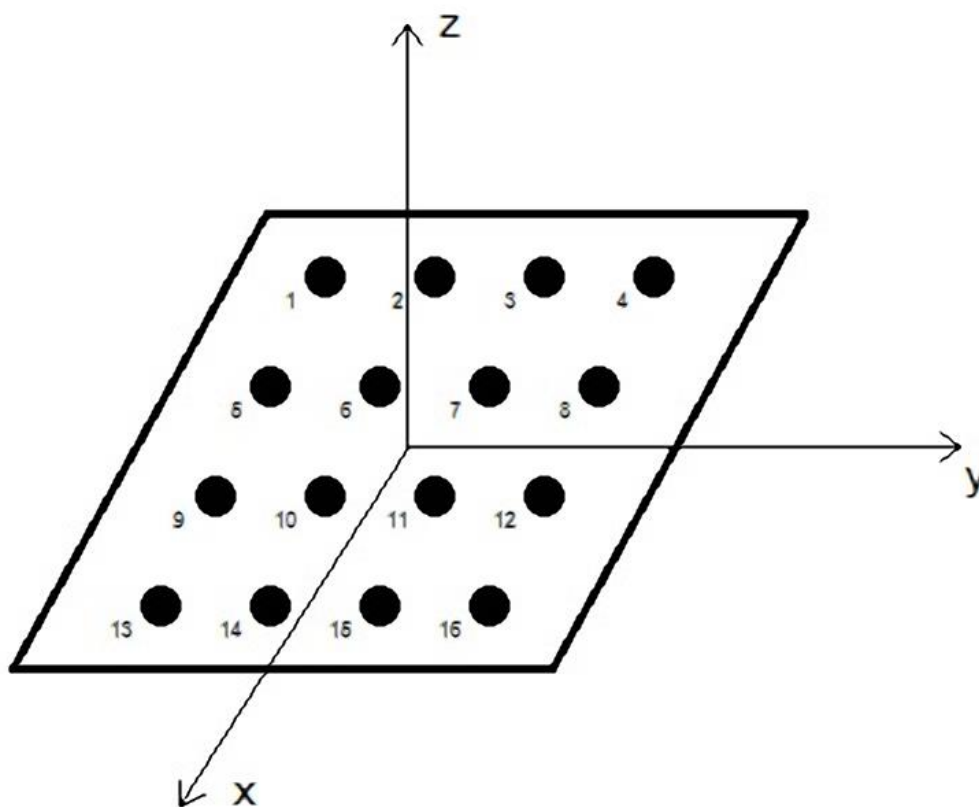


Рисунок 1 – Схема расположения элементов ЦФАР

Сигнал поступающий на вход ЦФАР зависит от азимута и угла места, поэтому результирующий сигнал с выходов элементов антенной решетки можно записать как [15]:

$$Y = \sum_{n=0}^{N_x-1} \sum_{m=0}^{N_y-1} U \cdot e^{\left[i(n-1) \frac{2\pi d_x \sin \theta \cos \varphi}{\lambda} \right]} \cdot e^{\left[i(m-1) \frac{2\pi d_y \sin \theta \sin \varphi}{\lambda} \right]}, \quad (1)$$

где N_x, N_y – количество элементов, расположенных по оси Ox и Oy соответственно;

U – амплитуда источника сигнала;

d_x, d_y – расстояние между элементами ЦФАР;

λ – длина волны сигнала.

Для того чтобы оценить азимут φ и угол места θ используя суммарно-разностный метод, необходимо переписать результирующий сигнал Y для азимутальной плоскости и для плоскости возвышения в виде вектора. Представляя элементы антенны в виде строк и столбцов, перейдем к линейному виду ЦФАР для каждой плоскости [16,17]. Сигнал необходимый для определения φ будет являться результатом суммы строк ЦФАР, формула (2). Упростим составляющие экспоненциальных функций формулы (1), и запишем их как $\psi(\varphi, \theta)$.

$$Y_x = \left(\sum_{k=1,5,9,13} U_k \cdot \psi(\varphi, \theta); \sum_{k=2,6,10,14} U_k \cdot \psi(\varphi, \theta); \sum_{k=3,7,11,15} U_k \cdot \psi(\varphi, \theta); \sum_{k=4,8,12,16} U_k \cdot \psi(\varphi, \theta) \right), \quad (2)$$

где k – номер элемента антенной решетки.

Теперь запишем сигнал для оценки θ , для этого необходимо просуммировать сигналы по столбцам:

$$Y_y = \left(\sum_{k=1,2,3,4} U_k \cdot \psi(\varphi, \theta); \sum_{k=5,6,7,8} U_k \cdot \psi(\varphi, \theta); \sum_{k=9,10,11,12} U_k \cdot \psi(\varphi, \theta); \sum_{k=13,14,15,16} U_k \cdot \psi(\varphi, \theta) \right), \quad (3)$$

Как говорилось выше, сформировать суммарно-разностные сигналы можно используя вектор весовых коэффициентов. Вектор ВК представляет собой комплексные отсчеты, изменяющий амплитудно-фазовые характеристики сигнала [18].

Для формирования суммарного (опорного) сигнала необходимо записать ВК как:

$$W_{\Sigma} = \left(1; e^{i \frac{2\pi d_x}{\lambda} \sin \phi_0}; e^{2i \frac{2\pi d_x}{\lambda} \sin \phi_0}; \dots e^{i \frac{2\pi d_x}{\lambda} \sin \phi_0} \right), \quad (4)$$

где l – длина векторов Y_x и Y_y (в данном случае 4);

ϕ_0 – направление луча диаграммы направленности (ДН).

ВК для разностного сигнала выглядят следующим образом:

$$W_{\Delta} = \left(1; e^{i \frac{2\pi d_y}{\lambda} \sin \phi_0}; \dots e^{i \frac{2\pi d_y}{\lambda} \sin \phi_0}; -e^{i \frac{2\pi d_x}{\lambda} \sin \phi_0} \dots -e^{i \frac{2\pi d_x}{\lambda} \sin \phi_0} \right), \quad (5)$$

Теперь для сигналов Y_x и Y_y необходимо сформировать суммарный и разностный сигналы:

$$\begin{aligned} U_{\Sigma x} &= Y_x \cdot W_{\Sigma} & U_{\Sigma y} &= Y_y \cdot W_{\Sigma} \\ U_{\Delta x} &= Y_x \cdot W_{\Delta} & U_{\Delta y} &= Y_y \cdot W_{\Delta} \end{aligned}, \quad (6)$$

Процесс оценки угловых координат объекта сопряжен с построением пеленгационной характеристики [19-25]. В случае, когда главный луч ДН ортогонален плоскости ЦФАР, а расстояние между элементами одинаково по оси Ox

и Oy , то пеленгационная характеристика для азимутальной плоскости и плоскости возвышения может быть записана как:

$$R(\phi) = \operatorname{Re} \left(\frac{W_{\Delta}^H \cdot v(\phi)}{W_{\Sigma}^H \cdot v(\phi)} \right), \quad (7)$$

где $v(\phi)$ – управляющий вектор;

H – эрмитово-сопряжение.

$$v(\phi) = \left(1; e^{i \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \phi}; e^{2i \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \phi}; \dots e^{(l-1)i \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \phi}; \right), \quad (8)$$

Для получения оценки азимута и угла места необходимо вычислить:

$$\hat{\phi} = R^{-1} \left(\operatorname{Re} \left(\frac{U_{\Delta x}}{U_{\Sigma x}} \right) \right)$$

$$\hat{\theta} = R^{-1} \left(\operatorname{Re} \left(\frac{U_{\Delta y}}{U_{\Sigma y}} \right) \right), \quad (9)$$

Выполним моделирование работы моноимпульсного пеленгатора с цифровым формированием суммарно-разностного сигналов на базе плоской 16-ти элементной ЦФАР в программной среде Matlab. ДН данной антенной системы представлена на рисунке 2. Исследуемый сигнал поступает на вход антенной решетки в пределах главного луча ДН, его параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1

Угловые координаты, гр.		Отношение сигнал/шум, дБ.	Частота, МГц.
Азимут	Угол места		
5	-13	20,5	35

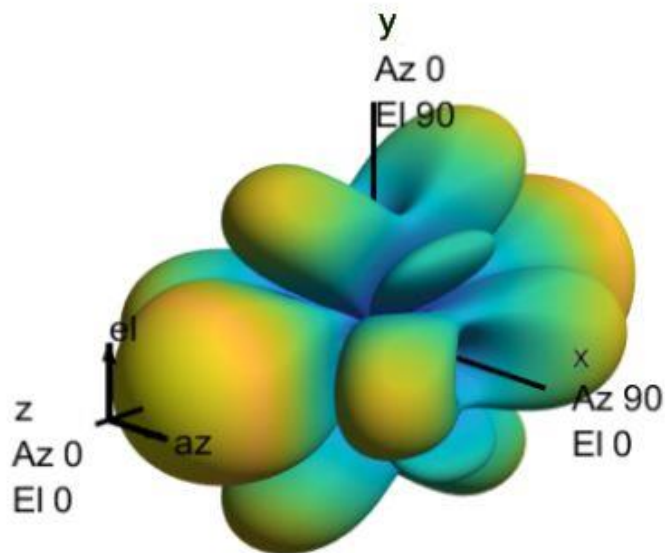


Рисунок 2 – Диаграмма направленности ЦФАР

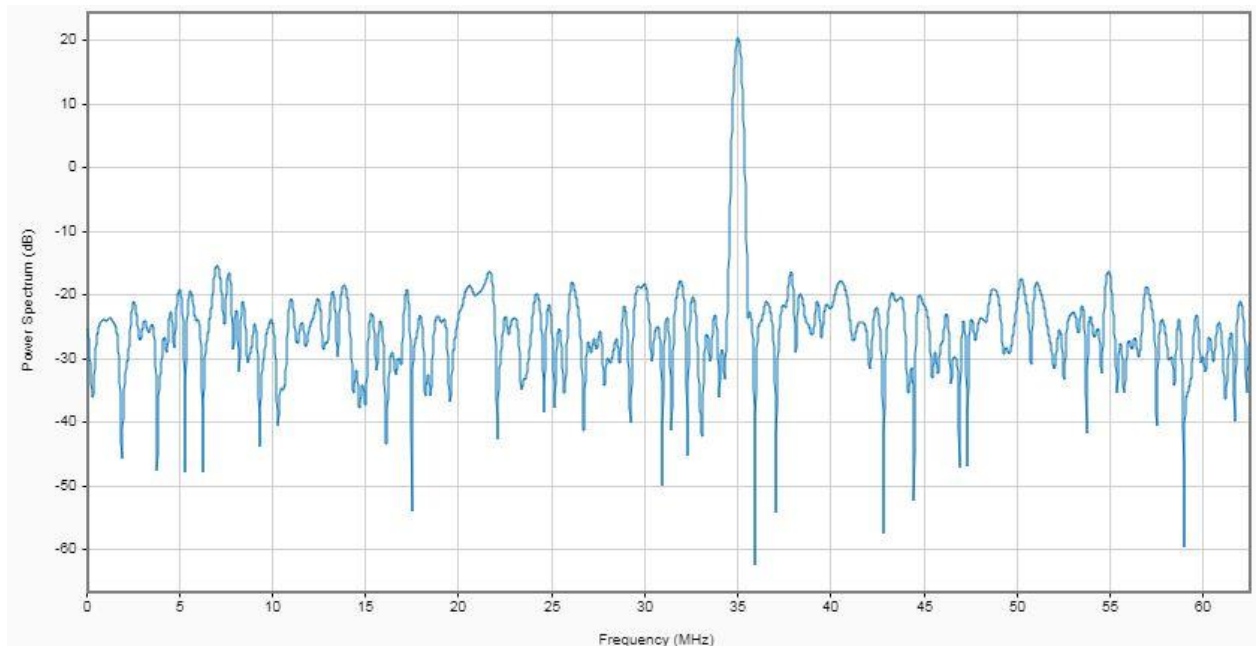


Рисунок 3 – Спектр сигнала

В результате выполнения моделирования получена пеленгационная характеристика данной модели ЦФАР, рисунок 4.

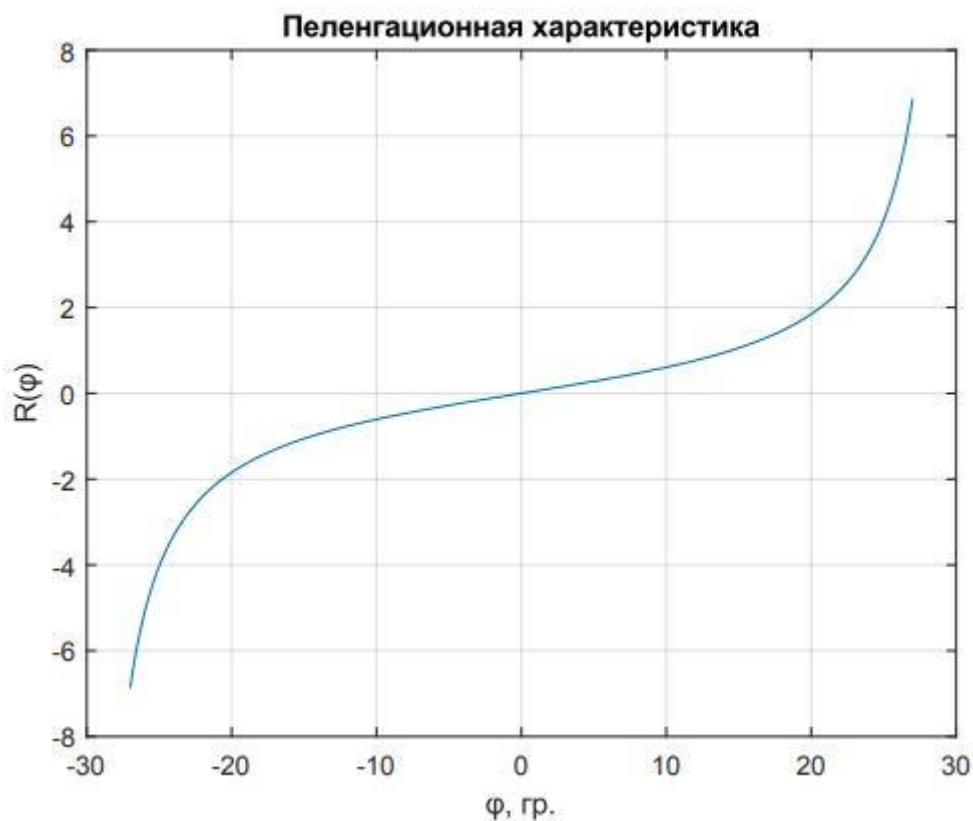


Рисунок 4 – Пеленгационная характеристика

Для более наглядной оценки работы пеленгатора с цифровым формированием суммарного и разностного сигналов, построим зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) определения угловых координат от отношения сигнал/шум.

Формула для расчета СКО представлена ниже:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m \langle x \rangle)^2}, \quad (10)$$

где n - объем выборки;

x_i – значение случайной величины на i -ой итерации;

$m \langle x \rangle$ – математическое ожидание.

Квадратическое отклонение характеризует разброс некой случайной величины относительно ее математического ожидания [26]. Однако при ограниченном

количестве выборок n , вместо математического ожидания используют среднее арифметическое:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (11)$$

Тогда с учетом вышесказанного уравнение (10) можно переписать:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (12)$$

Таблица 1.

Зависимость СКО от отношения сигнал/шум

Отношение сигнал/шум, дБ.	Азимут, гр.	Угол места, гр.
20,5	0,01	0,01
17,04	0,03	0,03
14,56	0,08	0,08
11,18	0,16	0,2
8,75	0,26	0,39
7,11	0,42	0,55
5,94	0,55	0,75
5,27	0,7	1,13

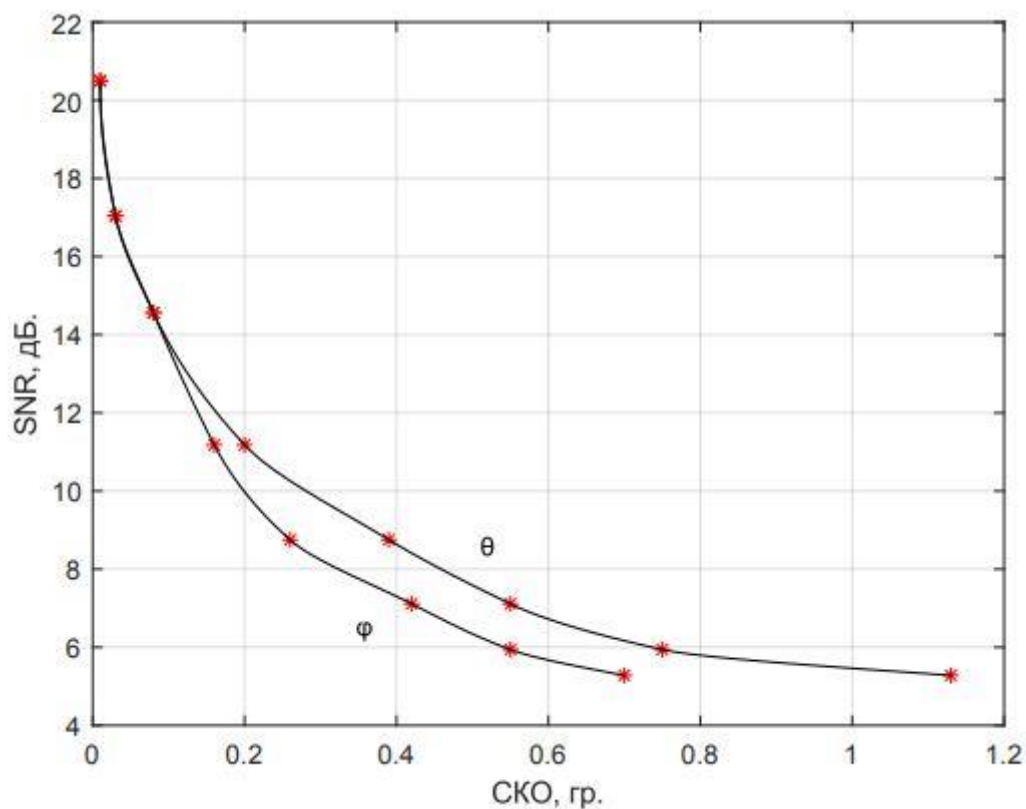


Рисунок 5 – Зависимость СКО от отношения сигнал/шум

Заключение

Полученные результаты моделирования показывают, что применение цифровой фазированной антенной решетки в моноимпульсном пеленгаторе способно обеспечить качественное определение координат источника радиоизлучения. При этом цифровой способ формирования суммарного и разностного сигналов, позволит снизить массогабаритные показатели относительно аналоговой реализации данного пеленгатора.

Библиографический список

1. Мезин Б.К. Автоматическая радиопеленгация. – М.: Советское радио, 1969. – 216 с.

2. Зуфрин А.М. Методы построения судовых автоматических угломерных систем. – Л.: Судостроение, 1970. – 408 с.
3. Воскресенский Д.И., Пономарев Л.И., Филиппов В.С. Выпуклые сканирующие антенны. – М.: Советское радио, 1978. – 304 с.
4. Seliktar Y. Space-Time Adaptive Monopulse Processing, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1998, 39 p.
5. Малашин М.С. Типовые расчеты характеристик радиолокационных и радионавигационных систем. – М.: МАИ, 1993. – 100 с.
6. Вайс С.Н., Репина М.В. Использование методов интерполяции при разработке тестовых радиолокационных сигналов // Труды МАИ. 2014. № 74. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=49333>
7. Rhodes D. Introduction to Monopulse, MA, Artech House, 1980, 132 p.
8. Farina A. Antenna-Vased Signal Processing Techniques for Radar Systems, Artech Print on Demand, 1992, 388 p.
9. Зайцев Г.В. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных радиопеленгаторах. Методы. Алгоритмы. Аппаратура. – М.: Радиотехника, 2015. – 371 с.
10. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. – Киев: КВиЦ, 2000. – 428 с.
11. Лифанов А.С. Определение движущихся объектов на одноантенной радиолокационной системе с синтезированной апертурой // Труды МАИ. 2003. № 11. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34485>
12. Barton D.K. Modern Radar System Analysis, Artech Print on Demand, 1988, 612 p.

13. Richards M. Fundamentals of Radar Signal Processing, McGraw-Hill Education, 2014, 656 p.
14. William L. Melvin, James A. Scheer. Principles of Modern Radar: Advanced Techniques, Scitech Publishing, 2012, 872 p.
15. Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы. – М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.
16. Mahafza B.R. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, Chapman and Hall, 2013, 772 p.
17. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. Principles of Modern Radar: Volume I, Basic Principles, SciTech Publishing, 2010, 924 p.
18. Чистяков В.А. Система мониторинга угловых координат источников радиоизлучения для космических аппаратов спутниковой связи // Труды МАИ. 2019. № 109. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=111394>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-15](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-15)
19. Robert J M. Phased Array Antenna Handbook, Artech House Publishers, 2017, 506 p.
20. Harry L. Van Trees. Optimum Array Processing, New York, Wiley, 2002. 1400 p.
21. Вендик О.Г., Марнес М.Д. Антенны с электрическим сканированием. – М.: Сайнс-Пресс, 2002. – 232 с.
22. Кондратьева С.Г. Многофункциональная бортовая антенная решетка интегрированного радиоэлектронного комплекса // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29560>
23. Ратынский М.В. Порсев В.И. Моноимпульсная пеленгация в РЛС с цифровыми ФАР. – М.: Радиотехника, 2019. – 160 с.

24. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. – М.: Радиотехника, 2010. – 144 с.
25. Самойленко В.И., Шишов Ю.А. Управление фазированными антенными решетками. – М.: Радио и связь, 1983. – 240 с.
26. Зинин Е.Д., Мельников Г.А., Милосердов А.С. Перспектива использования фазированных антенных решеток в бортовых антеннах глобальной спутниковой сотовой связи // Труды МАИ. 2014. № 73. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=48566>
27. Воскресенский Д.И. Канащенков А.И. Активные фазированные антенные решетки. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
28. Alan J. Fenn. Adaptive Antennas and Phased Arrays for Radar and Communications, Artech House, 2007, 410 p.
29. Боровков А.А. Математическая статистика. – СПб.: Лань, 2010. – 704 с.

Monopulse radio direction finder using digital antenna array

Chistyakov V.A.

Compani "Information satellite systems of academician M.F. Reshetnev", 52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

e-mail: vitalys1367@mail.ru

Abstract

Digital technologies development at present allows improving radar systems, which opens possibility for application of complex modern methods of digital signal processing. It allows, in the first place, achieving the best results in radar systems operation, improving therewith weight and size characteristics of the systems under development.

Thus, application of digital phased antennae arrays for direction finding problems solving allows employing mathematical tools for angular characteristics estimations of the object under study.

The article deals with a monopulse direction finder with the sum-difference direction-finding method, accomplish based on the sixteen-element flat digital phased antennae array. The idea of the sum-difference monopulse method consists in generating both sum and difference signals to compare their amplitudes and angular coordinates estimation of the object. In addition, there is a necessity in direction-finding characteristic estimation of the antennae system to realize the said method.

Digital phased antenna array allows both sum and difference signals generation at the expense of correctly selected weight factors, avoiding herewith the waveguide converters application. The weight factors represent complex numbers able to change amplitude-phase characteristics of the signals.

To gain the possibility to estimate the azimuth and elevation angle of the place, the elements of the flat antennae array should be represented in the form of rows and columns, which will be nothing else but the linear antennae arrays. The two linear antennae arrays will form two pairs of both sum and difference signals for the azimuthal plane and elevation plane.

The result of the works was the monopulse direction finder simulation with the above-described digital antenna array, during which the monopulse response curve and radiation pattern were estimated. The sum and difference signals were generated, and the corresponding weight coefficients were obtained.

The dependence of the root-mean-square deviation of angular coordinates on the signal-to-noise ratio was plotted for more illustrative estimation of the direction finder with digital sum and difference signals generation.

Keywords: digital antenna array, sum-difference direction-finding technique, direction finding characteristic, direction pattern, monopulse direction finder.

References

1. Mezin B.K. *Avtomaticheskaya radiopelengatsiya* (Automatic radio direction finding), Moscow, Sovetskoe radio, 1969, 216 p.
2. Zufin A.M. *Metody postroeniya sudovykh avtomaticheskikh uglomernykh sistem* (Methods for developing shipborne automatic goniometric systems), Leningrad, Sudostroenie, 1970, 408 p.

3. Voskresenskii D.I., Ponomarev L.I., Filippov V.S. *Vypuklye skaniruyushchie anteny* (Convex scanning antennas) Moscow, Sovetskoe radio, 1978, 304 p.
4. Seliktar Y. *Space-Time Adaptive Monopulse Processing*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1998, 39 p.
5. Malashin M.S. *Tipovye raschety kharakteristik radiolokatsionnykh i radionavigatsionnykh system* (Typical calculations of radar and radio navigation systems characteristics), Moscow, MAI, 1993, 100 p.
6. Vais S.N., Repina M.V. *Trudy MAI*, 2014, no. 74. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=49333>
7. Rhodes D. *Introduction to Monopulse*, MA, Artech House, 1980, 132 p.
8. Farina A. *Antenna-Vased Signal Processing Techniques for Radar Systems*, Artech Print on Demand, 1992, 388 p.
9. Zaitsev G.V. *Tsifrovaya obrabotka signalov v mnogofunktsional'nykh radiopelengatorakh. Metody. Algoritmy. Apparatura* (Digital signal processing in multifunctional direction finders. Methods. Algorithms. Equipment), Moscow, Radiotekhnika, 2015, 371 p.
10. Kuz'min S.Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu* (Digital radar. Introduction to the theory), Kiev, KViTS, 2000, 428 p.
11. Lifanov A.S. *Trudy MAI*, 2003, no. 11. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34485>
12. Barton D.K. *Modern Radar System Analysis*, Artech Print on Demand, 1988, 612 p.

13. Richards M. *Fundamentals of Radar Signal Processing*, McGraw-Hill Education, 2014, 656 p.
14. William L. Melvin, James A. Scheer. *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*, Scitech Publishing, 2012, 872 p.
15. Kazarinov Yu.M. Radiotekhnicheskie sistemy (Radio engineering systems), Moscow, Vysshaya shkola, 1990, 496 p.
16. Mahafza B.R. *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, Chapman and Hall, 2013, 772 p.
17. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. *Principles of Modern Radar: Volume I, Basic Principles*, SciTech Publishing, 2010, 924 p.
18. Chistyakov V.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 109. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111394>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-15](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-15)
19. Robert J M. *Phased Array Antenna Handbook*, Artech House Publishers, 2017, 506 p.
20. Harry L. Van Trees. *Optimum Array Processing*, New York, Wiley, 2002. 1400 p.
21. Vendik O.G., Marnes M.D. *Antenny s elektricheskim skanirovaniem* (Electrically scanned antennas), Moscow, Sains-Press, 2002, 232 p.
22. Kondrat'eva S.G. *Trudy MAI*, 2012, no. 52. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29560>
23. Ratynskii M.V. Porsev V.I. *Monoimpul'snaya pelengatsiya v RLS s tsifrovymi FAR* (Monopulse direction finding in radar with digital phased array), Moscow, Radiotekhnika, 2019, 160 p.

24. Grigor'ev L.N. *Tsifrovoye formirovaniye diagrammy napravlennosti v fazirovannykh antennykh reshetkakh* (Digital direction pattern forming in phased array antennas), Moscow, Radiotekhnika, 2010, 144 p.
25. Samoilenko V.I., Shishov Yu.A. *Upravleniye fazirovannymi antennymi reshetkami* (Phased antennae arrays control), Moscow, Radio i svyaz', 1983, 240 p.
26. Zinin E.D., Mel'nikov G.A., Miloserdov A.S. *Trudy MAI*, 2014, no. 73. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=48566>
27. Voskresenskii D.I. Kanashchenkov A.I. *Aktivnyye fazirovannyye antennyye reshetki* (Active phased array antennas), Moscow, Radiotekhnika, 2004, 488 p.
28. Alan J. Fenn. *Adaptive Antennas and Phased Arrays for Radar and Communications*, Artech House, 2007, 410 p.
29. Borovkov A.A. *Matematicheskaya statistika* (Mathematical statistics), Saint Petersburg, Lan', 2010, 704 p.