

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НА ПРИМЕРЕ ЭКВИДИСТАНТНОЙ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Н.А. Башлыков

1330029@mail.ru

SPIN-код: 5204-0628

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Описан процесс разработки математической модели антенной решетки секторного обзора на примере 32-элементной эквидистантной цифровой антенной решетки (ЦАР), которая предназначена для сканирования определенной области пространства, обнаружения и сопровождения целей. Представлена последовательность разработки типовой математической модели антенны, выполнен расчет основных параметров антенны и диаграмм. Обоснованы выбор типа рассматриваемой ЦАР и перспективность использования подобных систем. Расчет модели антенной решетки выполнен с помощью программы математического моделирования MathCAD. Актуальность темы определяется перспективностью использования ЦАР в локационной технике, поскольку с их применением возможно создание более перспективных радиолокационных систем. Разработка ЦАР является самым развивающимся и перспективным направлением, в котором отправной точкой при разработке системы является расчет ее математической модели.

Ключевые слова

Радиолокация, цифровая антенная решетка, пеленг, синтез алгоритма цифрового диаграммообразования, математическое моделирование, диаграмма направленности, пеленгационная характеристика, MathCAD

Поступила в редакцию 17.04.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. В современном мире существует острая потребность в создании систем обзора, позволяющих обнаруживать различные объекты. Реализация обнаружения радиолокационными средствами сопряжена с рядом трудностей, поскольку для обнаружения необходимо иметь хорошее разрешение по доплеровской скорости, что требует длительного времени наблюдения за объектом, и при этом нужно обеспечить высокую скорость обновления информации по целям и высокую скорость обзора пространства. Из-за постоянного усложнения электромагнитной обстановки, вызванной внедрением новых коммуникационных стандартов, к современным средствам радиомониторинга предъявляют очень жесткие требования. Среди новых технологий, направленных на решение подобных проблем в этой области, достаточно перспективной является технология цифровых антенных решеток (ЦАР) или технология цифрового диаграммообразования (ЦДО) [1].

В данной статье рассмотрен вариант построения математической модели радиолокационной системы (РЛС) на базе эквидистантной антенной решетки для

обнаружения различных целей и слежения за ними при обзоре определенного сектора пространства. Для реализации такой системы использована технология ЦАР и ЦДО, поскольку эта технология является более эффективным решением по сравнению с построением системы на аналоговых элементах.

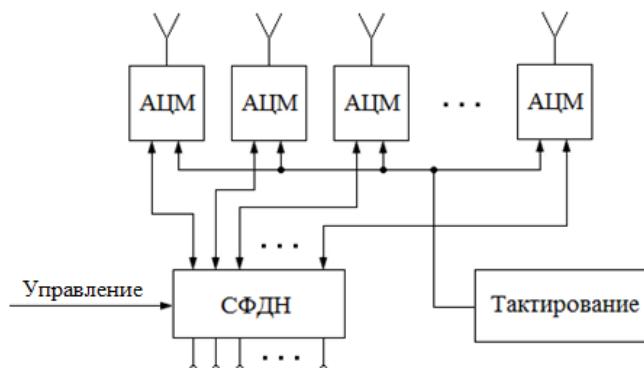
Перспективность данной технологии была теоретически и практически доказана советскими учеными к началу 1990-х годов. Теперь она становится основой для множества новейших зарубежных разработок РЛС для военных и гражданских станций различного назначения.

В качестве достоинств РЛС на базе ЦАР можно выделить возможность одновременного обзора всего сектора пространства с высоким угловым разрешением при низких массогабаритных характеристиках, что принципиально важно для РЛС, в которых применяется одна мощная широкодиапазонная передающая антенна и узкодиапазонные антенны на прием. Основным недостатком таких систем можно считать невысокую по сравнению с фазированными антенными решетками (ФАР) энергетическую эффективность [1].

Цифровая антенная решетка. Согласно принятому научным сообществом определению, цифровая антенная решетка (ЦАР) — пассивная или активная антенная система, представляющая собой совокупность аналого-цифровых (цифроаналоговых) каналов с общим фазовым центром, в которой формирование диаграммы направленности осуществляется в цифровом виде, без использования фазовращателей в приемной ЦАР [2, 3].

В приемной ЦАР принятый сигнал каждой элементарной антенной в составе решетки преобразуется в цифровой код. Диаграмма направленности (ДН) формируется специальной ЭВМ. Цифровая обработка сигнала (ЦОС) осуществляется после прохождения сигналом системы формирования ДН. Цифровая антенная решетка состоит из трех основных частей (рис. 1):

- решетки излучателей, которая обеспечивает прием высокочастотных сигналов из сектора обозреваемого пространства, ограниченного ДН излучателя;
- набора аналого-цифровых модулей (АЦМ) и блока аналоговой обработки сигнала, переноса частоты и усиления, которые преобразуют принятые высокочастотные сигналы в кодовую цифровую последовательность;
- системы формирования ДН (СФДН).



С выходов СФДН данные поступают в систему ЦОС, где проводится согласованная фильтрация и частотная селекция принятого сигнала, сравнение с порогом и другие операции.

Аналого-цифровой модуль включает в себя следующие элементы:

- устройство защиты приемника, которое представляет собой ограничитель, не позволяющий перегрузить приемный канал высоким уровнем сигнала;
- малошумящий усилитель (МШУ), поднимающий амплитуду сигнала до требуемого уровня для последующей оцифровки сигнала;
- АЦП, который преобразует аналоговый сигнал в цифровой. АЦП заменяет фазовращатель и аттенюатор в аналогичной ФАР.

В СФДН проводится суммирование выборок, одновременно принимаемых всеми АЦМ, и формируется ДН всей ЦАР, состоящей из совокупности пространственных выборок. Все операции в СФДН осуществляются на основании программного алгоритма. Это позволяет с малыми потерями энергии изменить пространственные характеристики антенны, а также формировать ДН такого вида [2, 4].

Таким образом, отличительной особенностью схемотехники ЦАР по сравнению с традиционными ФАР является установка в каждом приемном канале вместо фазовращателей АЦП, осуществляющих многоразрядное квантование сигналов по уровню и дискретизацию их во времени. Тактовые импульсы на все АЦП разводятся от общего генератора с таким расчетом, чтобы АЦП всех приемных каналов срабатывали одновременно, т. е. диаграммообразование фактически сводится к взвешенному суммированию цифровых отсчетов напряжений сигналов [1].

Цифровое диаграммообразование. Цифровое формирование луча или ЦДО подразумевает под собой цифровой синтез ДН в режиме приема, а также формирование заданного распределения электромагнитного поля в раскрыве антенной решетки в режиме передачи. Цифровое диаграммообразование может быть реализовано на уровне излучающих элементов или их небольших групп (уровень подрешетки).

Архитектура ЦДО состоит из совокупности цифровых приемников, по одному на каждый излучающий элемент антенны. Преобразование на промежуточную частоту и оцифровка принятых сигналов реализованы для каждого элемента антенны (или их небольших групп). Шумы и искажения сигналов в каждом таком приемнике можно считать некоррелированными по отношению к другим приемникам.

Таким способом одной антенной системой может быть сформировано множество независимых лучей, ориентированных в разных направлениях. Для этого в составе системы предусмотрен специальный процессор формирования диаграммы [4, 5].

Благодаря ЦДО так же, как и в ФАР, происходит увеличение динамического диапазона приемных антенн. При сложении сигналов в каждом из каналов антенной решетки в процессе ЦДО дисперсия (средняя мощность) шума растет пропорционально числу каналов антенной решетки N , а мощность сигнала (пропорциональная квадрату амплитуды) — пропорционально N^2 . Следова-

тельно, отношение сигнал-шум после ЦДО возрастет в N раз, что повышает мощность принимаемого сигнала, а значит, расширяет динамический диапазон (отношение амплитуды максимального сигнала к минимальному). В результате «нули» диаграммы направленности в направлениях источников помех формируются без искажений провалов [5–7].

Антенная решетка. Приемная антenna представляет собой решетку из 32 элементов, расположенных эквидистантно, как показано на рис. 2.

Большое количество элементов ЦАР позволяет сформировать главный лепесток ДН узким, что увеличивает точность пеленгации цели. Предполагаемая цель располагается на оси Oz перпендикулярно поверхности полотна антенны, центр которой находится в начале системы координат.

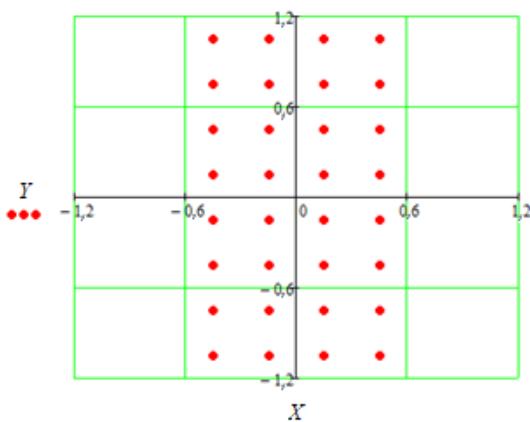


Рис. 2. Расположение элементов антенной решетке

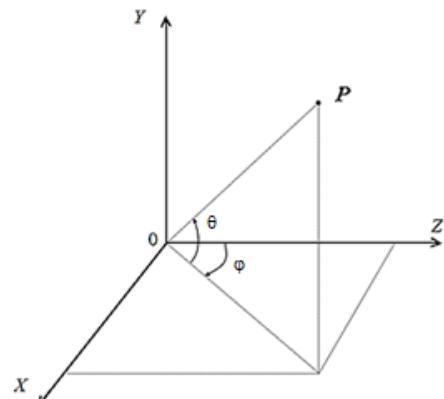


Рис. 3. Система координат

В процессе расчета математической модели антенной решетки и ее параметров используется сферическая система координат. Построим данную систему координат. На рис. 3 вектор имеет направление, совпадающее с положением главного луча антенной решетки в пространстве. Угол φ соответствует азимуту, а θ — углу места соответственно.

Расчет математической модели антенной решетки. Полотно антенны состоит из 32 излучающих элементов диаметром 0,3 м. Радиолокатор работает на длине волны 0,03 м. Предполагаемая цель находится в пространстве на некотором отдалении от апертуры антенной решетки в точке с координатами $(x, y, z) = (0, 0, 10\,000 \text{ м})$. Таким образом, положение цели относительно апертуры антенны и направление главного луча в секторе можно описать через направляющие косинусы:

$$\begin{cases} U = \cos \theta \sin \varphi; \\ V = \sin \theta; \\ W = \sqrt{1-U^2-V^2}, \end{cases} \quad \begin{cases} U_a = \cos \theta_a \sin \varphi_a; \\ V_a = \sin \theta_a; \\ W_a = \sqrt{1-U_a^2-V_a^2}. \end{cases} \quad (1)$$

Из приведенных систем уравнений (1) можно определить угол между вектором направления цели и вектором направления главного луча антенны:

$$\xi = \frac{\mathbf{P} \cdot \mathbf{h}}{|\mathbf{P}| \cdot |\mathbf{h}|} = UU_a + VV_a + \sqrt{1 - U^2 - V^2} \sqrt{1 - U_a^2 - V_a^2}, \quad (2)$$

где \mathbf{P} и \mathbf{h} — векторы направления луча главного лепестка и цели.

При условии, что цель находится на оси Oz , получаем, что направляющие косинусы вектора цели имеют нулевые значения. Таким образом, на основании известных данных и формулы (2) можно построить основные ДН ЦАР. Суммарная и разностные ДН антennы промодулированы ДН одного излучателя, которая описывается следующим образом:

$$D = \frac{2J_1\left(\frac{kd}{2}\sin\xi\right)}{\frac{kd}{2}\sin\xi}, \quad (3)$$

где $J_1(x)$ — функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка; k — волновое число; d — диаметр излучателя.

На рис. 4 приведены ДН одного излучателя в плоскости азимута и угла места, построенные на основании формулы (3).

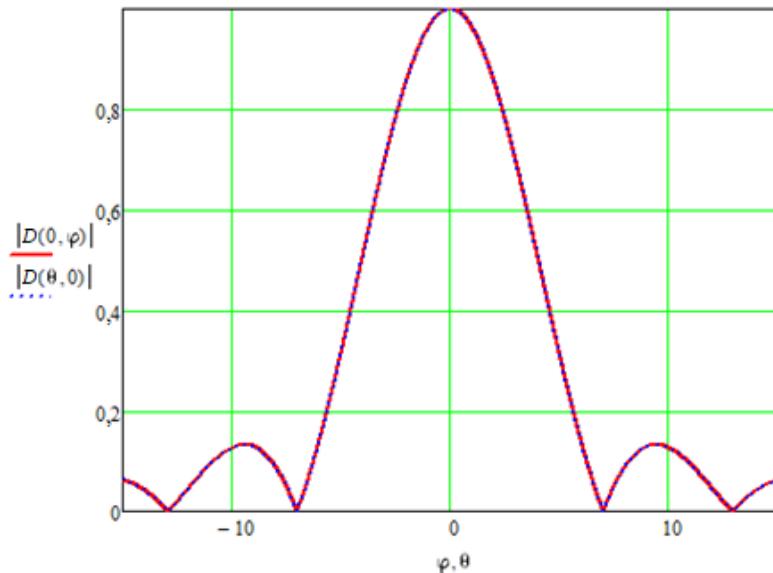


Рис. 4. Диаграмма направленности одного излучателя
в плоскости азимута и угла места

Суммарная ДН антенной решетки определяется суммой всех элементов направляющего вектора источника, помноженной на ДН одного излучателя (3), которая будет являться огибающей для моделируемой ДН.

$$F(\theta, \varphi) = D(\theta, \varphi) \sum_{i=1}^{32} \exp \left\{ -jk \left(X_i [U(\theta, \varphi) - U_a] + Y_i [V(\theta) - V_a] \right) \right\}, \quad (4)$$

где X_i и Y_i — координаты излучающих элементов антенной решетки.

Разностные ДН антенной решетки формируются аналогично суммарной ДН, но с учетом весовых коэффициентов, умноженных на сумму всех элементов направляющего вектора источника:

$$\begin{cases} \Delta\varphi(\theta, \varphi) = D(\theta, \varphi) \sum_{i=1}^{32} W_{X_i} \exp \left\{ -jk \left(X_i [U(\theta, \varphi) - U_a] + Y_i [V(\theta) - V_a] \right) \right\}; \\ \Delta\theta(\theta, \varphi) = D(\theta, \varphi) \sum_{i=1}^{32} W_{Y_i} \exp \left\{ -jk \left(X_i [U(\theta, \varphi) - U_a] + Y_i [V(\theta) - V_a] \right) \right\}, \end{cases} \quad (5)$$

где W_{X_i} и W_{Y_i} — фазирующие коэффициенты. Значения данных коэффициентов рассчитываются исходя из расположения излучающих элементов на полотне антенной решетки. Значения коэффициентов находятся в диапазоне от -1 до 1 и лежат на одной наклонной прямой,

$$\begin{cases} W_X = k_X X + b_X = \frac{2X}{X_{\max} - X_{\min}} + \frac{-k_X \sum_{n=1}^{32} X_n}{32}; \\ W_Y = k_Y Y + b_Y = \frac{2Y}{Y_{\max} - Y_{\min}} + \frac{-k_Y \sum_{n=1}^{32} Y_n}{32}. \end{cases} \quad (6)$$

Графическое представление весовых коэффициентов для каждого из 32 элементов антенной решетки, согласно формуле (6), представлены на рис. 5.

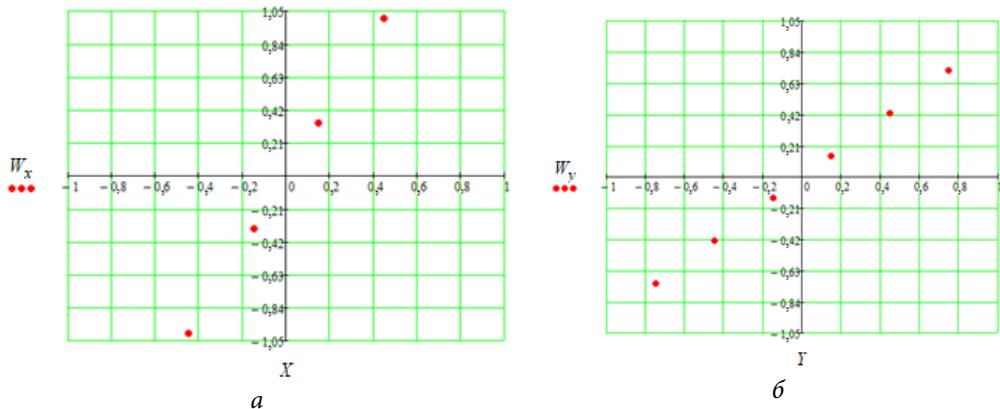


Рис. 5. Весовые коэффициенты для разностных ДН:

a — в плоскости азимута; b — в плоскости угла места

Вид суммарной и разностных ДН ЦАР, рассчитанных по формулам (4) и (5), представлен на рис. 6.

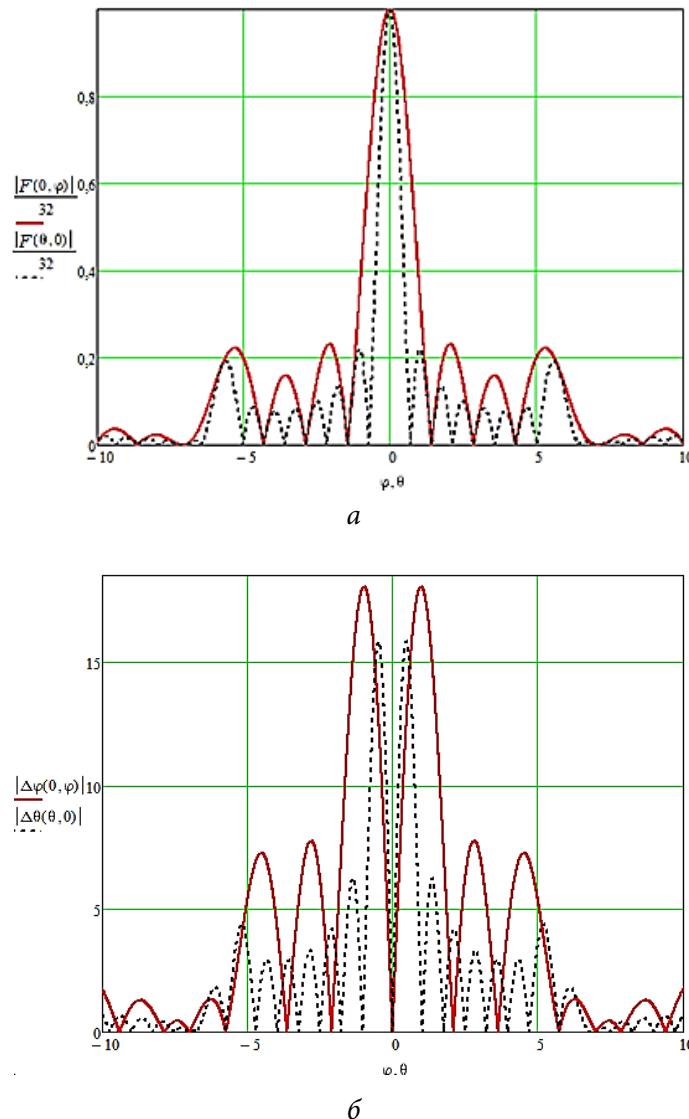


Рис. 6. Диаграммы направленности антенны в плоскости азимута и угла места:
a — суммарные; *б* — разностные

Формирование пеленгационной характеристики. Пеленгационная характеристика (ПХ) антенной решетки позволяет определить угловое положение цели в пространстве. В общем случае, ПХ имеет вид, представленный на рис. 7.

Допустим, что летящая цель имеет угловое положение $\theta_{ц}$ в вертикальной плоскости, главный лепесток антенной решетки θ_{gl} располагается в начале си-

стемы координат. Тогда, отклонение главного лепестка от углового положения цели $\Delta\theta$ является их разностью.

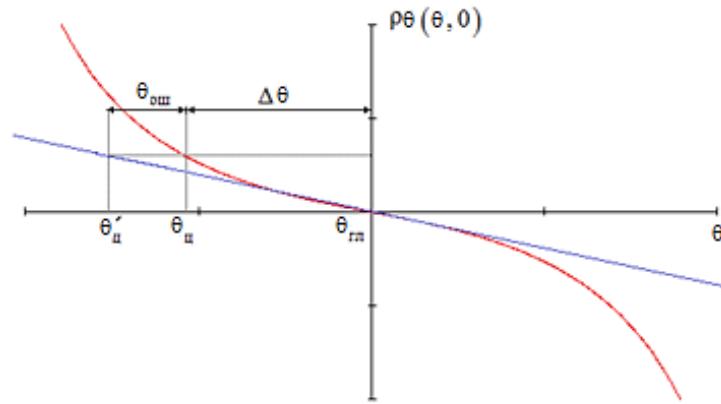


Рис. 7. ПХ антенны в плоскости угла места и аппроксимирующая ее функция

Для упрощения расчетов отклонения, ПХ аппроксимируют линейной функцией. При аппроксимации ПХ определение углового положение цели будет проводиться с ошибкой тем большей, чем больше будет отклонение фактического $\theta_{\text{ц}}$ от $\theta'_{\text{ц}}$ и определяется как

$$\theta_{\text{ош}} = |\theta'_{\text{ц}} - \theta_{\text{ц}}|, \quad (7)$$

где $\theta'_{\text{ц}}$ — угловое положение цели по аппроксимированной ПХ.

ПХ образованы на основании рассчитанных ранее суммарных и разностных ДН в соответствующих плоскостях по формулам (4) и (5):

$$\begin{cases} \rho\varphi(\theta, \varphi) = \left| \frac{\Delta\varphi(\theta, \varphi)}{F(\theta, \varphi)} \right| \text{sign} \left[\arg \left(\frac{\Delta\varphi(\theta, \varphi)}{F(\theta, \varphi)} \right) \right]; \\ \rho\theta(\theta, \varphi) = \left| \frac{\Delta\theta(\theta, \varphi)}{F(\theta, \varphi)} \right| \text{sign} \left[\arg \left(\frac{\Delta\theta(\theta, \varphi)}{F(\theta, \varphi)} \right) \right]. \end{cases} \quad (8)$$

Графическое представление ПХ в плоскости азимута и угла места, рассчитанных согласно формуле (8), представлено на рис. 8.

Заключение. В настоящее время в условиях ужесточения требований к радиолокационной технике переход к внедрению ЦАР является разумным для решения задач современной радиолокации с перспективой развития. Можно сделать вывод, что ЦДО становится основной технологией РЛС XXI века. Полагаем, что прогресс в повышении быстродействия АЦП и интерфейсов межмодульных соединений неизбежно расширит не только сферы применения ЦАР, но и функциональные возможности радиотехнических систем, созданных на их основе [7–10].

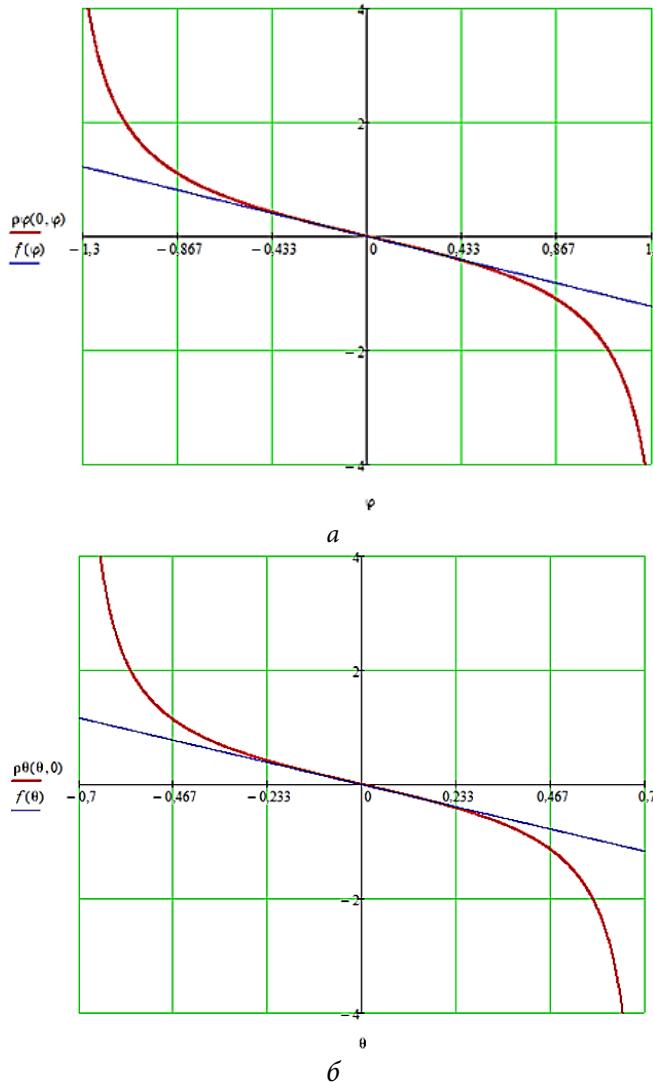


Рис. 8. ПХ антенной решетки:

a — в плоскости азимута; *b* — в плоскости угла места

Рассмотренная методика моделирования антенных решеток подобного типа может быть применена для аналогичных радиолокационных систем, а в качестве передающего устройства может быть использована активная антенная решетка.

Литература

- [1] Слюсар В.И. Цифровые антенные решётки: будущее радаров. Электроника: НТБ, 2001, № 3, с. 42–46.
- [2] Воскресенский Д.И., ред. Проектирование фазированных антенных решеток. М., Радио и связь, 1994.
- [3] Сколник М.И. Справочник по радиолокации. Кн. 1. М., Техносфера, 2014.

-
- [4] Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. М., Радиотехника, 2010.
 - [5] Добычина Е.М., Малахов Р.Ю. Цифровые антенные решетки для бортовых радиолокационных систем. *Научный вестник МГТУ ГА*, 2012, № 186, с. 176–183.
 - [6] Слюсар В.И. Цифровое формирование луча в системах связи: будущее рождается сегодня. *Электроника: НТБ*, 2001, № 1, с. 6–12.
 - [7] Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. М., Бином, 2006.
 - [8] Адякин Ю.Н., Полянкин А.В., Рыбалкина О.И. Особенности применения технологии цифрового диаграммообразования в наземной радиолокации. *Сб. тр. XXII Межд. науч.-тех. конф. "Радиолокация, навигация, связь-2016"*. Воронеж, Саквоее, 2016, с. 177–187.
 - [9] Бененсон Л.С., ред. Антенные решетки. М., Советское радио, 1966.
 - [10] Надененко С.И. Антенны. М., Связьиздат, 1959.

Башлыков Никита Александрович — студент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Башлыков Н.А. Разработка математической модели антенной решетки на примере эквидистантной цифровой антенной решетки. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 05(46). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-05-605>

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF AN ANTENNA ARRAY USING THE EXAMPLE OF AN EQUIDISTANT DIGITAL ANTENNA ARRAY

N.A. Bashlykov

1330029@mail.ru

SPIN-code: 5204-0628

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The process of developing a mathematical model of a sector scanning antenna array is described using the example of a 32-element equidistant digital antenna array (DAA), which is designed to scan a specific area of space, detect and track targets. The development sequence of a typical antenna mathematical model is presented; the basic parameters of the antenna and diagrams are calculated. The choice of considered DAA type and the prospects of using such systems are justified. The calculation of the antenna array model was performed using the MathCAD mathematical modeling program. The relevance of the topic is determined by the prospects of using the DAAs in location technology, since with their use it is possible to create more promising radar systems. The development of the DAA is the most developed and promising direction in which the starting point in the development of the system is the calculation of its mathematical model.

Keywords

Radar, digital antenna array, bearing, synthesis of digital beamforming algorithm, mathematical modeling, radiation pattern, direction-finding characteristic, MathCAD

Received 17.04.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Slyusar V.I. Digital antenna arrays. The Future of the radar. *Elektronika: NTB* [Electronics: STB], 2001, no. 3, pp. 42–46 (in Russ.).
- [2] Voskresenskiy D.I., ed. *Proektirovaniye fazirovannykh antennykh reshetok* [Design of phased antenna arrays]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1994 (in Russ.).
- [3] Skolnik M. *Radar handbook*. McGraw-Hill Education, 2008. (Russ. ed.: *Spravochnik po radiolokatsii*. Kn. 1. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2014.)
- [4] Grigor'yev L.N. *Tsifrovoe formirovanie diagrammy napravленности в fazirovannykh antennykh reshetkakh* [Digital forming of phased antenna array beam]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010 (in Russ.).
- [5] Dobychina E.M., Malakhov R.Yu. Digital antenna arrays for on-board radars. *Nauchnyy vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies], 2012, no. 186, pp. 176–183 (in Russ.).
- [6] Slyusar V.I. Digital beam forming in communication systems: future is born today. *Elektronika: NTB* [Electronics: STB], 2001, no. 1, pp. 6–12 (in Russ.).
- [7] Lyons R.G. *Understanding digital signal processing*. Prentice Hall, 2010. (Russ. ed.: *Tsifrovaya obrabotka signalov*. Moscow, Binom Publ., 2006.)
- [8] Adyakin Yu.N., Polynkin A.V., Rybalkina O.I. [Special aspects of using digital beamforming in ground-based radiolocation]. *Sb. tr. XXII Mezhd. nauch.-tekhn. konf. "Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz' 2016"* [Proc. XXII Int. Sci.-Tech. Conf. "Radiolocation, navigation and communication 2016"]. Voronezh, Sakvoee Publ., 2016, pp. 177–187 (in Russ.).

-
- [9] Benenson L.S., ed. Antennye reshetki [Antenna arrays]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1966 (in Russ.).
 - [10] Nadenenko S.I. Antenny [Antennas]. Moscow, Svyaz'izdat Publ., 1959 (in Russ.).

Bashlykov N.A. — Student, Department of Radioelectronic Systems and Devices, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Bashlykov N.A. Development of a mathematical model of an antenna array using the example of an equidistant digital antenna array. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 05(46). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-05-605.html> (in Russ.).