

УДК 621.396.677.71

А.С. Разумихин, К.А. Лайко, Ю.О. Филимонова

Пути снижения уровня боковых лепестков в щелевых антенных решетках

Рассмотрены пути снижения уровня боковых лепестков в щелевых антенных решетках. Предложен способ снижения уровня боковых лепестков при использовании двух и более резонансных волноводно-щелевых антенных решеток. Количество антенных решеток должно быть четным и одна сдвинута относительно другой в пространстве на величину шага щели таким образом, что щели противоположного наклона оказались одна над другой, за счет этого происходит компенсация паразитной поперечной составляющей вектора E . В результате уровень боковых дифракционных лепестков уменьшается более чем на двадцать децибел.

Ключевые слова: антенная решетка, резонансная волноводно-щелевая антенная решетка, диаграмма направленности.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-15-19

Волноводно-щелевые антенные решетки (ВЩАР) широко используются в антенной технике. Их исследование и созданию посвящено довольно много работ [1–8]. К основным достоинствам этих антенн относят их плоскую форму, компактные размеры, которые позволяют использовать ВЩАР в летательных аппаратах без ухудшения их аэродинамических характеристик. ВЩАР имеют достаточно высокую эффективность, механическую прочность, а также могут работать с высокими уровнями мощности.

Конструктивные решения

Резонансная антенна имеет наклонные щели, прорезанные в узкой стенке прямоугольного металлического волновода. Конструкция ВЩАР представлена на рис. 1. Оси щелей образуют некоторый угол с направлением поперечных токов. Так как щели наклонены, то поперечные токи возбуждают в них электрическое поле. Щели прорезаны в волноводе с шагом половины длины волны в волноводе $\lambda_w/2$, поэтому сдвиг фаз токов, возбуждающих соседние щели, составляет 180° , для обеспечения синфазного раскрытия с горизонтальной поляризацией соседние щели обладают противоположным наклоном α , т.е. правая с положительным наклоном (против часовой стрелки) и левая (по часовой стрелке) щель с отрицательным наклоном α . Интенсивность возбуждения щели зависит от угла её наклона [4]. Вектор электрического поля, перпендикулярный щели, разложен на горизонтальную и вертикальную составляющие (рис. 1).



Рис. 1. Разложения вектора электрического поля на горизонтальную и вертикальную составляющие

Горизонтальные составляющие обеих щелей синфазны, вертикальные находятся в противофазе. Следовательно, излучение по нормали к раскрытию определяется только горизонтальными составляющими, а вертикальные противофазные составляющие компенсируются, но под углом примерно 50°

создают паразитные дифракционные лепестки большой величины. Данный угол 50° определяется величиной шага АР.

Для горизонтальной и вертикальной поляризации эквивалентную линейную антенную решетку (АР) можно представить в виде, изображенном на рис. 2.

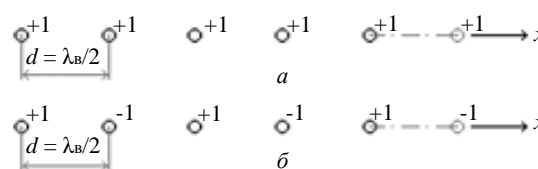


Рис. 2. Эквивалентная линейная антенная решетка: a – для горизонтальной поляризации; b – для вертикальной поляризации

Расчеты и моделирование

Проведем расчет [9] диаграммы направленности (ДН) (1, 2) ВЩАР для равномерного амплитудного распределения $A_n = 1$, выражения представлены ниже:

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d}{2} \cdot (2n-1) \sin(\theta)\right], \quad (1)$$

$$G(\theta) = \sum_{n=1}^N (-1)^n \cdot A_n \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d}{2} \cdot (2n-1) \sin(\theta)\right], \quad (2)$$

где λ – длина волны в свободном пространстве, d – расстояние между щелями (шаг АР).

Когда щели близки к углу 45° , то амплитуды для вертикальных и горизонтальных составляющих равны. Если угол отличается от 45° , то разницу в амплитудах можно учесть с помощью коэффициента a .

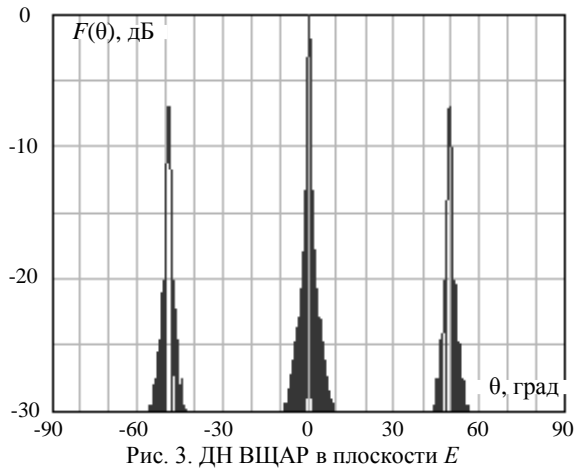
Результирующая диаграмма направленности принимает вид

$$F_{\text{resul}}(\theta) = \sqrt{[F(\theta)/N]^2 + [a \cdot G(\theta)/N]^2}, \quad (3)$$

$$F_{\text{resul}} \text{DB}(\theta) = 20 \log\{|F_{\text{resul}}(\theta)|\}, \quad (4)$$

где $F_{\text{resul}} \text{DB}(\theta)$ – результирующая ДН (3) в дБ.

Расчет проведен для ВЩАР с количеством щелей 100, с шагом $d = 19,75$ мм и на частоте 9,9 ГГц. Характеристика направленности в горизонтальной плоскости (4) представлена на рис. 3.

Рис. 3. ДН ВЩАР в плоскости E

Геометрические размеры ВЩАР представлены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические размеры ВЩАР

Параметр	Значение
Центральная частота, ГГц	9,9
Сечение волновода $a \times b$, мм	23×10
Длина волновода, м	2
Количество пар щелей	50
Угол наклона щели, градус	20...45
Шаг наклона, градус	0,5

Также проведено моделирование данной структуры ВЩАР в CST Microwave Studio [10]. Модель представлена на рис. 4.

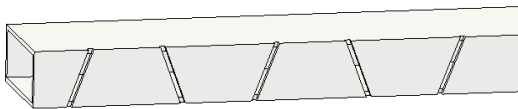
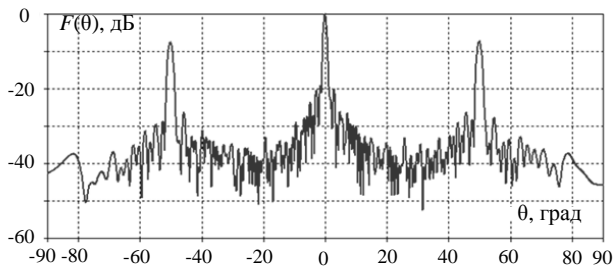


Рис. 4. Модель ВЩАР

Диаграмма направленности в плоскости E на исследуемой частоте представлена на рис. 5.

Рис. 5. ДН ВЩАР в плоскости E

Анализируя результаты моделирования антенны, можно заметить, что направление излучения луча антенны составляет 0° относительно нормали к узкой стенке волновода со щелями, ширина главного луча по уровню половинной мощности составляет 1° . Уровень боковых лепестков не более -7 дБ.

Результаты моделирования с высокой точностью совпадают с результатами расчетов. Как видно из результатов, уровень паразитных дифракционных

лепестков в обоих случаях составляет -7 дБ. И они расположены под углом 50° .

Для устранения паразитных боковых лепестков используют ряд способов. В литературе [7, 8] предлагается подавлять поляризованную поперечно волноводу составляющую поля наклонной щели с помощью таких средств, как дроссельная ловушка или разделительный металлический блок (рис. 6), помещенный между щелями.

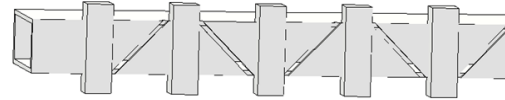


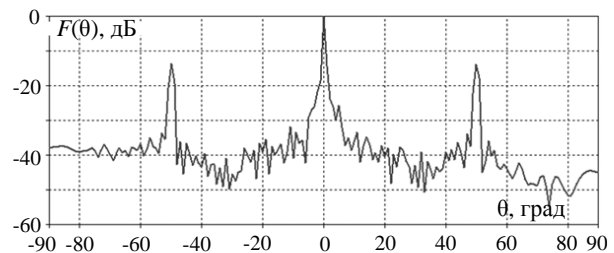
Рис. 6. Система наклонных щелей в узкой стенке волновода с металлическими разделительными блоками для подавления вертикальной поляризованной составляющей излучения

Недостаток данных подходов требует существенного усложнения конструкции ВЩАР.

Промоделируем вариант с разделительными металлическими блоками, которые расположены от края одной щели до края другой, с применением CST Microwave Studio [10].

Модель ВЩАР, построенная в CST Microwave Studio в соответствии с размерами (см. табл. 1), представлена на рис. 6.

ДН в плоскости E на частоте 9,9 ГГц изображена на рис. 7.

Рис. 7. ДН ВЩАР с металлическими разделительными блоками, в плоскости E

Анализируя результаты моделирования антенны, можно отметить, что направление излучения луча антенны составляет 0° относительно нормали к узкой стенке волновода со щелями, ширина главного луча по уровню половинной мощности составляет 1° . Уровень боковых лепестков уменьшился с -7 до $-13,5$ дБ. Однако зачастую этого недостаточно на практике.

Двумерная АР

Как правило, в радиотехнических комплексах используют двумерные АР, состоящие из нескольких линейных ВЩАР. В данном случае рассматриваемую проблему снижения уровня дифракционных боковых лепестков можно решить с использованием нескольких ВЩАР, запитанных синфазно, минимальное количество которых две, сдвинутых в горизонтальной плоскости с шагом расположения щелей, таким образом, чтобы соседние щели из смежных этажей двойной решетки обладали противоположным наклоном. Тогда правая щель верхней решетки оказывается над левой щелью нижней решетки (рис. 8).

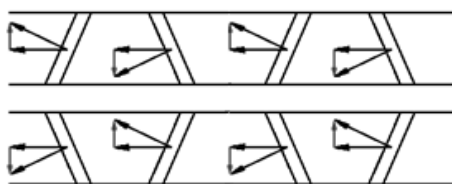


Рис. 8. Две ВЩАР, сдвинутые с шагом расположения щелей

Для расчета ДН в горизонтальной плоскости ВЩАР найдём результирующее амплитудное распределение как для горизонтальной составляющей вектора E , так и для вертикальной. Используем метод эквивалентного линейного излучателя, для чего проецируем все щели на ось x (рис. 9). Эквивалентное амплитудное распределение находим по двум поляризациям горизонтальной и паразитной вертикальной. Метод эквивалентного излучателя детально рассмотрен в литературе [1, 6, 8, 11–14]. Схема эквивалентной линейной АР представлена на рис. 9.

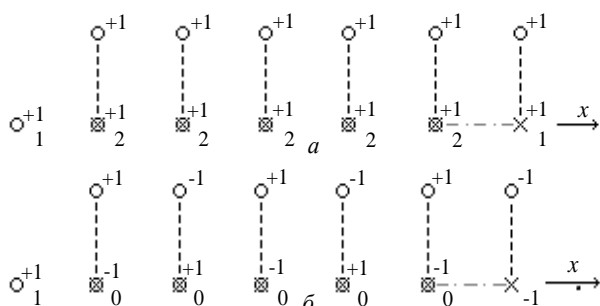


Рис. 9. Эквивалентная линейная антенная решетка: a – для горизонтальной поляризации; b – для вертикальной поляризации

Под ось x показаны эквивалентные амплитудные распределения для горизонтальной (см. рис. 9, a) и вертикальной поляризаций (см. рис. 9, b). Как видно из рис. 9, b , результирующее эквивалентное амплитудное распределение для вертикальной поляризации скомпенсировано (имеет результирующие нули) за исключением краевых эффектов двух крайних излучателей. Следовательно, паразитные дифракционные лепестки в данной схеме будут отсутствовать [13, 14].

Проведем расчет [9] по предложенной выше методике ДН двух линейных ВЩАР, смещённых с шагом d . Результаты расчета представлены на рис. 10.

Как видно, уровень дифракционных паразитных лепестков составляет менее минус 35 дБ.

Предложенная конструкция ВЩАР промоделирована с помощью CST Microwave Studio [10] (рис. 11, 12) в соответствии с рассчитанной геометрией (см. табл. 1).

Диаграмма направленности в плоскости E на частоте 9,9 ГГц представлена на рис. 12.

Анализируя результаты моделирования антенны, можно заметить, что направление излучения луча антенны составляет 0° относительно нормали к узкой стенке волновода со щелями, ширина главного луча по уровню половинной мощности составляет 1° .

Уровень боковых лепестков уменьшился с -7 до -30 дБ, что соответствует рассчитанным результатам.

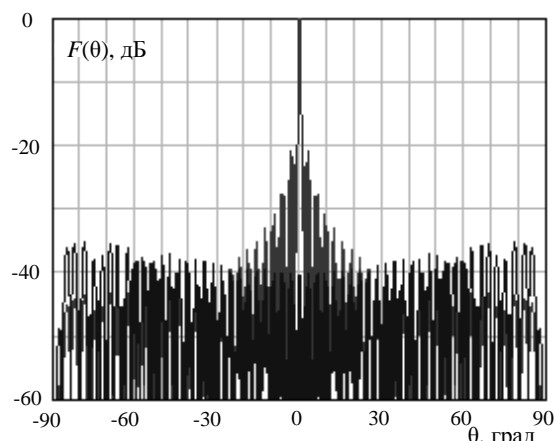


Рис. 10. Результирующая ДН в плоскости E

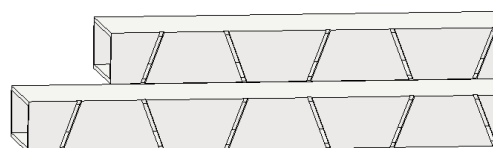


Рис. 11. Модель двойной ВЩАР

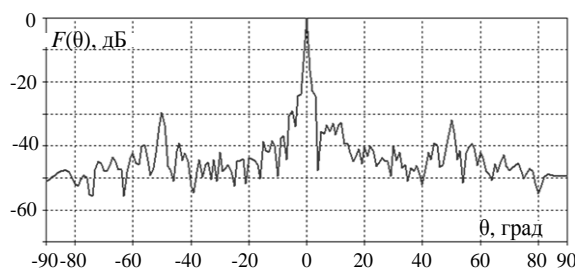


Рис. 12. ДН ВЩАР главного и паразитного лепестков в плоскости E

Результаты сравнений ВЩАР разных структур приведены в табл. 2.

Таблица 2
Сравнительные результаты ВЩАР

Вид ВЩАР	ВЩАР	ВЩАР с металл. раздел. блоками	Две ВЩАР
Уровень боковых лепестков, дБ	-7	-13,5	-30

Проанализировав полученные результаты различных структур ВЩАР, можно сделать следующий вывод:

– уровень боковых лепестков предложенным способом составляет менее -30 дБ.

Таким образом, данное конструктивное решение структуры ВЩАР позволяет существенно снизить уровень боковых лепестков и добиться наиболее лучших технических характеристик.

Заключение

Рассмотрен способ снижения паразитных дифракционных лепестков за счет конструктивного построения ВЩАР с применением двух и более линеек, расположенных одна над другой со смещением

на величину шага щелей так, чтобы правая щель располагалась над левой. При этом результирующий уровень боковых лепестков значительно снижается по сравнению с другими известными способами.

Литература

1. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1998. – 427 с.
2. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ. – Ч. 2. – М.: Связь, 1977. – 288 с.
3. Пистолькорс А.А. Антенны. – М.: Государственное изд-во по вопросам связи и радио, 1947. – 480 с.
4. Milligan T.A. *Modern Antenna design*. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. – 630 p.
5. Design and operation of an edge-wall slotted waveguide array antenna with ultralow side lobes for application of off-shore radar / Ke-Ru Chou, Han-Nien Lin, Wei-Hsien Lu, Heng-Wen Chang, Kwong-Kau Tiong // *Journal of Marine Science and Technology*. – 2015. – Vol. 23, No. 5. – P. 620–627.
6. Катрич В.А. Волноводно-щелевая решетка с наклонными щелями в узкой стенке прямоугольного волновода / В.А. Катрич, С.А. Мартыненко, С.В. Пшеничная // *Изв. высш. учеб. завед. России. Радиоэлектроника*. – 2002. – № 11-12. – С. 14–22.
7. Кюн Р. Микроволновые антенны. – Л.: Судостроение, 1967. – 518 с.
8. Марков Г.Т. Антенны / Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
9. PTC Mathcad [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathcad.com/ru/>, свободный (дата обращения: 28.11.2019).
10. CST Studio Suite [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.3ds.com/productsservices/simulia/products/cst-studio-suite/>, свободный (дата обращения: 03.12.2019).
11. Balanis C.A. *Modern antenna handbook*. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. – 1704 p.
12. Levin B. *Antenna Engineering Theory and Problems*. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 406 p.
13. Нечаев Е.Е. Излучающие раскрыты и решетки: учеб. пособие. – М.: МГТУ, 1998. – 80 с.
14. Single ridge waveguide slot incremental conductance analysis and array antenna design / Rui Xu, Jiangying Li, Dingyi Luo, Guangwei Yang // *Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, IEEE Xplore*. – 2014. – P. 143–146.
15. Teng Li. Design of an Edge Slotted Waveguide Antenna Array Based on T-Shaped Cross-Section Waveguide // *International Journal of Antennas and Propagation*. – 2017. – P. 1–8.

Разумихин Анатолий Сергеевич

Аспирант каф. конструирования и технологии электронных средств (КТПС) Новосибирского государственного технического ун-та (НГТУ) Карла Маркса пр-т., д. 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7-953-77-88-237
Эл. почта: at-te1@mail.ru

Лайко Константин Алексеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. КТПС НГТУ Карла Маркса пр-т., д. 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7-913-914-45-99
Эл. почта: play-byte@mail.ru

Филимонова Юлия Олеговна

Канд. техн. наук, доцент каф. КТПС НГТУ Карла Маркса пр-т., д. 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7-913-708-68-39
Эл. почта: jul7788@mail.ru

Razumikhin A.S., Layko K.A., Philimonova J.O.

Ways to reduce the level of side lobes in slot antenna arrays

The ways to reduce the level of side lobes in slot antenna arrays are considered. A method is proposed to reduce the level of side lobes using two or more resonant waveguide-slot antenna arrays. The number of antenna arrays must be even and one should be shifted relatively to the other in space by the size of the gap step, so that the gap of the opposite slope is one above the other, due to this, the parasitic transverse component of the vector E is compensated. As a result, the level of the side diffraction lobes decreases by several orders of magnitude.

Keywords: antenna array, resonant waveguide-slot antenna array, radiation pattern.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-15-19

References

1. Sazonov D.M. *Antenny i ustroistva SVC* [Antennas and Devices UHF]. Moscow, Graduate School Publ., 1998, 427 p. (in Russ.).
2. Aizenberg G.Z. *Anteny UKV chast 2* [VHF Antennas vol 2]. M., Svyaz Publ., 1977, 288 p. (in Russ.).
3. Pistol Kors A.A. *Antenny* [Antennas]. M., State Publishing House for Communications and Radio Communications Publ., 1947, 480 p. (in Russ.).
4. Milligan T.A., *Modern Antenna Design*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 630 p.
5. Ke-Ru Chou, Han-Nien Lin, Wei-Hsien Lu, Heng-Wen Chang, Kwong-Kau Tiong. Design and operation of an edge-wall slotted waveguide array antenna with ultralow side lobes for application of off-shore radar, *Journal of Marine Science and Technology*, 2015, vol. 23, no. 5, pp. 620–627.
6. Katrich V.A, Martynenko C.A, Pchenichnaia C.V. *Volnovodno-chelevoia rechetka s naklonnyimi cheliymi v uzkoj stenke priamougolnogo volnovoda* [Waveguide-slotted grating with inclined slots in the narrow wall of a rectangular waveguide]. News of higher educational institutions of Russia. *Radio electronics*, 2002. no. 11-12, pp. 14–22.
7. Kyun R. *Mikrovolnovyye anteny* [Microwave antennas]. Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1967, 518 p. (in Russ.).
8. Markov G.T., Sazonov D.M. *Antenny* [Antennas]. Moscow, Energiya, 1975, 528 p.
9. PTC Mathcad. Available at: <https://www.mathcad.com/ru/> (Accessed: November 28, 2019).
10. CST Studio Suite. Available at: <https://www.3ds.com/productsservices/simulia/products/cst-studio-suite/> (Accessed: December 3, 2019).
11. Balanis C.A. *Modern antenna handbook*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2008. 1704 p.
12. Levin B. *Antenna Engineering Theory and Problems*. Boca Raton, CRC Press, 2017. 406 p.
13. Nechaev E.E. *Izluchayushchiye raskryvy i reshetki: uchebnoye posobiye* [Nechaev E.E. Emitting apertures and gratings: a training manual]. Moscow, MSTU, 1998, 80 p. (in Russ.).
14. Rui Xu, Jiangying Li, Dingyi Luo, Guangwei Yang. Single ridge waveguide slot incremental conductance analysis and array antenna design *Proceedings of 3rd Asia-Pacific*

Conference on Antennas and Propagation, 2014, IEEE Xplore, China, Harbin, 2014, pp. 143–146.

15. Teng Li. Design of an Edge Slotted Waveguide Antenna Array Based on T-Shaped Cross-Section Waveguide. *International Journal of Antennas and Propagation*, China, Nanjing, 2017, pp. 1–8.

Anatoliy S. Razumikhin

Post-graduate student, Department of Design and Technology of Electronic, Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, Karl Marx pr., Novosibirsk, Russia, 630073
Phone: +7-953-77-88-237
Email: at-te1@mail.ru

Konstantin A. Layko

Candidate of Engineering Sciences, Department of Design and Technology of Electronic, NSTU
20, Karl Marx pr., Novosibirsk, Russia, 630073
Phone: +7-913-914-45-99
Email: play-byte@mail.ru

Yuliya O. Filimonova

Candidate of Engineering Sciences, Department of Design and Technology of Electronic, NSTU
20, Karl Marx pr., Novosibirsk, Russia, 630073
Phone: +7-913-708-68-39
Email: jul7788@mail.ru