

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

УДК 621.396.965

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-1-15-21>

Определение минимального шага сканирования луча фазированной антенной решетки

М. Д. Парнес✉

ООО "Резонанс", Санкт-Петербург, Россия

✉info@antennas.spb.ru

Аннотация

Введение. Антеннам с электронным сканированием уже скоро 100 лет. Методы их проектирования и производства достаточно изучены, однако есть параметры, которые в научно-технической литературе не раскрыты. Одним из таких параметров является минимальный шаг движения и связанный с этим параметр – точность установки луча в заданном направлении. Из электродинамической задачи излучения очевидно, что шаг связан с количеством излучателей и точностью установки фазы в аналоговых фазовращателях (ФВ) либо с шагом квантования в случае использования фазовращателей с дискретным шагом.

Цель исследования. Нахождение связи между конструктивными параметрами фазированной антенной решетки (ФАР) и шагом движения луча. Исследование зависимости шага от параметров фазовращателя и типов диаграммообразующих схем ФАР. Создание математического аппарата для вычисления минимального шага движения луча для суммарной и разностной диаграмм направленности.

Материалы и методы. Аналитические соотношения для расчета шага в зависимости от геометрических размеров ФАР и расположения излучателей. Создание программ для расчета диаграмм направленности и программно-аппаратного комплекса для управления лучом экспериментальной ФАР С-диапазона.

Результаты. Найдена методика вычисления минимального шага сканирования ФАР. Математические соотношения для расчета минимального шага и точности установки луча ФАР. Сравнение экспериментальных и теоретических данных минимального шага движения суммарного и разностного лучей ФАР С-диапазона с соотношением $D/\lambda = 10$ по координате X и $D/\lambda = 5$ по координате Y показало хорошее совпадение.

Заключение. Созданный математический аппарат позволяет точно рассчитать минимальный шаг электронного сканирования луча. Экспериментально измеренные шаги движения луча для решетки из 144 элементов подтверждают полученные аналитические соотношения. В ФАР с небольшим количеством элементов ($N < 10$) минимальный шаг перемещения может быть переменным. Теоретически достижимый минимальный шаг движения луча определяется фазовым сдвигом младшего разряда ФВ и электрической длиной апертуры антенны.

Ключевые слова: сканирование электронное, фазированная антенная решетка, фазовращатели, квантование фазы, шаг движения луча

Для цитирования: Парнес М. Д. Определение минимального шага сканирования луча фазированной антенной решетки // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 1. С. 15–21. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-15-21

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.11.2020; принята к публикации после рецензирования 20.12.2020; опубликована онлайн 25.02.2021



Determining the Minimum Scan Step of an Electronically Scanned Antenna

Michael D. Parnes ✉

Company "Resonance Ltd", St Petersburg, Russia

✉info@antennas.spb.ru

Abstract

Introduction. Electronically scanned antennas (ESA) appeared about a century ago. Although the methods of their design and production have been sufficiently studied, some individual parameters are yet to be revealed. One of such parameters is the minimum step of movement, along with a related parameter – the accuracy of beam alignment in a given direction. From the electrodynamic problem of radiation, it is obvious that the step is associated with the number of radiators and the accuracy of phase adjustment in analogue phase shifters, or with the quantization step in the case of using phase shifters with a discrete step.

Aim. To discover a connection between the design parameters of ESA and the step of beam steering; to investigate the dependence between the step and the parameters of the phase shifter and types of beam forming phased array circuits; to create a mathematical apparatus for calculating the minimum step of beam movement for the sum and difference radiation patterns.

Materials and methods. Analytical relations were determined for calculating the step depending on the geometric dimensions and location of the radiators. A software application was developed for calculating radiation patterns. A software and hardware complex was designed for beam control of an experimental C-band ESA.

Results. A method was developed for calculating the minimum step of ESA scanning. Mathematical relations for calculating the minimum step and accuracy of the ESA beam setting were obtained. A comparison of the experimental and theoretical data on the minimum step of movement of the sum and difference beams of a C-band ESA with the ratio $D/\lambda = 10$ in the X coordinate and $D/\lambda = 5$ in the Y coordinate showed good agreement.

Conclusion. The created mathematical apparatus makes it possible to calculate the minimum step of electron beam scanning with sufficient accuracy. The experimentally measured steps of the beam movement for an array of 144 elements confirmed the obtained analytical relationships. In an ESA with a small number of elements ($N < 10$), the minimum step of movement can be variable. The theoretically achievable minimum step of beam movement is determined by the phase shift of the least significant bit of the phase shifter and the electrical length of the antenna aperture.

Keywords: electronic steering, phased array antenna, phase shifter, phase quantization, electronic scan step

For citation: Parnes M. D. Determining the Minimum Scan Step of an Electronically Scanned Antenna. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 1, pp. 15–21. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-15-21

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Submitted 17.11.2020; accepted 20.12.2020; published online 25.02.2021

Введение. Антеннам с электронным сканированием уже около 100 лет. Методы их проектирования и производства достаточно изучены [1–5], однако есть параметры, которые в научно-технической литературе не раскрыты. Одним из таких параметров является минимальный шаг движения и связанный с этим параметр – точность установки луча в заданном направлении.

Модель. Из электродинамической задачи излучения очевидно, что шаг движения связан с количеством излучателей и точностью установки

фазы в аналоговых фазовращателях (ФВ) [6]. В антенных решетках с дискретными ФВ [7–9] фронт излучаемой волны формируется кусочно-линейно, идеальная линейная фазовая характеристика аппроксимируется ступенчатой фазовой кривой [10]. Точность аппроксимации фронта определяется минимальным шагом квантования. Минимальным квантом является фазовый сдвиг младшего разряда ФВ, а общее количество квантов определяется количеством фазовращателей и их разрядностью [10]. По величине фазового набегу младшего

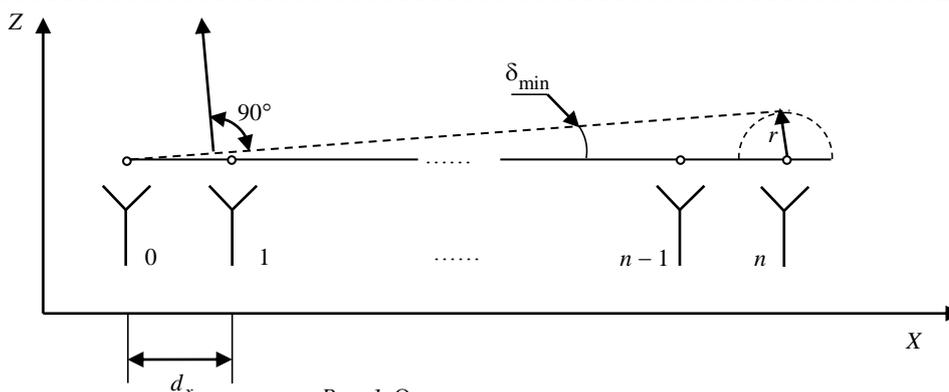


Рис. 1. Одномерная антенная решетка

Fig. 1. One plane phased array

разряда можно определить минимальный шаг движения луча δ_{\min} из треугольника, в котором известны катеты r и гипотенуза Nd_x (рис. 1).

Если r – это расстояние, которое пройдет волна при фазовом набеге φ_l :

$$r = \frac{\varphi_l}{2\pi} \lambda,$$

то отношение катета к гипотенузе позволяет вычислить угол:

$$\sin(\delta_{\min}) = \frac{\varphi_l \lambda}{2\pi Nd_x}, \quad (1)$$

где δ_{\min} – минимальный угол поворота луча; φ_l – набег фазы младшего разряда ФВ; λ – длина волны; N – максимальное число элементов в решетке; d_x – расстояние между элементами.

Соотношение (1) можно упростить, учитывая, что количество фазовых состояний ФВ

$$2^h = \frac{2\pi}{\varphi_l}, \quad (2)$$

где h – число разрядов ФВ.

Обозначим размер апертуры антенны

$$D = Nd_x. \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) из соотношения (1) можно найти угол

$$\delta_{\min} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{D} \frac{1}{2^h}\right). \quad (4)$$

На рис. 2 показано, как изменяется δ_{\min} в зависимости от количества разрядов при различных электрических размерах антенн.

Соотношение (4) выведено в предположении эквивалентности фронта в виде ступенчатой функции и ее линейной аппроксимации (рис. 1). Для проверки этого предположения требуется выполнить моделирование движения луча, для чего необходимо задать распределение фаз p_n по системе излучателей с номером n вдоль координаты X в соответствии с соотношением [3]

$$p_n(\Theta_0) = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \Theta_0 x_n, \quad (5)$$

где Θ_0 – требуемый угол поворота луча; x_n – координата излучателя.

Рассчитаем диаграмму направленности (ДН) [3]

$$F(\theta) = f_r(\theta) \sum_n A_n e^{j[kd_x n \sin \theta + p_n(\theta)]}, \quad (6)$$

где θ – угол, отсчитываемый от оси Z ; $f_r(\theta)$ – диаграмма направленности излучателя; A_n – напряженность поля излучателя с номером n ; k – волновое число.

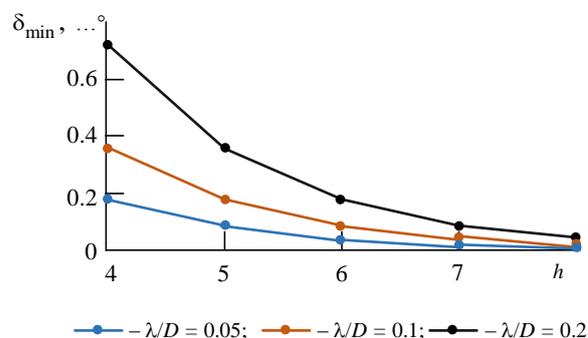


Рис. 2. Зависимость минимального угла движения луча от количества разрядов фазированной антенной решетки

Fig. 2. The dependence between the minimum scan step and the ESA number of bits

Результаты. Вычисление функции $F(\theta)$ по соотношению (6) выполнено с помощью программы расчета антенных решеток Fazar v.5.0 [11]. Эта программа предназначена для проектирования двухмерных (2D) и трехмерных (3D) фазированных антенных решеток (ФАР) с плоскими излучателями. Вычисление диаграммы показывает, что ее изменение при сканировании на угол δ_{\min} слишком мало, чтобы его можно было использовать для регистрации в режиме точного целеуказания. Например, для $\frac{\lambda}{D} = 0.1$ изменение уровня при движении луча от $F(\theta)$ до $F(\delta_{\min})$ менее чем 1%.

В общем случае для диаграммы направленности типа $(\sin u)/u$ (рис. 3) характерна малая крутизна в районе максимума. Такую форму ДН будем называть суммарной [12].

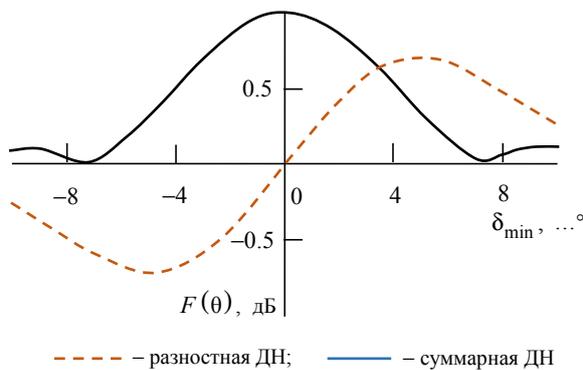


Рис. 3. Суммарная и разностная диаграммы направленности антенной решетки для $\lambda/D = 0.1$

Fig. 3. Sum and different radiation pattern array antenna for $\lambda/D = 0.1$

При работе с суммарной диаграммой направленности $F(\theta)$ (рис. 3) минимальный шаг движения луча δ_{Σ} будет определяться возможностями регистрации сигнала, и если положить, что минимальное изменение величины надежно измеряется для 0.5 дБ [13], то тогда из соотношения $F(\delta_{\Sigma}) = -0.5$ дБ можно вычислить с помощью (6) угол, который составляет $\delta_{\Sigma} = 0.25\theta_{0.5}$ (для $\frac{\lambda}{D} = 0.1$). Если определить крутизну функции $F(\theta)$ на интервале в одну десятую ширины $\theta_{0.5}$ как производную, то для случая $\frac{\lambda}{D} = 0.1$ она составит:

$$F'_{\Sigma}(0.1\theta_{0.5}) = 0.02.$$

С точки зрения практической реализации и в соответствии с методическими возможностями определение углового положения максимума ДН типа $(\sin u)/u$ возможно с точностью $0.25\theta_{0.5}$ из-за малой крутизны функции $F(\theta)$ в районе максимума [14], т. е. минимальный шаг в несколько раз меньше того, который можно измерить (в 5 раз для $\frac{\lambda}{D} = 0.1$):

$$\delta_{\min} \ll 0.25\theta_{0.5}.$$

Разрешить данное противоречие можно при использовании разностного канала (рис. 3) [12],

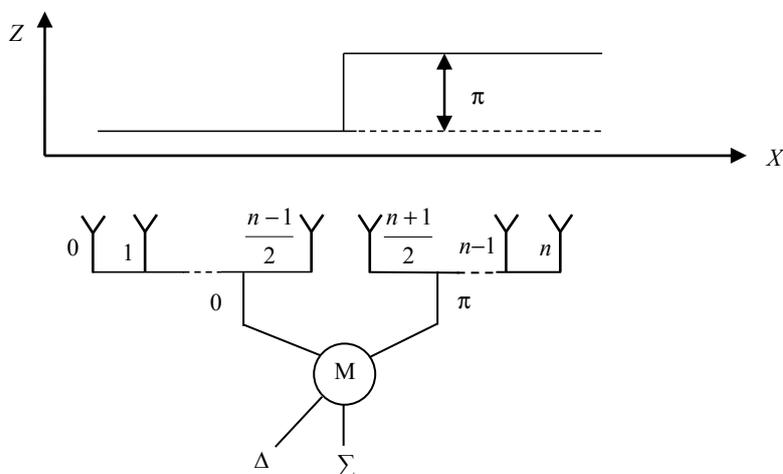


Рис. 4. Схема построения антенной решетки с суммарно-разностной обработкой

Fig. 4. Antenna array block-diagram with sum-difference processing

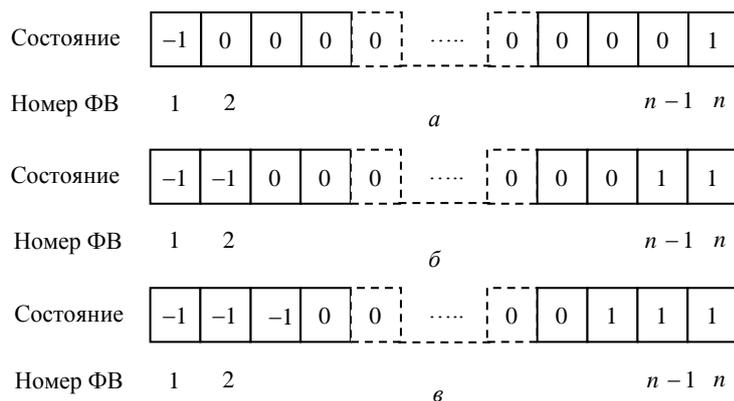


Рис. 5. Фазовое распределение в излучателях антенной решетки при минимальных шагах движения луча:

a – состояние ON для элементов 1 и n ; b – состояние ON для элементов 1, 2, $n-1$, n ;

v – состояние ON для элементов 1, 2, 3, $n-2$, $n-1$, n

Fig. 5. Phase distribution in the radiators of the antenna array at minimum steps of the beam steering:

a – state ON for element number 1 and n ; b – state ON for element number 1, 2, $n-1$, n ;

v – state ON for element number 1, 2, 3, $n-2$, $n-1$, n

для этого нужно ввести в антенну синфазно-противофазный мост (рис. 4), который добавляет к одной из половин ФАР фазу π [15].

При этом крутизна разностной ДН значительно больше:

$$F_{\Delta}'(0.1\theta_{0.5}) = 0.2.$$

Соотношение (4) для δ_{\min} можно проверить при сканировании разностной ДН, выполнив аналогичные вычисления: подставив фазовые (5) и амплитудные распределения в (6) с учетом фазовой добавки π (рис. 4). Переключение фазы при минимальных шагах будет происходить последовательно от крайних элементов (рис. 5, a), затем к последующим (рис. 5, b) и т. д. На рис. 5 принято

для удобства, что предпоследний разряд ФВ соответствует минус первому, т. е., например, для пятиразрядного ФВ $348.75^\circ = -11.25^\circ$.

Существенным отличием фазового распределения, изображенного на рис. 5, от распределения на рис. 1, является его симметрия, что связано с тем, что сканирование должно осуществляться как в положительную, так и в отрицательную сторону углов.

По результатам вычислений (6) построены графики разностной диаграммы направленности $F_{\Delta}^2(\theta)$ для трех углов сканирования (рис. 6), соответствующие фазовым распределениям, показанным на рис. 5, $a-v$. По этим графикам можно определить шаг сканирования луча, а также возможность его измерения. Глубина минимума разностной ДН для построенных лучей различается, а это влияет на точность пеленгации.

Эксперимент. Изложенный подход был применен для анализа ФАР с количеством излучателей $N_x = 18$ и $\frac{D}{\lambda} = 10$. В таблицу сведены результаты расчета по (4), численного моделирования амплитудной диаграммы $F_{\Delta}(\theta)$ по соотношению (6) и результаты измерений положения луча.

Обсуждение. Из анализа данных таблицы можно сделать вывод, что минимальный шаг, полученный по фазовому распределению (рис. 5, a), формирует разностную ДН с недостаточно глубоким минимумом и для практического использования более достоверная величина шага составляет $1.5\delta_{\min}$ (4). Еще одно замечание относительно ми-

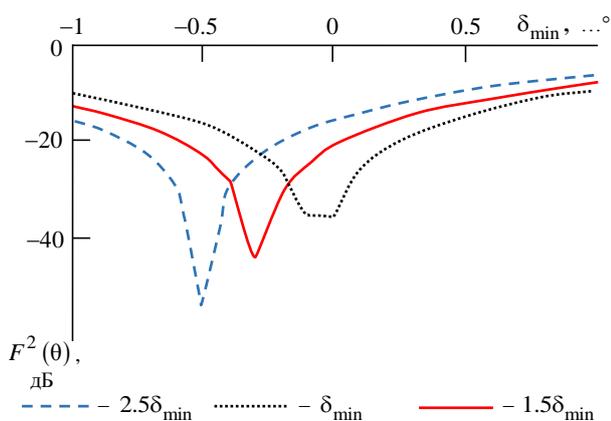


Рис. 6. Разностная диаграмма направленности при различных углах отклонения

Fig. 6. Difference radiation pattern at different turn angles

Результат расчета и измерения шага сканирования
 Results of calculations and measurements of the scanning step

Угол сканирования	Соотношение (4), ...°	Фазовое распределение	Соотношение (6), ...°	Результат эксперимента, ...°
δ_{\min}	0.18	1 + 1 ФВ (рис. 5, а)	0.05	< 0.1*
$1.5\delta_{\min}$	0.27	2 + 2 ФВ (рис. 5, б)	0.28	0.3
$2.5\delta_{\min}$	0.05	3 + 3 ФВ (рис. 5, в)	0.50	0.5

* Угол не был измерен, так как цена деления используемого позиционера составляла 0.1°

нимального шага относится к антенной решетке с малым количеством элементов ($N < 10$). Расчеты, произведенные в соответствии с соотношениями (5) и (6), показывают, что, например, для восьмиэлементной решетки ($N = 8$) и пятиразрядного ФВ ($h = 5$) шаг будет переменным. Это объясняется тем, что включение двух крайних (рис. 5, а) и двух последующих ФВ (рис. 5, б) приведет к различному результату по отклонению луча, так как в этом случае последний излучатель расположен на расстоянии $4d_x$ от центра, а предпоследний на расстоянии $3d_x$, т. е. отличие по координатам существенное. Для этого случая первый шаг составит 0.2°, а второй шаг – 0.6° (для антенной решетки $\frac{\lambda}{D} = 0.2$). Все описанные расчетные результаты были прове-

рены на ФАР С-диапазона с соотношением $\frac{D}{\lambda} = 10$ по координате X и $\frac{D}{\lambda} = 5$ по координате Y . В антенне использовался пятиразрядный ФВ. Были измерены разностные ДН и определены минимальные шаги луча δ_{\min} при сканировании в плоскости X при количестве излучателей $N_x = 18$ и плоскости Y ($N_y = 8$). Точность измерений положения луча составляла 0.1° по среднеквадратичному отклонению (СКО), количество точек данных для расчета СКО не менее 20. Отличие измеренных значений минимального шага с теоретическими оценками (табл.) не более 7%.

Выводы. Теоретически достижимый минимальный шаг движения луча δ_{\min} определяется фазовым сдвигом младшего разряда ФВ и электрической длиной апертуры антенны $\frac{D}{\lambda}$, как это видно из (4).

В практических конструкциях ФАР минимально достижимый шаг движения луча с учетом аппаратных возможностей регистрирующих приборов $(1.5 - 2)\delta_{\min}$.

В ФАР с небольшим количеством элементов ($N < 10$) минимальный шаг перемещения может быть переменным, зависящим от геометрического положения излучателя, ФВ которого сдвигает фазу на величину младшего разряда.

Список литературы

1. Mailloux R. J., Mailloux R. J. A History of Phased Array Antennas. University of Massachusetts, 2006. P. 567–603. doi: 10.1002/0471783021.ch17
2. Brookner E. Practical Phased-Array Antenna Systems. Boston–London: Artech House, 1991.
3. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002. 232 с.
4. Щелкунов С., Фриис Г. Антенны. Теория и практика / под ред. Л. Д. Бахраха. М.: Сов. радио, 1955. 604 с.
5. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д. И. Воскресенского М.: Радиотехника, 2003. 632 с.
6. Vendik O. G. A phase shifter with one tunable component for a reflectarray antenna / ed. O. G. Vendik, M. D. Parnes // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2008. Vol. 50. № 4. P. 53–65. doi: 10.1109/MAP.2008.4653662
7. Koul S. K., Bhat V. Microwave and millimeter wave phase shifter V. 1. Boston–London: Artech House, 1991. 338 p.
8. Sturdivant R., Quan C., Enson Chang E. Systems Engineering of Phased Arrays. Boston–London: Artech House, 2018. 300 p.
9. Хижа Г. С., Вендик И. Б., Серебрякова Е. А. СВЧ-фазовращатели и переключатели. М.: Радио и связь, 1984. 184 с.
10. Hansen R. C. Phased array antennas, 2-e ed. Wiley, 2009. 558 p. doi: 10.1002/9780470529188
11. Программа расчета фазированных антенных решеток Fazar v.5. URL: <http://www.ascorltd.com/ru/completed-projects/programma-dlya-rascheta-far-fazar-v.5> (дата обращения 07.02.2021)
12. Леонов А. И., Фомичев К. И. Моноимпульсная радиолокация. М.: Радио и связь, 1984. 312 с.
13. Evans G. E. Antenna Measurement Techniques. Boston–London: Artech House, 1990. 239 p.
14. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / под ред. Н. М. Цейтлина. М.: Радио и связь, 1985.
15. Rahman H. Fundamental Principles of Radar. CRC Press, 2019. 339 p.

Информация об авторе

Парнес Михаил Давидович – д. т. н. (2011), главный конструктор ООО "Резонанс". Технический руководитель фирмы по производству антенн для безопасности воздушного движения. Автор более 75 научных публикаций. Сфера научных интересов: фазированные антенные решетки, СВЧ-электроника. Адрес: ООО "Резонанс", ул. Академика Павлова, д. 14А, Санкт-Петербург, 194156, Россия
E-mail: info@antennas.spb.ru

References

1. Mailloux R. J., Mailloux R. J. A History of Phased Array Antennas. University of Massachusetts, 2006, pp. 567–603. doi: 10.1002/0471783021.ch17
2. Brookner E. Practical Phased-Array Antenna Systems. Artech House, Boston-London, 1991.
3. Vendik O. G., Parnes M. D. Electronic scanned antennas. M., SCIENCE-PRESS, 2002, 232 p. (In Russ.)
4. Schelkunoff S., Friis G. Antennas: Theory and Practice. Ed. L. D. Bahraha. M., Sovetskoe radio, 1955, 604 p. (In Russ.)
5. Phased-Array Antenna Design. Ed. D. I. Voskresensky. M., Radiotekhnika, 2003, 632 p. (In Russ.)
6. Vendik O. G. A phase shifter with one tunable component for a reflectarray antenna. Ed. O. G. Vendik, M. D. Parnes. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2008, vol. 50, no. 4, pp. 53–65. doi: 10.1109/MAP.2008.4653662
7. Koul S. K., Bhat B. Microwave and millimeter wave phase shifter V. 1. Artech House, Boston-London, 1991, 338 p.
8. Sturdivant R., Quan C., Enson Chang E. Systems Engineering of Phased Arrays. Artech House, Boston-London. 2018, 300 p.
9. Hiza G. S., Vendik I. B., Serebryakova E. A. Microwave phase shifters and switches. M., Radio i svyaz', 1984, 184 p. (In Russ.)
10. Hansen R. C. Phased array antennas, Second edition. Wiley, 2009. 558 p. doi: 10.1002/9780470529188
11. Phased antenna array analysis. Software. Available at: <http://www.ascorltd.com/ru/completed-projects/programma-dlya-rascheta-far-fazar-v.5> (accessed 07.02.2021) (In Russ.)
12. Leonov A. I., Fomichev K. I. Monopulse Radar. M., Radio i svyaz', 1986, 312 p. (In Russ.)
13. Evans G. E. Antenna Measurement Techniques. Artech House, Boston-London, 1990. 239 p.
14. Measurements methods of microwave antennas. Ed. N. M. Ceitlin. M., Radio i svyaz', 1985. (In Russ.)
15. Rahman H., Fundamental Principles of Radar. CRC Press, 2019. 339 p.

Information about the author

Michael D. Parnes, Dr. Sci. (Eng.) (2011), Chief Engineer of company "Resonance Ltd". Technical director of an air traffic safety antenna company. The author of more than 75 scientific publications. Area of expertise: electronic steering antennas, microwave devices. Address: Company "Resonance Ltd.", 14A Ak. Pavlova St., St Petersburg 194156, Russia
E-mail: info@antennas.spb.ru
