

## **ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ В ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ**

**Н.М. Легкий<sup>1,@</sup>,  
И.В. Унченко<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия*

<sup>2</sup>*Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт, Калужская область, г. Жуков 249192, Россия*

*@Автор для переписки, e-mail: legki@mirea.ru*

В статье изложены результаты исследования фазового и временного методов формирования диаграммы направленности фазированных антенных решеток. Проведен их сравнительный анализ на примере восьмиэлементной эквидистантной антенной линейки на базе широкополосных щелевых излучателей Вивальди. Рассмотрены практические реализации построения устройств формирования диаграмм направленности фазированных антенных решеток на фазовращателях для фазового метода формирования диаграммы и на линиях задержки. Приведены характеристики наиболее часто используемых в фазированных антенных решетках фазовращателей фирмы Analog Devices и экспериментальных линий задержек, приведены их характеристики. Оценена широкополосность обоих типов антенных решеток на основе результатов проведенного математического моделирования. Отмечено, что фазовый метод формирования диаграммы направленности не получил большого распространения в широкополосных системах, что обусловлено наличием зависимости фазы сигнала от частоты и, как следствие, узким диапазоном работы фазовращателей. В линиях задержки время задержки для всех каналов не зависит от частотной составляющей сигнала, что позволяет говорить о сверхширокополосности устройств формирования диаграммы направленности, построенных на принципах временной задержки. Показано, что максимальная длина пути задержки сигнала для крайних излучателей зависит только от максимального расчетного угла отклонения луча. Фазированные антенные решетки, построенные с использованием линий задержек, имеют не только большую широкополосность, но и большее затухание сигналов. При изготовлении фазированных антенных решеток с небольшим количеством антенных элементов в линейке использование линий задержек в качестве фазосдвигающих элементов дает значительный выигрыш в характеристиках при незначительном проигрыше в мощности.

**Ключевые слова:** антенны, фазированные антенные решетки, ФАР, диаграмма направленности, формирование диаграммы направленности, фазовращатели, линии задержки.

## FORMATION OF THE DIRECTION DIAGRAM IN PHASED ANTENNA ARRAY

N.M. Legkiy<sup>1,@</sup>

I.V. Unchenko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

<sup>2</sup>Kaluga Radio Engineering Research Institute, Kaluga region, Zhukov 249192, Russia

@Corresponding author e-mail: legki@mirea.ru

The article presents the results of the study of phase and temporal methods in the formation of the direction diagram of phased antenna array, and carries out a comparative analysis using an eight-element equidistant antenna array based on Vivaldi wideband slot-hole emitters as example. The practical implementations of constructing devices for forming phased antenna array direction diagrams on phase shifters for the phase diagram generation method and on delay lines, for the temporal method, are considered. The characteristics of the most frequently used Analog Devices phase shifters in the phased antenna arrays, as well as experimental delay lines are given. The results of the mathematical modeling allowed estimating the bandwidth of both types of antenna arrays. Authors note that the phase method of beamforming is not widely used in broadband systems due to the dependence of the phase of a signal on the frequency and, as a consequence, the narrow range of operation of phase shifters. In delay lines, the delay time for all channels does not depend on the frequency component of the signal, which suggests that the beamforming devices based on the principles of time delay are ultra-wideband, and the maximum length of the signal delay path for extreme emitters depends only on the maximum calculated angle of beam deflection. Phased antenna arrays built using delay lines have not only greater bandwidth, but also greater attenuation of signals. In the manufacture of phased antenna arrays with a small number of antenna elements in the range, the use of delay lines as phase-shifting elements gives a significant gain in performance with a slight loss in power.

**Keywords:** antennas, phased arrays, radiation pattern, beamforming, phase shifters, delay line.

### Введение

В последние годы наблюдается необходимость в расширении рабочей полосы антенн различных радиосистем: радиолокационных, связи и других типов, а также повышения частот их работы, что вызывает известные трудности при построении любой современной системы, использующей электронное управление лучом. Неотъемлемой частью бортовой радиоаппаратуры стали широкополосные фазированные антенные решетки (ФАР), в то время как системы с механическим отклонением луча и комплексы на их основе постепенно вытесняются. Вместе с тем на рынке представлены аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), позволяющие вести прямое цифровое диаграммообразование (ЦДО) в нижней полосе частот, с тенденцией к повышению частоты и расширению полос.

Целью настоящей статьи является рассмотрение способов построения устройств формирования диаграмм направленности для фазированных антенных решеток (ФАР).

## Методы электронного отклонения луча

В состав любой системы связи или радиолокационной системы (РЛС) с электрическим сканированием входит антенна, приемо-передатчик, диаграммообразующее устройство (ДОУ). Изменение положения луча в ФАР осуществляется изменением фазы сигнала, поступающего на вход соответствующего излучателя антенной решетки. Существуют фазовый, временной и частотный методы сканирования в ФАР, они подробно описаны в [1]. Необходимые значения распределения фаз между каналами рассчитываются в зависимости конструкции антенной решетки, определяющей диаграмму направленности, угла обзора и необходимого числа положений луча. Существуют также редко используемый метод переключения лучей и набирающее популярность цифровое формирование диаграммы направленности [2, 3]. Широкополосность таких антенных решеток определяется частотными характеристиками основных составляющих решетки – излучателей, фазовращателей, линий задержки. Широкополосные излучатели на основе симметричных щелевых линий (излучатель Вивальди) уже хорошо известны, их разновидности подробно представлены в [4]. Общие тенденции развития широкополосных ФАР на основе фазовращателей отражены в [5, 6].

### Расчет фазовых задержек для эквидистантной антенной линейки

Рассмотрим варианты формирования луча на примере эквидистантной антенной линейки (АЛ), состоящей из  $N$  элементов, расположенных с шагом  $d$  и с фронтом волны, падающим под углом  $\theta$  (рис. 1).

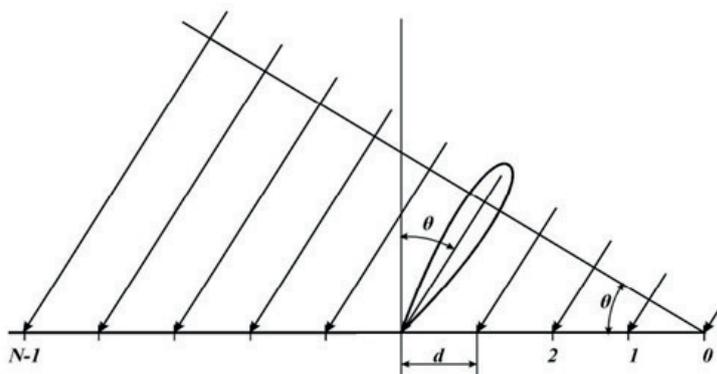


Рис. 1. Эквидистантная антенная линейка.

Фаза сигнала для каждого излучателя АЛ рассчитывается по формуле:

$$\varphi_{N-1} = \varphi_0 + (N-1) \cdot \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot d \cdot \sin \theta, \quad (1)$$

где:  $\lambda$  – длина волны;

$\varphi_0$  – начальная фаза;

$\varphi_{(N-1)}$  – фазовый сдвиг сигнала на соответствующем излучателе.

С целью моделирования решетки из восьми элементов рассмотрим широкополосный щелевой излучатель Вивальди. Диаграмма направленности такого излучателя приведена на рис. 2.

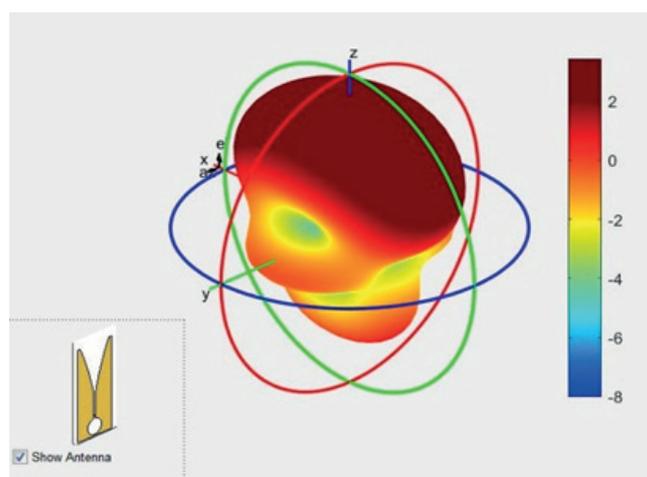


Рис. 2. Диаграмма направленности излучателя Вивальди.

Для отклонения луча от нормали восьмиканальной АЛ, состоящей из антенн Вивальди с  $d = \lambda/2$  на  $\pm 50^\circ$  с шагом  $10^\circ$ , при  $\varphi_0 = 0^\circ$  для пяти промежуточных положений потребуется по пять значений фазы для крайних излучателей, и для остальных излучателей, не считая синфазного направления, когда фаза сигнала во всех каналах равна нулю – по десять значений.

Идеальные значения фаз сигнала для каждого канала приведены в табл. 1.

Таблица 1. Точные значения фаз сигнала для каждого канала антенной линейки (в град.)

| $\varphi/\theta$ | $\theta = 10^\circ$ | $\theta = 20^\circ$ | $\theta = 30^\circ$ | $\theta = 40^\circ$ | $\theta = 50^\circ$ |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $\varphi_1$      | 182.7346            | 190.8553            | 204.1154            | 222.1120            | 244.2982            |
| $\varphi_2$      | 5.4692              | 21.7107             | 48.2309             | 84.2240             | 128.5965            |
| $\varphi_3$      | 188.2038            | 212.5660            | 252.3463            | 306.3360            | 12.8947             |
| $\varphi_4$      | 10.9384             | 43.4213             | 96.4617             | 168.4480            | 257.1929            |
| $\varphi_5$      | 193.6730            | 234.2766            | 300.5771            | 30.5600             | 141.4912            |
| $\varphi_6$      | 16.4076             | 65.1320             | 144.6926            | 252.6720            | 25.7894             |
| $\varphi_7$      | 199.1422            | 255.9873            | 348.8080            | 114.7840            | 270.0876            |

### Построение диаграммообразующего устройства на фазовращателях

Изменение фазы сигнала при классическом построении ДОУ осуществляется путем разделения сигнала на несколько каналов с помощью делителей мощности при независимом изменении фазы управляемым фазовращателем в каждом канале. Структура такого ДОУ приведена на рис. 3. Чтобы получить приближенные к идеальным значения уровней фазовых сдвигов, потребуется включить в тракт каждого канала несколько фазовращателей. В табл. 2 приведены характеристики фазовращателей Analog Devices.

Как видно из табл. 1 и 2, можно подобрать приближенные значения фазовых задержек в каналах для построения устройства диаграммообразования с использованием одних только фазовращателей. Результаты моделирования изменения положения луча в диаграмме направленности эквидистантной АЛ при работе восьмиканального ДОУ, построенного на фазовращателях НМС649А, приведены на рис. 4.

Таблица 2. Характеристики фазовращателей Analog Devices [7]

| Наименование | Частота, ГГц | Вносимые потери, Дб | Биты управления | Дискрет фазы (в град.) | Фазовая ошибка |
|--------------|--------------|---------------------|-----------------|------------------------|----------------|
| HMC936A      | 1.2–1.4      | 5                   | 6               | 5.625                  | 1.2            |
| HMC543A      | 8–12         | 6.5                 | 4               | 22.5                   | 4              |
| HMC648A      | 2.9–3.9      | 5                   | 6               | 5.625                  | 1.2            |
| HMC1133      | 4.8–6        | 4                   | –               | –                      | –              |
| HMC649A      | 3–6          | 8                   | 6               | 5.625                  | 4              |
| HMC647A      | 2.5–3.1      | 4                   | 6               | 5.625                  | 1.5            |
| HMC642A      | 9–12.5       | 7                   | 6               | 5.625                  | 4.5            |

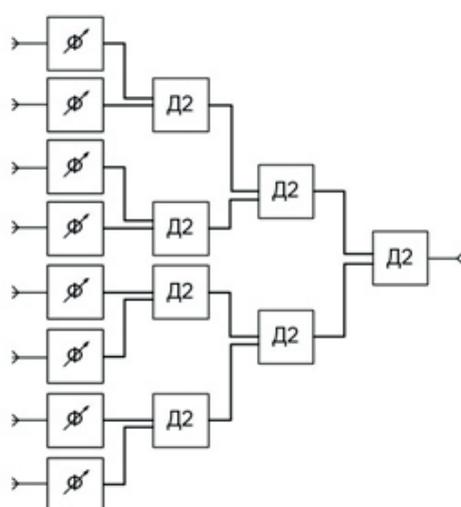


Рис. 3. Структура устройства формирования диаграммы с фазовращателями.

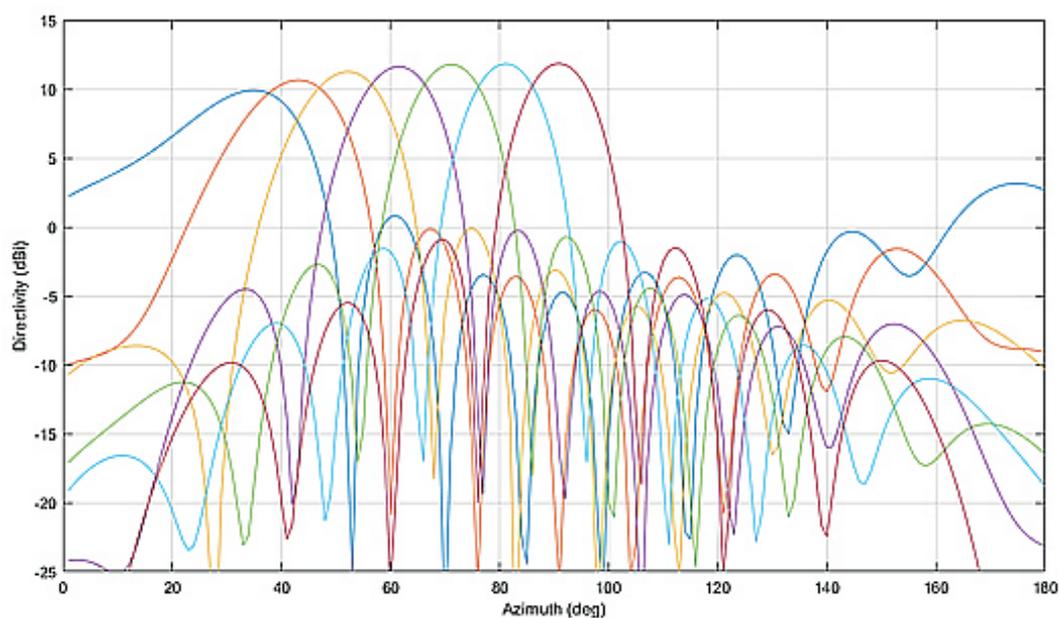


Рис. 4. Изменение положения луча АЛ при работе ДОУ на фазовращателях.

К недостаткам таких ДОУ можно отнести их очевидную относительную узкополосность. По причине зависимости фазы сигнала от частоты и, как следствие, узкого диапазона работы фазовращателей такие ДОУ не получили большого распространения в широкополосных системах. Тем не менее, в узкополосных системах, включающих в себя несколько ФАР разного диапазона частот (в нижнем диапазоне частот затруднительно построение ФАР с широким перекрытием частот), фазовращатели эффективно применяются при построении ДОУ, в том числе и многолучевых.

### Построение диаграммообразующего устройства на линиях задержки

При использовании линий задержек для построения ДОУ удобно оперировать не фазовым сдвигом сигнала, а задержкой сигнала по времени на величину  $\Delta t$ . Из выражения (1) очевидно, что:

$$\Delta t = \left( \frac{d}{c} \right) \cdot \sin \theta, \quad (2)$$

где:  $c$  – скорость распространения сигнала;

$d$  – шаг антенной линейки.

Время задержки для всех каналов можно записать в виде:

$$t_{N-1} = t_0 + (N-1) \cdot \left( \frac{d}{c} \right) \cdot \sin \theta. \quad (3)$$

Следует обратить внимание, что из этой формулы исключена частотная составляющая. Это позволяет говорить о сверхширокополосности ДОУ, построенных на принципах временной задержки, причем максимальная длина пути задержки сигнала для крайних излучателей должна составлять:

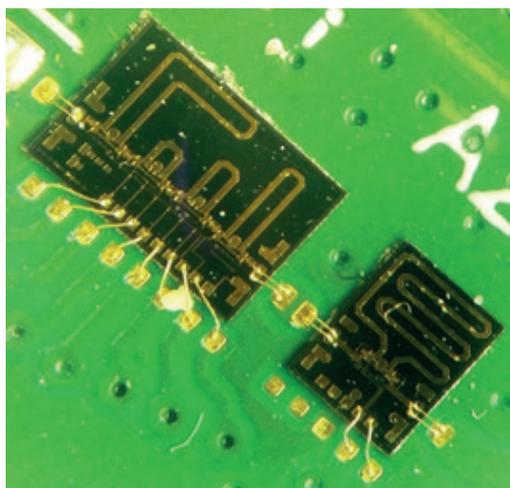
$$L_z = (N-1) \cdot d \cdot \sin \theta_{\max} \quad (4)$$

где  $\theta_{\max}$  – максимальный расчетный угол отклонения луча.

В случае построения устройства ДОУ, работающих на принципах временной задержки сигнала, мы будем использовать управляемые четырехрядные (ЛЗ1) и однорядные (ЛЗ2) линии задержки отечественной разработки – монолитные интегральные схемы (МИС) на подложке из GaAs. Технология GaAs-монолитных интегральных схем СВЧ в последние годы применяется все более активно [8–11]. Общий вид двух типов линии задержки в виде МИС, установленных в тракте ДОУ, приведен на рис. 5. Основные параметры этих МИС приведены в табл. 3.

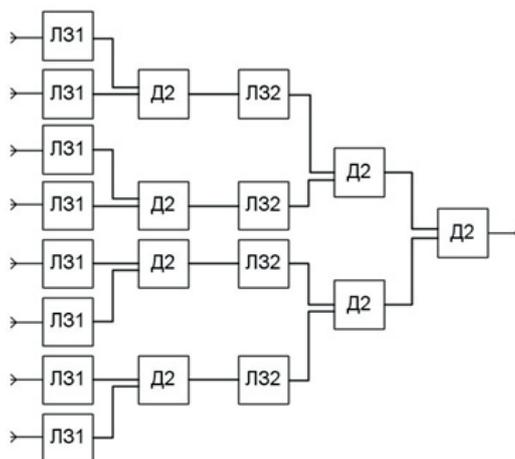
**Таблица 3.** Характеристики применяемых линий задержки

| Наименование | Номинальные значения дискретов электрической длины, мм | Вносимое затухание, дБ | Диапазон частот, ГГц |
|--------------|--|------------------------|----------------------|
| ЛЗ1          | 1.5; 3; 6; 12  | Не более 10            | 1–18                 |
| ЛЗ2          | 24   | Не более 4             | 1–18                 |



**Рис. 5.** Линии задержки в виде микроволновой монолитной интегральной схемы в тракте формирования диаграммы направленности ФАР.

Для управления задержкой сигнала в ДОУ на МИС ЛЗ1, ЛЗ2 изменим классическую схему построения ДОУ, установив более грубую одноразрядную ЛЗ2 перед последним делителем мощности для управления грубой задержкой в двух каналах одновременно. Структурная схема такого ДОУ представлена на рис. 6. Подчеркнем, что перспективные оптоэлектронные ДОУ [12] строятся на оптических линиях задержки по тем же принципам временной задержки сигнала, что и ДОУ СВЧ-диапазона. Результаты моделирования изменения положения луча в диаграмме направленности (ДН) эквидистантной АЛ при работе восьмиканального ДОУ, построенного на линиях задержки ЛЗ1, ЛЗ2, приведены на рис. 7.



**Рис. 6.** Структура ДОУ с линиями задержки.

Сопоставление характеристик ДОУ, выполненных с фазовращателями (рис. 4) и с линиями задержки (рис. 7), позволяет сделать вывод, что оба способа построения устройства формирования удовлетворяют поставленной задаче, но при этом ДОУ на линиях задержки имеет более широкий диапазон работы. К недостаткам такого ДОУ следует отнести большие затухания в каналах по сравнению с ДОУ на фазовращателях. Необходимо отметить более низкую разрядность ЛЗ по сравнению с фазовращателями, хотя на

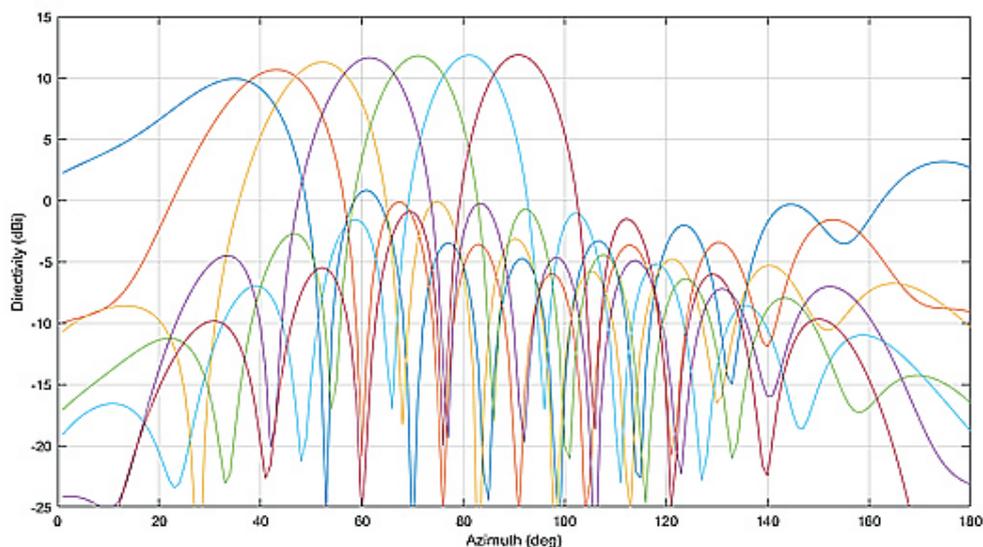


Рис. 7. Изменение положения луча АЛ при работе ДООУ с линиями задержки.

ДН восьмиэлементной АЛ это не сказалось, но при построении многоэлементных АФАР может играть важную роль.

Приведенные схемы ДООУ могут быть использованы для построения многолучевых антенных решеток (МАР) с независимым управлением лучами. Реализация таких МАР потребует лишь просуммировать соответствующие выходные каналы идентичных ДООУ.

#### Литература:

1. Справочник по радиолокации: в 4 т. / под ред. М.И. Сколника. М.: Сов. Радио, 1977. Т. 2: Радиолокационные антенны и устройства. 438 с.
2. Слюсар В.И. Схемотехника цифрового диаграммообразования. Модульные решения // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2002. № 1. С. 46–52.
3. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. М.: Радиотехника, 2010. 144 с.
4. Воскресенский Д.И., Котов Ю.В., Овчинникова Е.В. Тенденции развития широкополосных фазированных антенных решеток (обзор работ) // Антенны. 2005. № 11 (102). С. 7–21.
5. Викулов И. Радиоэлектронные системы с АФАР: направления развития и применения // Электроника: наука, технология, бизнес. 2017. № 5 (165). С. 126–134.
6. Лопатенко Э.В., Марусич А.А. Формирование диаграммы направленности АФАР с двумя независимо управляемыми лучами и низким уровнем боковых лепестков // Вопросы радиоэлектроники. 2005. Т. 1. № 1. С. 144–158.
7. <https://www.analog.com/ru/products/rf-microwave/phase-shifters-vector-modulators/digital-phase-shifter.html> (по состоянию на 01.03.2019).
8. Викулов И., Кичаева Н. Технология GaAs-монокристаллических схем СВЧ в зарубежной военной технике // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007. № 2 (76). С. 56–61.
9. Викулов И. Монокристаллические интегральные схемы СВЧ технологическая основа АФАР // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2012. № 7 (121). С. 60–73.
10. Masse D. Report provides data on shipments and market values for airborne AESA // Microwave J. 2011. V. 54. № 9. P. 43.

11. Hindle P. GaAs foundry services outlook // *Microwave J.* 2010. V. 53. № 6. P. 146.
12. Зайцев Д.Ф. Нанопотоника и ее применение. М.: АКТЕОН, 2011. 427 с.

### References:

1. Handbook of radar: in 4 volumes. Ed. M.I. Skolnik. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1977. V. 2: Radar antennas and devices. 438 p. (in Russ.)
2. Slusar V.I. Digital diagram forming circuitry. Modular solutions. *Elektronika: nauka, tehnologiya, biznes* (Electronics: Science, Technology, Business). 2002; 1: 46-52. (in Russ.)
3. Grigoriev L.N. Digital beamforming in phased antenna arrays. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2010. 144 p. (in Russ.)
4. Voskresenskiy D.I., Kotov Yu.V., Ovchinnikova E.V. Development trends of broadband phased antenna arrays (review). *Antenny* (Antennas). 2005; 11(102): 7-21. (in Russ.)
5. Vikulov I. Radio-electronic systems with AFAR: Directions of development and application. *Elektronika: nauka, tehnologiya, biznes* (Electronics: Science, Technology, Business). 2017; 5(165): 126-134. (in Russ.)
6. Lopatenko E.V., Marusich A.A. Forming a pattern of an AFAR with two independently controlled rays and a low level of side lobes. *Voprosy radioelektroniki* (Questions of Radio Electronics). 2005; 1(1): 144-158. (in Russ.)
7. <https://www.analog.com/ru/products/rf-microwave/phase-shifters-vector-modulators/digital-phase-shifter.html> (as of 03/01/2019).
8. Vikulov I., Kichaeva N. Technology of GaAs-monolithic microwave circuits in foreign military equipment. *Elektronika: nauka, tehnologiya, biznes* (Electronics: Science, Technology, Business). 2007; 2(76): 56-61. (in Russ.)
9. Vikulov I. Monolithic integrated circuits microwave is technological basis of AESA. *Elektronika: nauka, tehnologiya, biznes* (Electronics: Science, Technology, Business). 2012; 7(121): 60-73. (in Russ.)
10. Masse D. Report provides data on shipments and market values for airborne AESA. *Microwave J.* 2011; 54(9): 43.
11. Hindle P. GaAs foundry services outlook. *Microwave J.* 2010; 53(6): 146.
12. Zaitsev D.F. Nanophotonics and its application. Moscow: "AKTEON" Publ., 2011. 427 p. (in Russ.)

### Об авторах:

**Легкий Николай Михайлович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой инженерной экологии техносферы Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Унченко Иван Владимирович**, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); инженер АО «Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт» (249192, Калужская область, Жуков, ул. Ленина, 2).

*About the authors:*

*Nikolay M. Legkiy*, D.Sc. (Engineering), Head of the Chair of Environmental Engineering of the Technosphere, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia).

*Ivan V. Unchenko*, Postgraduate Student of the Chair of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia); Engineer of Kaluga Radio Engineering Research Institute (2, Lenin st., Zhukov, Kaluga region, 249192, Russia).

*Для цитирования:* 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

*For citation:* Legkiy N.M., Unchenko I.V. Formation of the direction diagram in phased antenna array. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(2): 29-38. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-29-38