

УДК 004.942
DOI: 10.15827/0236-235X.134.301-306

Дата подачи статьи: 17.10.20
2021. Т. 34. № 2. С. 301–306

Программный комплекс моделирования диаграммы направленности фазированной антенной решетки и вычисления кодов фазовращателей

*Т.В. Калинин*¹, к.т.н., профессор, *vka@mail.ru*
*Д.В. Богомаз*¹, старший преподаватель, *vka@mail.ru*
*Д.В. Хрестинин*¹, преподаватель, *vka@mail.ru*
*А.В. Вихрев*¹, курсант, *vka@mail.ru*

¹ Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, 197198, Россия

Для обнаружения и сопровождения космических объектов необходимо управлять положением передающей и приемной диаграмм направленности в пределах сектора обзора РЛС. В современных РЛС с фазированной антенной решеткой управление положением диаграмм направленности производится фазовым методом по азимуту и углу места. Для реализации фазового метода необходимо рассчитывать фазу на каждом излучателе с фазированной антенной решеткой.

В статье рассмотрены математическая модель и программная реализация процесса расчета фаз и цифровых кодов управления для каждого фазовращателя. Программный комплекс позволяет проводить исследования диаграмм направленности фазированной антенной решетки в зависимости от направления излучения, количества излучателей, дискретности фазовращателей.

Программный комплекс представляет собой приложение с графическим интерфейсом, реализованное на языке программирования C++ в среде программирования Qt Creator.

Анализ существующих программных комплексов моделирования диаграмм направленности фазированной антенной решетки (пакет Sensor Array Analyzer из Matlab 2013 и выше, Mathcad, CST MICROWAVE STUDIO, ANSYS HFSS) показал, что в них отсутствует возможность изменения дискретности фазовращателей, расчета кодов фазы фазовращателей и визуального представления ошибок в установке направления диаграмм направленности, зависящих от дискретности фазовращателей.

Таким образом, новизна программной модели заключается в визуальном представлении теоретической диаграммы направленности и диаграммы направленности с учетом ошибок, возникающих из-за дискретности фазовращателей, что позволяет использовать ее для подготовки специалистов по фазированной антенной решетке.

Ключевые слова: диаграмма направленности, фазовращатель, цифровой код, программный комплекс, среда программирования Qt Creator.

Сущность фазового управления *диаграммой направленности* (ДН) по азимуту и углу места одинакова. В качестве примера рассмотрим управление ДН по азимуту.

Пусть линейная эквидистантная решетка с шагом d имеет пять излучателей и необходимо отклонить максимум ДН на угол ε от нормали к раскрытию антенны. Следует выяснить фазовые различия между сигналами, излучаемыми элементами такой *фазированной антенной решетки* (ФАР).

Поскольку электромагнитная энергия распространяется в направлении, перпендикулярном фазовому фронту волны, для распространения энергии зондирующего импульса в направлении КД (под углом ε к нормали, рис. 1) необходимо, чтобы фазовый фронт волны соответствовал линии EF [1]. Добиться этого возможно, если фазы сигналов, излучаемые

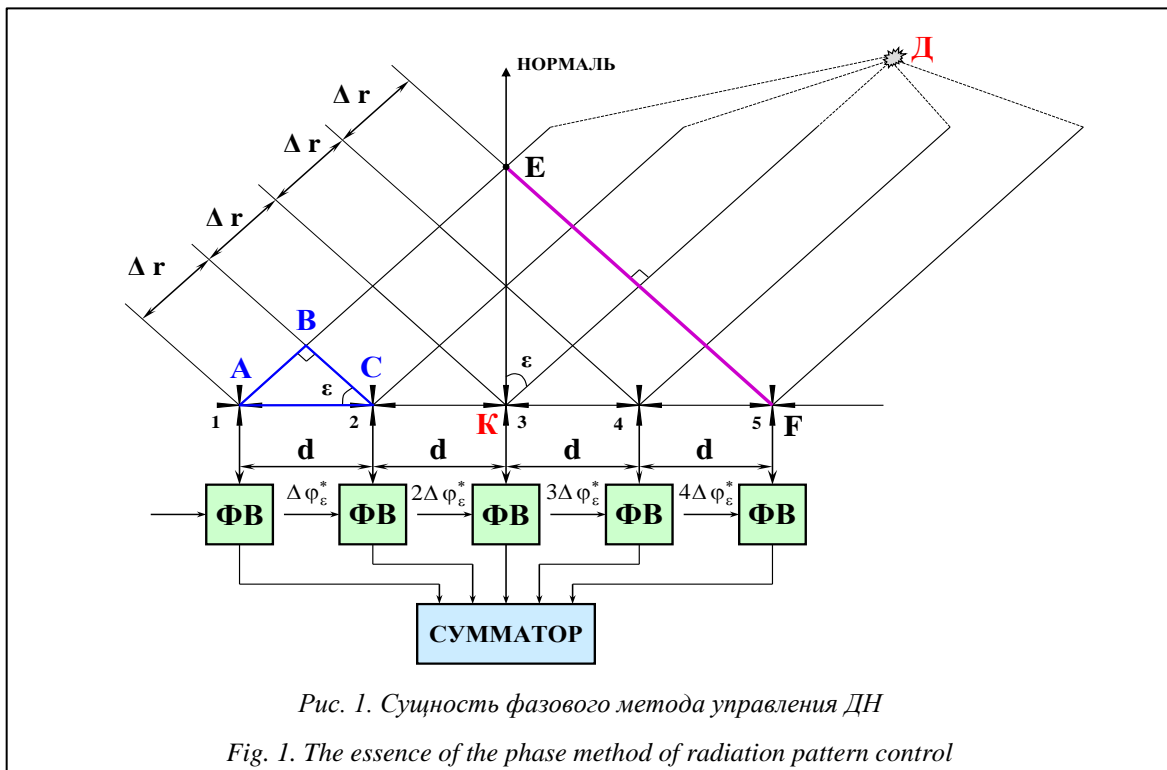
каждым элементом ФАР, для направления КД будут одинаковыми. Тогда в этом направлении энергии элементарных излучателей будут суммироваться и, следовательно, максимум ДН будет отклонен на угол ε .

На рисунке 1 видно, что путь распространения электромагнитной энергии от первого излучателя до точки D больше этого же пути от второго излучателя на величину АВ, которую обозначим через Δr . Тогда за время распространения по пути Δr фаза сигнала первого излучателя изменится на величину $\Delta\varphi$, равную

$$\Delta\varphi_\varepsilon = k\Delta r = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r \quad [2-4].$$

Из прямоугольного треугольника ABC видно, что $\Delta r = d\sin\varepsilon$. Тогда

$$\Delta\varphi_\varepsilon = \frac{2\pi d}{\lambda}\sin\varepsilon. \quad (1)$$



Для сложения энергий, излучаемых первым и вторым элементами, необходимо фазу сигнала, излучаемого вторым элементом, увеличить на $\Delta\varphi_\varepsilon$. Достигнуть этого можно с помощью управляемого фазовращателя, на другой вход которого подать код управления фазой $\Delta\varphi_\varepsilon^*$.

Аналогичные рассуждения справедливы для любой последующей пары рядом расположенных излучателей (например, для второго и третьего, для третьего и четвертого, для четвертого и пятого). Видно, что для каждого последующего излучателя необходимо увеличить фазу сигнала на $\Delta\varphi_\varepsilon$ по сравнению с каждым предыдущим излучателем. Если в решетке имеются i излучателей ($i = 0, 1, 2, \dots$), то фазовращатель с номером i должен изменить фазу сигналов [5] на величину $\Delta\varphi_{\varepsilon_i}$:

$$\Delta\varphi_{\varepsilon_i} = i \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \varepsilon. \quad (2)$$

Поскольку ДН необходимо отклонять на произвольный угол ε в обе стороны от нормали к решетке, управляемые фазовращатели должны быть в цепи каждого излучателя.

Таким образом, для отклонения ДН на угол ε от нормали необходимо сформировать коды управления фазовращателями $\Delta\varphi_{\varepsilon_i}^*$.

Допустим, имеется плоская ФАР, содержащая i столбцов и j строк, на пересечении кото-

рых установлены элементарные излучатели (рис. 2).

Пусть также геометрический центр этой ФАР совмещен с началом прямоугольной системы координат XYZ. При этом ось OX совпадает с нормалью к раскрытию антенны, OZ – с одной из строк, а OY – с одним из столбцов. Шаг между излучателями в строке равен d_x , а в столбце – d_y . Каждый из столбцов состоит из n_ε излучателей, а каждая из строк – из n_θ излучателей. В цепи питания каждого излучателя имеется фазовращатель, на который необходимо подать код управления положением ДН.

Положение ДН в пространстве (направление OM) зададим в биплоскостной системе координат с помощью двух углов – азимута ε и угла места Θ . Угол ε – плоский угол двугранного угла, образованный плоскостями OXY (плоскость, перпендикулярная к оси OZ, в которой лежит нормаль к плоскости ФАР) и MOY (плоскость Θ_ε , в которой находится точка M, лежащая на линии ДН). Угол Θ – плоский угол двугранного угла, образованного плоскостями XOZ (плоскость, перпендикулярная к оси OY, в которой также лежит нормаль к плоскости ФАР) и MOZ (плоскость Θ_ε , в которой также находится точка M). Для упрощения аппаратуры управления положением ДН в пространстве создается линейно нарастающее фазовое распределение вдоль осей OY и OZ [6, 7].

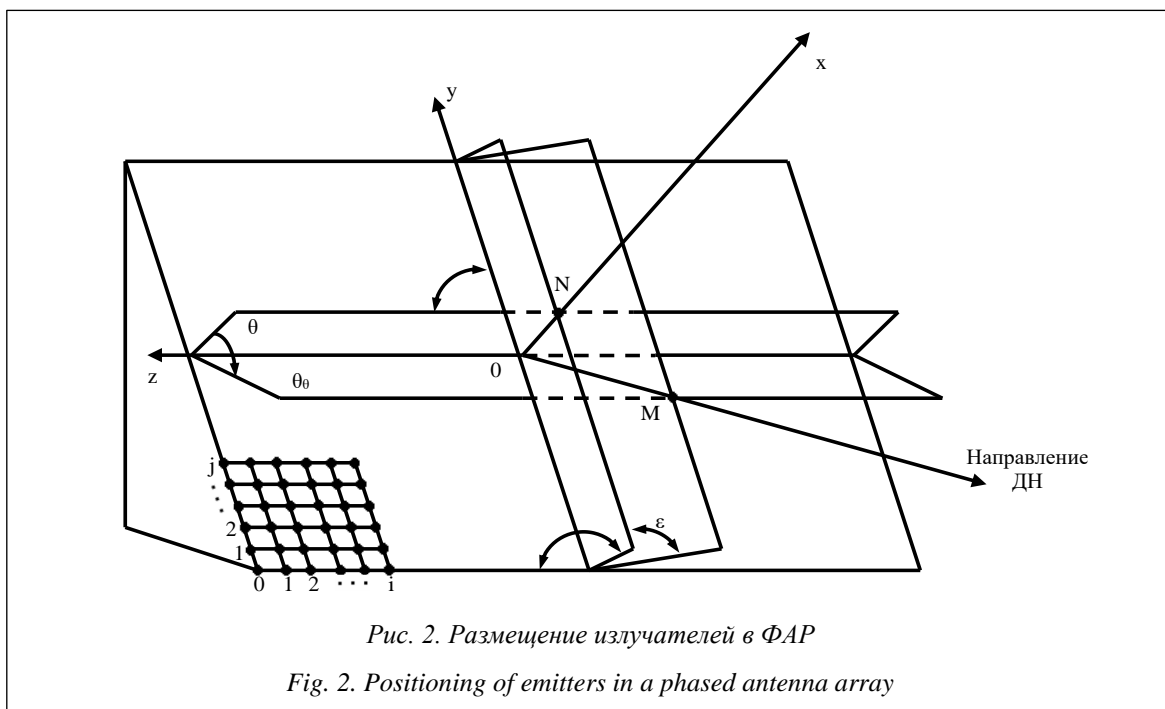


Рис. 2. Размещение излучателей в ФАР

Fig. 2. Positioning of emitters in a phased antenna array

Для отклонения ДН по азимуту на угол ϵ необходимо, чтобы каждый фазовращатель, стоящий в цепи излучателя с номером i , изменял фазу входного сигнала на величину $\Delta\varphi_{\epsilon_i}$. Для этого на фазовращатель следует подать код управления $\Delta\varphi_{\epsilon_i}^*$.

В соответствии с выражениями (1) и (2) можно записать, что $\Delta\varphi_{\epsilon_i} = i\Delta\varphi_{\epsilon}$.

Тогда величину кода управления $\Delta\varphi_{\epsilon_i}^*$ по аналогии с последним выражением можно представить в виде $\Delta\varphi_{\epsilon_i}^* = i\Delta\varphi_{\epsilon}^*$, где $\Delta\varphi_{\epsilon}^*$ – разность величин кодов управления между последующим и предыдущим излучателями в данной строке.

Поскольку необходимо создать линейно нарастающее фазовое распределение, с учетом последнего выражения для каждого фазовращателя, стоящего в данной строке, нужно сформировать следующий код управления [8, 9]:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_1^* &= \Delta\varphi_{\epsilon}^*; \\ \Delta\varphi_2^* &= 2\Delta\varphi_{\epsilon}^*; \\ &\dots\dots\dots; \\ \Delta\varphi_i^* &= i\Delta\varphi_{\epsilon}^*; \\ &\dots\dots\dots; \\ \Delta\varphi_{n_{\epsilon}}^* &= n_{\epsilon}\Delta\varphi_{\epsilon}^*. \end{aligned}$$

Максимальное значение кода управления имеет место для последнего излучателя. Обозначим его через N_{ϵ} , то есть $N_{\epsilon} = n_{\epsilon}\Delta\varphi_{\epsilon}^*$.

Тогда для текущего фазовращателя i код управления $\Delta\varphi_{\epsilon_i}^*$ можно записать соотношением

$$\Delta\varphi_{\epsilon_i}^* = \frac{N_{\epsilon}}{n_{\epsilon}} i. \tag{3}$$

Это справедливо, поскольку

$$\frac{N_{\epsilon}}{n_{\epsilon}} i = \frac{n_{\epsilon}\Delta\varphi_{\epsilon}^*}{n_{\epsilon}} i = i\Delta\varphi_{\epsilon}^* = \Delta\varphi_{\epsilon_i}^*.$$

Анализ выражений (2) и (3) показывает, что код N_{ϵ} должен соответствовать коду числа, полученного от произведения $\frac{2\pi d_z n_{\epsilon}}{\lambda} \sin \epsilon$.

Аналогично можно показать, что для отклонения ДН в угломестной плоскости на угол θ на каждый фазовращатель в столбце, стоящий в цепи излучателя с номером j , необходимо подать код управления $\Delta\varphi_{\theta_j}^*$, равный

$$\Delta\varphi_{\theta_j}^* = \frac{N_{\theta}}{n_{\theta}} j, \tag{4}$$

где $N_{\theta} = n_{\theta}\Delta\varphi_{\theta}^*$; $\Delta\varphi_{\theta}^*$ – разность величин кодов управления между последующим и предыдущим фазовращателями в данном столбце [10, 11].

Величина кода N_{θ} вырабатывается вычислительным комплексом и должна соответствовать коду числа, полученного от произведения $\frac{2\pi d_y n_{\theta}}{\lambda} \sin \theta$.

Каждый из фазовращателей, расположенных в цепи питания вибратора, установленного

на пересечении столбца i и строки j , должен участвовать в сканировании ДН как по азимуту, так и по углу места. Тогда величина подаваемого на него кода управления $\Delta\varphi_{i,j}^*$ должна быть равна сумме кодов $\Delta\varphi_{\varepsilon_i}^*$ и $\Delta\varphi_{\theta_j}^*$, что с учетом выражений (3) и (4) можно пред-

$$\text{ставить в виде } \Delta\varphi_{i,j}^* = \frac{N_\varepsilon}{n_\varepsilon} i + \frac{N_\theta}{n_\theta} j \text{ [12, 13].}$$

Компьютерное моделирование описанной выше математической модели реализовано на языке C++ в среде Qt Creator. Программный комплекс представляет собой приложение с графическим интерфейсом (рис. 3).



Рис. 3. Окно диалога с пользователем

Fig. 3. Screenshot of the dialog box

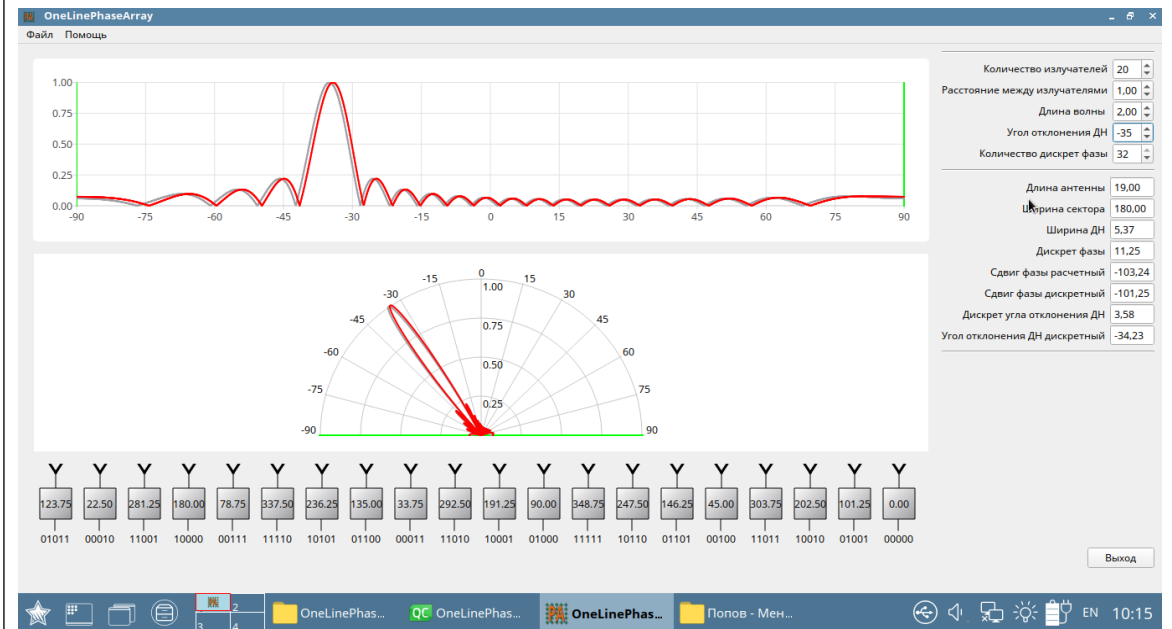


Рис. 4. Отклонение диаграммы направленности на -35 градусов

Fig. 4. -35-degree deviation of the radiation pattern

Пользователю предоставлена возможность изменения следующих исходных данных:

- количество излучателей;
- расстояние между излучателями;
- длина волны;
- угол отклонения диаграммы направленности от нулевого положения;
- количество дискрет фазы фазовращателя.

Программа рассчитывает и выводит следующие данные:

- длина антенны;
- ширина диаграммы направленности;
- сдвиги фазы расчетный и дискретный (для определения ошибки установки фазы при использовании дискретных фазовращателей);

– значение фазы на каждом фазовращателе;

– значение кода фазы в двоичном коде на каждом фазовращателе.

На осях представлены энергетические характеристики ФАР в линейной и полярной системах координат.

На рисунке 4 представлена реализация вычисления кодов для ФАР из 20 пятиразрядных излучателей при отклонении ДН на -35 градусов.

Таким образом, программный комплекс позволяет производить расчет фаз и цифровых кодов управления для каждого фазовращателя и проводить исследование энергетических характеристик ДН ФАР в зависимости от направления излучения, количества излучателей, дискретности фазовращателей.

Литература

1. Гостюхин В.Л., Трусов В.Н., Гостюхин А.В. Активные фазированные антенные решетки. М.: Радиотехника, 2011. 310 с.
2. Парахин А.С., Крайнюченко Л.В. Компьютерная модель фазированной антенной решетки // Вестн. Курганского гос. ун-та. 2013. С. 63–70.
3. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки; [пер. с англ.]. М.: Техносфера, 2012. 566 с.
4. Bhattacharyya A.K. Phased Array Antennas. NJ, Hoboken, John Wiley and Sons Publ., 2006, 516 p.
5. Monzingo R.A., Miller T.W. Adaptive Arrays. John Wiley and Sons Publ., 1980, 541 p.
6. Wanner S., Sekar S., Fu B., Weber R.J., Song J.M. Phased array system design and modeling. Proc. ISSSE, 2007, pp. 455–458. DOI: 10.1109/ISSSE.2007.4294511.
7. Васильев В.С., Ивлев Д.Н. Моделирование пространственных диаграмм направленности антенных систем // Антенны. 2006. № 5. С. 39–44.
8. Воскресенский Д.И., Канащенков А.И. Активные фазированные антенные решетки. М.: Радиотехника, 2004. 488 с.
9. Mailloux R.J. Phased Array Antenna Handbook. MA, Norwood, Artech House Publ., 2005, 506 p.
10. Пудовкин А.П., Панасюк Ю.Н., Иванков А.А. Основы теории антенн. Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. 92 с.
11. Hansen R.C. Phased Array Antennas. John Wiley & Sons, 2009.
12. Benson K. Phased array beamforming ICs simplify antenna design. Analog Dialogue, 2019, vol. 53, no. 1.
13. Легкий Н.М., Унченко И.В. Формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 2. С. 29–38. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-29-38.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.134.301-306

Received 17.10.20
2021, vol. 34, no. 2, pp. 301–306

Software solution for modeling of a phased antenna array radiation pattern and coding of phase shifter parameters

*T.V. Kalinin*¹, Ph.D. (Engineering), Professor, vka@mil.ru

*D.V. Bogomaz*¹, Senior Lecturer, vka@mil.ru

*D.V. Khrestinin*¹, Lecturer, vka@mil.ru

*A.V. Vikhrev*¹, Cadet, vka@mil.ru

¹A.F. Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg, 197082, Russian Federation

Abstract. For detection and tracking of space objects, it's necessary to control the position of transmitting and receiving radiation patterns (RP) within a section of the radar coverage area. In modern radar stations (RS)

with phased antenna array (PAA), positioning of RP is performed by phase method of determining azimuth and elevation angles. For the phase method implementation, the phase of every PAA emitter must be determined.

The paper presents a mathematical model and software implementation of phases and digital control code calculation for every phase shifter. The software solution allows for researching PAA RP according to the beam direction, the number of emitters, and phase shifter discreteness.

The software solution is an application with a graphical interface, written in the C++ programming language in Qt Creator programming environment.

Analysis of existing RP PAA simulation software systems (Sensor Array Analyzer package from Matlab 2013 and above, Mathcad, CST MICROWAVE STUDIO, ANSYS HFSS) showed that they do not have the possibility of changing the discreteness of phase shifters, calculating phase codes of phase shifters and visual representation of errors in setting the direction.

Thus, the novelty of the software model lies in the visual representation of the theoretical radiation pattern and the radiation pattern, considering the errors that arise because of the discreteness of the phase shifters, which allows it to be used for training specialists in the phased array antenna.

Keywords: radiation pattern, phase shifter, digital codes, software solution, Qt Creator programming environment.

References

1. Gostyukhin V.L., Trusov V.N., Gostyukhin A.V. *Active Phased Array Antennas*. Moscow, 2011, 310 p. (in Russ.).
2. Parakhin A.S., Krainyuchenko L.V. Computer model of the phased array antenna. *Vestn. of Kurgan State Univ.*, 2013, pp. 63–70 (in Russ.).
3. Hansen R.S. *Phased Array Antennas*. 2009, 571 p. DOI: 10.1002/9780470529188 (Russ. ed.: Moscow, 2012, 566 p.).
4. Bhattacharyya A.K. *Phased Array Antennas*. NJ, Hoboken, John Wiley and Sons Publ., 2006, 516 p.
5. Monzingo R.A., Miller T.W. *Adaptive Arrays*. John Wiley and Sons Publ., 1980, 541 p.
6. Wanner S., Sekar S., Fu B., Weber R.J., Song J.M. Phased array system design and modeling. *Proc. ISSSE*, 2007, pp. 455–458. DOI: 10.1109/ISSSE.2007.4294511.
7. Vasilev V.S., Ivlev D.N. Modelling of antennas' spatial patterns. *Antennas*, 2006, no. 5, pp. 39–44 (in Russ.).
8. Voskresensky D.I., Kanashchenkov A.I. *Active Phased Array Antennas*. Moscow, 2004, 488 p. (in Russ.).
9. Mailloux R.J. *Phased Array Antenna Handbook*. MA, Norwood, Artech House Publ., 2005, 506 p.
10. Pudovkin A.P., Panasyuk Yu.N., Ivankov A.A. *The Basics of Antenna Theory*. Tambov, 2011, 92 p. (in Russ.).
11. Hansen R.C. *Phased Array Antennas*. John Wiley & Sons, 2009.
12. Benson K. Phased array beamforming ICs simplify antenna design. *Analog Dialogue*, 2019, vol. 53, no. 1.
13. Legky N.M., Unchenko I.V. Formation of the direction diagram in phased antenna array. *Russian Technological Journal*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 29–38 (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-29-38.

Для цитирования

Калинин Т.В., Богомаз Д.В., Хрестинин Д.В., Вихрев А.В. Программный комплекс моделирования диаграммы направленности фазированной антенной решетки и вычисления кодов фазовращателей // Программные продукты и системы. 2021. Т. 34. № 2. С. 301–306. DOI: 10.15827/0236-235X.134.301-306.

For citation

Kalinin T.V., Bogomaz D.V., Khrestinin D.V., Vikhrev A.V. Software solution for modeling of a phased antenna array radiation pattern and coding of phase shifter parameters. *Software & Systems*, 2021, vol. 34, no. 2, pp. 301–306 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.134.301-306.