

## ИЗЛУЧАЮЩИЕ СВОЙСТВА НЕОДНОРОДНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Н. В. ЩЕРБАКОВ, Г. И. ХЛОПОВ, О. А. ВОЙТОВИЧ, В. Н. ПЕХОТА, С. В. МИРОНИЮК, В. Д. ПАВЛЕНКО, А. В. ОВЧАРОВ

Впервые предложена конструкция антенной решетки неоднородных апертурных излучателей на основе секториальных рупорных антенн Ка диапазона с разными размерами раскрывов, превышающими длину волны. В результате решения оптимизационной задачи показано, что использование излучающих элементов с неодинаковыми прямоугольными размерами раскрыва, расположенных в виде концентрических «колец» на раскрыве антенной решетки, обеспечивает формирование узкой диаграммы направленности и подавление дифракционных лепестков на краю сектора сканирования до уровня -17 дБ при падении коэффициента усиления антенны не более, чем на 1 дБ. Предложенная антенная система предназначена для электрического сканирования иглообразным лучом в ортогональных плоскостях.

**Ключевые слова:** антенная решетка, диаграмма направленности, дифракционный лепесток, сектор сканирования.

### ВВЕДЕНИЕ

Для применения в современных радиотехнических системах большой интерес представляет разработка электрически сканирующих антенных решеток (АР) миллиметрового диапазона длин радиоволн.

В частности, широко распространены АР проходного (рис. 1, а) и отражательного типа (рис. 1, б) с квазиоптическим питанием [1, 2]. Необходимым условием является обеспечение максимально возможного значения коэффициента перехвата энергии первичного облучателя. В первом случае решетка приемных антенн  $A_{Rn}$  осуществляет перехват энергии облучателя и разделение ее на каналы, в каждом из которых установлен электрически управляемый фазовращатель (ФВ). Передающая решетка  $A_{Tn}$  обеспечивает формирование диаграммы направленности (ДН) АР в целом.

Решетка отражательного типа (рис. 1, б) работает аналогично, с той лишь разницей, что на выходе ФВ установлены регулируемые короткозамыкатели для компенсации первоначального разброса фаз в каналах АР, допущенных в процессе изготовления устройств СВЧ.

Современная элементная база устройств СВЧ миллиметрового диапазона длин волн не позволяет расположить фазовые центры излучающих элементов решетки на расстоянии порядка половины длины волны из-за их больших поперечных размеров. Это относится как к электрически управляемым элементам на основе ферритовых устройств [3–7], так и к элементам на основе полупроводниковых р-і-п диодных устройств [8,9]. По этой причине практически всегда формируются дифракционные лепестки, амплитуда которых на краю сектора сканирования может достигать значительной величины.

Использование неэквидистантных АР позволяет разрушить периодичность фазовой структуры, однако в этом случае апертура антенны оказывается запол-

ненной не полностью, что приводит к снижению ее коэффициента усиления (КУ).

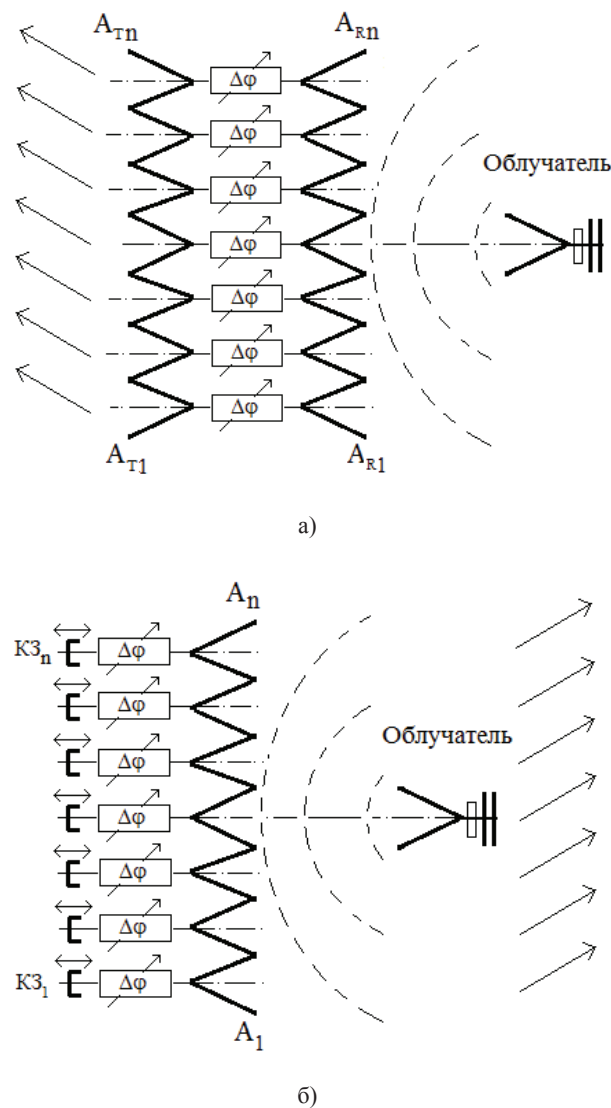


Рис. 1. Структура АР проходного -а) и отражательного -б) типов

Поэтому целью данной работы является разработка АР миллиметрового диапазона длин волн с уменьшенным количеством излучателей, полным заполнением апертуры антенны и низким уровнем боковых лепестков ее ДН.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим геометрию выходной апертуры плоской АР рупорных излучателей, которые расположены в плоскости XOY (рис. 2), где введены следующие обозначения:

- $\rho_i$  – радиус-вектор точки на апертуре антенны с координатами  $x_i, y_i$ ;
- $r, \theta, \varphi$  – координаты точки наблюдения  $\rho(r, \theta, \varphi)$ ;
- $P^0$  – проекция точки наблюдения на плоскость раскрытия антенны.

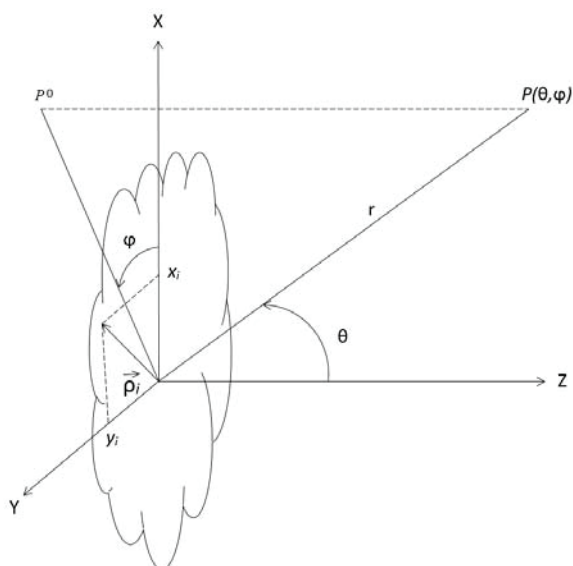


Рис. 2. Геометрия плоскости расположения АР рупорных излучателей

Тогда ДН решетки с размерами раскрытий отдельных излучателей  $a_i \times b_i$  записывается в виде [8]:

$$f(\theta, \varphi) = \left| \sum_i \sqrt{D_i} \times \frac{A_i \times e^{j\varphi_i}}{\sqrt{\sum_i A_i}} \times F_i(\theta, \varphi) \times e^{jk \cdot \vec{\rho}_i \cdot \vec{r}} \right|, \quad (1)$$

где:

$$D_i = 0,81 \cdot \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot a_i \cdot b_i, \quad (2)$$

- коэффициент направленного действия (КНД)  $i$ -го излучателя;
- $A_i$  – амплитуда напряженности электрического поля в центре  $i$ -го излучателя;
- $\varphi_i$  – фаза напряженности электрического поля в центре  $i$ -го излучателя;

$$\vec{\rho}_i \cdot \vec{r} = x_i \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi + y_i \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi,$$

- набег фазы в  $i$ -м излучателе

$$F_i(\theta, \varphi) = \frac{\sin \frac{\pi \cdot b_i \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi}{\lambda}}{\frac{\pi \cdot b_i \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi}{\lambda}} \times \frac{\cos \frac{\pi \cdot a_i \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi}{\lambda}}{1 - \left( \frac{2 \cdot a_i \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi}{\lambda} \right)^2} \cdot \frac{1 + \cos \theta}{2};$$

- ДН рупора;
  - $\lambda$  – рабочая длина волны.
- КНД решетки излучателей определяется выражением

$$D = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda^2} \cdot \frac{\left| \iint A(x, y) dx dy \right|^2}{\iint A^2(x, y) dx dy}, \quad (3)$$

где  $A(x, y)$  – амплитудно-фазовое распределение (АФР) в раскрытии решетки.

Отметим, что в выражении (1) значение КНД отдельного излучателя нельзя вынести за знак суммы (2) из-за того, что каждый из них вносит свой отдельный вклад в формирование АФР всей АР.

### 2. РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 3 приведена структура излучающего полотна АР размером  $17\lambda \times 17\lambda$  для случая, когда рупорные излучатели имеют раскрытия размером  $\lambda \times \lambda$  и расположены в узлах прямоугольной сетки.

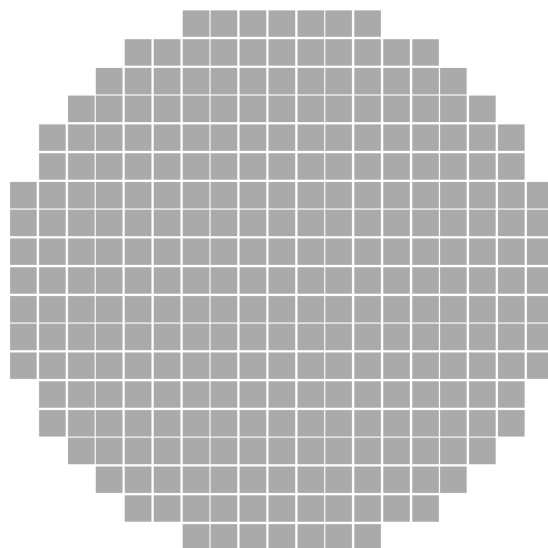


Рис. 3. Структура выходной апертуры антенной решетки с размерами излучающих элементов  $\lambda \times \lambda$ , расположенных в узлах прямоугольной сетки. Количество элементов  $K=265$

Сечения ДН АР шириной  $3,5^\circ$  в плоскостях  $\varphi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  и  $135^\circ$  при отклонении главного лепестка от нормали на угол  $-6^\circ$  приведены на рис. 4

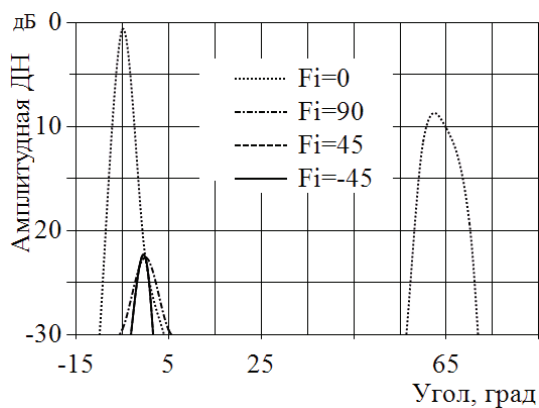


Рис. 4. Сечение ДН AP (рис. 3) в плоскостях  $\varphi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  и  $135^\circ$  при отклонении главного лепестка от нормали на угол  $-6^\circ$

Как видно, при расстоянии между элементами, равными длине волны, даже сравнительно небольшое отклонение главного максимума ДН от нормали к ее раскрытию приводит к появлению дифракционных лепестков достаточно большого уровня (до  $-9$  дБ).

Для снижения уровня дифракционных лепестков при расстоянии между элементами ( $a_i, b_i \geq 0,8\lambda$ ) необходимо разрушить периодичность в расположении излучателей при условии полного заполнения апертуры решеткой излучающими элементами.

Обычно эта задача решается путем неэквидистантного расположения одинаковых излучающих элементов [2,10], что возможно только для частично заполненных апертур. В рассматриваемом случае, когда для максимального перехвата энергии первичного облучателя требуется полное заполнение излучающей апертуры, практически единственным вариантом разрушения интерференционной структуры боковых лепестков является применение излучающих элементов разных размеров. Это приводит к концепции неоднородной AP. Поэтому дальнейшее рассмотрение посвящено исследованию особенностей одного из вариантов построения подобной AP, состоящей из рупорных излучателей с разными размерами раскрытов.

Одним из путей решения задачи может быть попарное объединение отдельных излучателей решетки по вертикали и по горизонтали (рис.5).

При этом общее количество элементов уменьшается в два раза по сравнению с AP рис. 3, а фазовые центры элементов смещаются из узлов прямоугольной сетки в разные стороны. В частности, один из наиболее удачных, по мнению авторов, вариантов расположения элементов (рис. 5) приводит к уменьшению общего количества излучающих элементов до  $K=133$  по сравнению с традиционной компоновкой излучающей апертуры рис.3, причем уровень дифракционных лепестков в этом случае снижается до  $-18$  дБ (рис. 6).

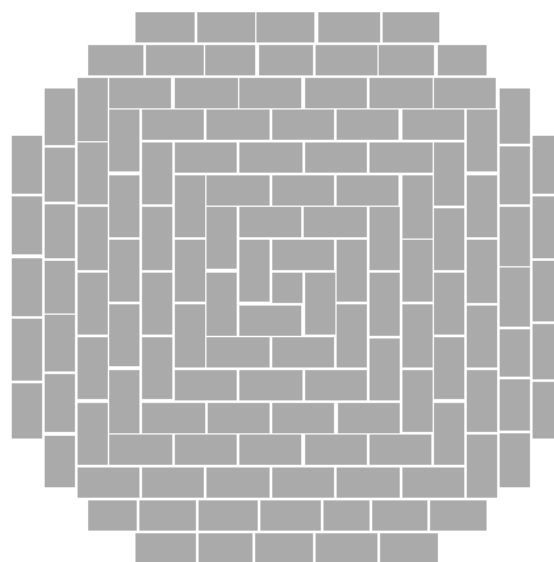


Рис. 5. Структура неоднородной AP с попарным объединением элементов ( $K=133$ )

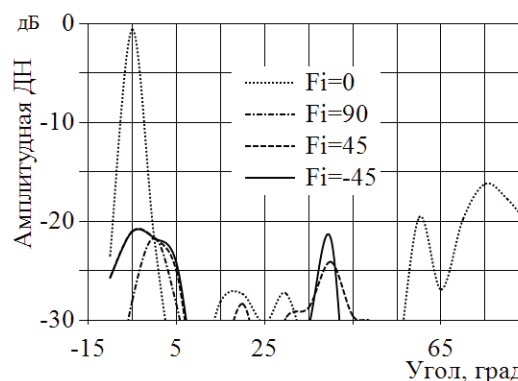


Рис. 6. Сечение ДН неоднородной AP (рис. 5) в плоскостях  $\varphi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  и  $135^\circ$  при отклонении главного лепестка от нормали на угол  $-6^\circ$

Для дальнейшего улучшения характеристик подобной решетки рассмотрим процедуру оптимизации ее параметров с целью определения размеров апертур излучателей и их положения при требовании минимального уровня бокового излучения во всей области углов и отклонении главного лепестка ДН на заданный угол.

При решении этой задачи учитываем, что необходимо:

- зафиксировать общий размер излучающего полотна AP;
- рассчитать максимальный и минимальный размеры апертуры излучателя;
- учесть толщину стенок излучающих элементов, которые задаются из конструктивных соображений.

При этом предполагается, что:

- элементы решетки расположены в виде концентрических «колец» (рис. 5);
- размер апертуры всех элементов решетки и радиус их расположения – разные;
- полотно решетки представляет собой восьмиугольник с заданными размерами.

Таким образом, исходными параметрами для проведения процедуры оптимизации являются следующие величины:

- $N$  – количество «колец»;
- $R$  – радиус вписанной окружности;
- $R_0$  – радиус описанной окружности;
- $d_{\min}$  – минимальная ширина раскрыва элемента решетки;
- $d_{\max}$  – максимальная ширина раскрыва элемента решетки;
- $h_{\min}$  – минимальная длина элемента решетки;
- $h_{\max}$  – максимальная длина элемента решетки;
- $Z$  – толщина стенок рупора.

Количество элементов при решении задачи синтеза не задается, а независимыми переменными являются:

$$\delta_i, 0 \leq \delta_i \leq 1, 0 < i \leq N, \quad (4)$$

значения которых задаются генератором случайных чисел и определяют ширину  $i$ -го „кольца“:

$$w_i = d_{\min} + \delta_i \cdot \frac{R - d_{\min}(N - 0,5)}{\sum_{i=1}^N \delta_i}, \quad (5)$$

$$\Delta_{ij}, 0 \leq \Delta_{ij} < 1, 0 < i \leq N, 0 \leq j < 4 \times i, \quad (6)$$

значения которых также задаются генератором случайных чисел и определяют больший размер раскрыва  $j$ -й апертуры элемента решетки в  $i$ -м „кольце“:

$$h_{ij} = 2 \cdot d_{\min} + \Delta_{ij} \cdot \frac{R_0 \cdot 2 - 2 \cdot d_{\min} \cdot i - w_i}{\sum_{j=1}^i \Delta_{ij}}. \quad (7)$$

При этом решается минимаксная оптимизационная задача

$$\min_{\delta_i, \Delta_{ij}} \max_{r_0 \in \Omega_{sl}} |F(r_0, \delta, \Delta)|, \quad (8)$$

где  $r_0$  – орт направления на точку наблюдения;  $\Omega_{sl}$  – область боковых лепестков.

Расчет проводился для различного количества «колец» и различного количества элементов решетки. При этом задача решалась при помощи генетического алгоритма [11,12] и методом случайного поиска [13–15], в результате чего определялось количество элементов оптимальной АР, формировалась структура антенного полотна и рассчитывались сечения ДН в четырех плоскостях. На рис. 7 приведен вид излучающей апертуры АР, содержащей 86 элементов в виде 5 «колец», а на рис. 8 – ДН АР при отсутствии сканирования ДН. При отклонении луча в секторе

мене  $\pm 6^\circ$  достигается приемлемый уровень дифракционных лепестков ( $< -17$  дБ).

В этом случае уровень максимального бокового излучения не превышает  $-18$  дБ, а при отсутствии сканирования уменьшается до  $-22$  дБ.

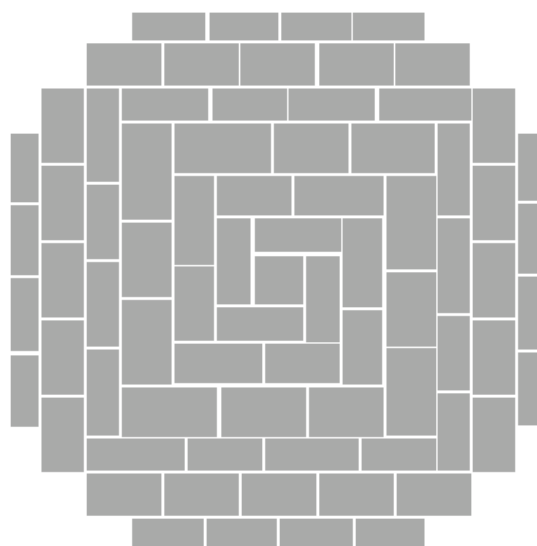


Рис. 7. Структура излучающего полотна антенной решетки при  $K=86$

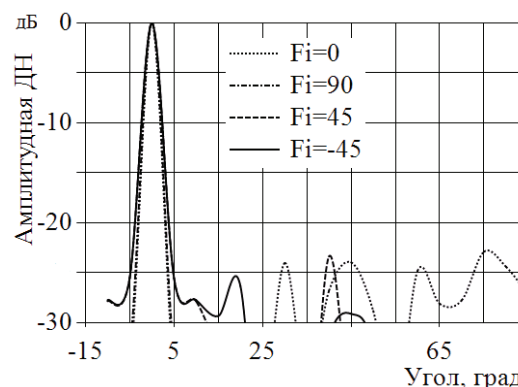


Рис. 8. Сечение ДН неоднородной АР (рис. 7) в плоскостях  $\varphi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  и  $135^\circ$  при отсутствии сканирования

Однако увеличение размеров излучающих элементов приводит к снижению КУ антенны при отклонении главного лепестка ДН от нормали к раскрыву АР из-за значительной направленности ее отдельных элементов.

Как показали результаты численного моделирования параметров рассматриваемой АР, наиболее приемлемый вариант достигается при 7 кольцах ( $K=77$ ). ДН такой антенны при отклонении главного лепестка на величину  $-6^\circ$  приведена на рис. 9.

Представляют интерес результаты расчета ДН АР на разных частотах при различных углах отклонения главного максимума ее ДН. Например, на рис. 10 приведены ДН в диапазоне частот при отсутствии сканирования, а на рис. 11 – при отклонении луча антенной решетки на  $-60$ .

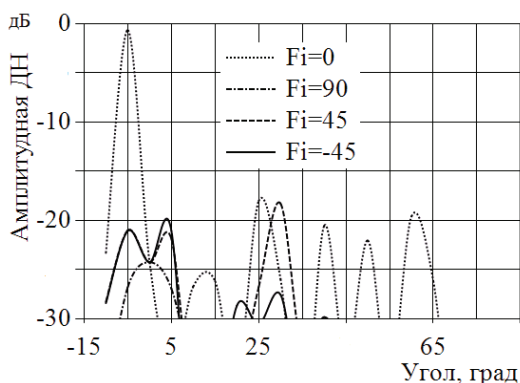


Рис. 9. Сечение ДН неоднородной АР ( $K=77$ ) в плоскостях  $\varphi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  и  $135^\circ$ , при отклонении главного лепестка от нормали на угол  $-6^\circ$

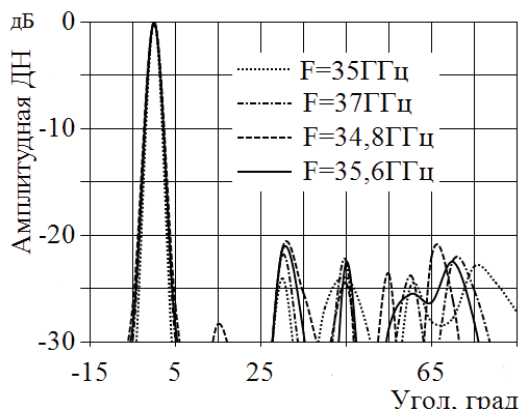


Рис. 10. ДН неоднородной АР ( $K=77$ ) в диапазоне частот  $f = 34,8 - 37$  ГГц, при отсутствии сканирования

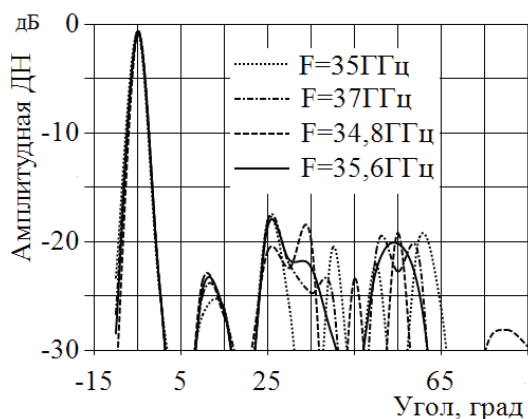


Рис. 11. ДН неоднородной АР ( $K=77$ ) в диапазоне частот  $f = 34,8 \div 37$  ГГц, при отклонении главного лепестка от нормали на  $-6^\circ$

Проведение подобных расчетов объясняется тем, что общем случае параметры АР зависят от частоты в связи с зависимостью электрических размеров излучателей от длины волны. Более того, дискретные ФВ обычно работают в режиме сброса фазы, точная установка которой возможна только на центральной частоте.

В первом случае уровень дифракционных лепестков не превышает  $-22$  дБ во всем диапазоне частот и углов. При отклонении ДН на  $-6^\circ$  от нормали, уровень

дифракционных лепестков не превышает  $-17$  дБ, а КУ уменьшается менее, чем на 1 дБ.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Впервые предложена геометрия неоднородной АР секториальных рупорных излучателей с разными размерами прямоугольных раскрытов.

2. Проведено численное моделирование излучающих свойств АР и показано, что при использовании излучателей с разными размерами раскрытов, расположенных в виде концентрических «колец», обеспечивается электронное сканирование в двух плоскостях в секторе углов  $\pm 6^\circ$ .

3. На краю сектора сканирования уровень дифракционных лепестков ДН не превышает  $-17$  дБ, а коэффициент усиления снижается не более, чем на 1 дБ.

### Литература

- [1] Скольник М. Справочник по радиолокации: пер. с англ. / Под ред. В.С. Вербы. В 2-х книгах. К.1. – М.: Техносфера, 2014. – 672 с.
- [2] Хансен Р.С. Сканирующие антенные системы СВЧ: пер. с англ. / под ред. Г.Т. Маркова и А.Ф. Чаплина. В 3-х т. Т. 2. – М.: Сов. радио, 1969. – 496 с.
- [3] В.Н. Боголюбов, А.В. Ескин, С.Б. Карбовский Управляемые ферритовые устройства СВЧ. – М.: Сов. Радио, 1972. – 72 с.
- [4] Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Д.И. Воскресенского. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.
- [5] ОАО «НИИ «Феррит-Домен». Материалы. Каталог, часть 8.
- [6] Исследование быстродействующих отражательных волноводных ферритовых фазовращателей КВЧ диапазона / Комиссарова Е.В. [и др.] // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 11. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/248297.html> (дата обращения 27.11.2011).
- [7] Комиссарова Елена Владимировна. Исследование и разработка волноводных ферритовых фарадеевских фазовращателей и элементов ФАР на их основе для коротковолновой части миллиметрового диапазона волн. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2011.
- [8] О.Г. Вендик, М.Д. Парнес. / Под редакцией Л.Д. Бахраха. Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию. 2001 г.
- [9] <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/en552743>. PIC16(L)F1784/6/7 28/40/44-Pin 8-Bit Advanced Analog Flash MCU Data Sheet.
- [10] Останков А.В., Антипов С.А., Сахаров Ю.С. Минимальный уровень бокового излучения равноамплитудной неэквидистантной антенной решетки // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9. – № 4. С. 8–11.
- [11] Melanie Mitchell. An Introduction to Genetic Algorithms. — MIT Press, 1998. — С. 167. — 226 с. — ISBN 9780262631853.
- [12] Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Генетические алгоритмы: Учебное пособие. — 2-е

изд. — М.: Физматлит, 2006. — 320 с. — ISBN 5-9221-0510-8.

- [13] Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. — М.: Наука, 1983. — 384 с.  
 [14] Моисеев Н.Н., Иванов Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. — М.: Наука, 1978. — 351 с.  
 [15] Измаилов А.Ф., Солодов М.В. Численные методы оптимизации. — М.: Физматлит, 2005. — 304 с.

Поступила в редколлегию: 11.05.2018



**Щербаков Николай Всеволодович**, кандидат технических наук, доцент ООО „Связьэнергосервис“, начальник научно – исследовательской лаборатории. Область научных интересов: синтез антенных решеток, цифровая обработка радиолокационных сигналов.



**Хлопов Григорий Иванович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник Института радиофизики и электроники НАН Украины, заведующий отделом физических основ радиолокации. Область научных интересов: теория и практика создания радиотехнических и радиолокационных систем.



**Войтович Олег Антонович**, кандидат технических наук, доцент Института радиофизики и электроники НАН Украины, старший научный сотрудник отдела физических основ радиолокации. Область научных интересов: разработка антенн и устройств СВЧ.



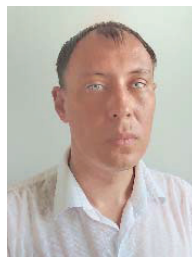
**Пехота Василий Николаевич**. ООО „Связьэнергосервис“, директор. Область научных интересов: теория и практика создания радиотехнических и радиолокационных систем, устройств СВЧ.



**Миронюк Сергей Витальевич**. Начальник сектора проектного отдела ГП КБ „Южное“. Область научных интересов: разработка специальных бортовых систем.



**Павленко Владимир Демьянович**. Главный специалист по разработкам и управлению разработками специальных бортовых систем ГП КБ КБ „Южное“. Область научных интересов: разработка специальных бортовых систем.



**Овчаров Александр Владимирович**. Начальник группы по разработкам и управлению разработками специальных бортовых систем ГП КБ КБ „Южное“. Область научных интересов: разработка специальных бортовых систем

УДК 621.396.677

Щербаков М. В. **Випромінюючі властивості неоднорідної антенної ґратки** / М. В. Щербаков, Г. І. Хлопов, О. А. Войтович, В. М. Пехота, С. В. Миронюк, В. Д. Павленко, О. В. Овчаров // Прикладна радіоелектроніка: наук. – техн. журнал. – 2018. – Том 17, № 1, 2. – С. 60–65.

Вперше запропоновано конструкцію антенної ґратки неоднорідних апертурних випромінювачів на основі секторіальних рупорних антен Ка діапазону з різними розмірами розкривів, які перевищують довжину хвилі. В результаті розв'язання оптимізаційної задачі показано, що використання випромінюючих елементів з неоднаковими прямокутними розмірами розкривів, які розташовані на апертурі антенних ґраток у вигляді концентричних «кілець», забезпечує формування вузької діаграми спрямованості та заглушення дифракційних пелюсток на межі сектора сканування до рівня  $-17$  дБ при падінні коефіцієнта підсилення антени не більше, ніж на 1 дБ. Запропонована антенна система призначена для електронного сканування променем в ортогональних площинах.

*Ключові слова:* антенні ґратки, діаграма спрямованості, дифракційна пелюстка, сектор сканування.

Лл.: 11. Бібліогр.: 15 найм.

UDC 621.396.677

Shcherbakov M. **Radiation property heterogeneous antenna array** / M. Shcherbakov, G. Khlopov, O. Voitovich, V. Pehota, S. Myroniuk, V. Pavlenko, A. Ovcharov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2018. – Vol. 17, № 1, 2. – P. 60–65.

For the first time, the construction of the antenna array of heterogeneous aperture radiators based on sectorial horn antennas of the Ka band with different aperture dimensions exceeding the wavelength has been proposed. As a result of the solution of the optimization problem, it has been shown that the use of radiating elements with unequal rectangular aperture dimensions arranged in the form of concentric «rings» on the antenna array aperture provides the formation of a narrow beam pattern and suppression of diffraction lobes at the edge of the scan sector to a level of  $-17$  dB, at the antenna gain drop being no more than 1 dB. The proposed antenna system is designed for electrical scanning with a needle-like beam in orthogonal planes.

*Keywords:* antenna array, radiation pattern, diffraction lobe, scan sector.

Fig.:11. Ref.:15 items.