

УДК 621.317.2 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.9.1.79.84

## Исследование ширины провалов в верхнем и нижнем полупространствах диаграммы направленности АФАР

**О. А. Курдюмов**, к. ф.-м. н., доцент, [kurdyumov\\_oa@orkkniikp.ru](mailto:kurdyumov_oa@orkkniikp.ru)  
Филиал АО «ОРКК»–«НИИ КП», Москва, Российская Федерация

**В. Е. Сагач**, [sagach\\_ve@orkkniikp.ru](mailto:sagach_ve@orkkniikp.ru)  
Филиал АО «ОРКК»–«НИИ КП», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** В статье методами электродинамического анализа исследованы решетки из двух и трех микрополосковых излучателей эллиптической поляризации. Получены формулы для определения поправок к амплитудам и фазам элементов решетки, обеспечивающих наличие провалов в результирующей диаграмме направленности. Исследована зависимость ширины провала вблизи нуля диаграммы направленности от количества элементов в решетке, ее шага и конструкции. Показано, что при фиксированной глубине провала, превышающей минус 100 дБ, его ширина незначительно зависит от типа решетки и ориентации провала в верхней или нижней полусфере диаграммы. Вместе с тем при различной глубине провала его ширина может значительно меняться и зависит от точности соблюдения амплитудно-фазовых соотношений, обеспечивающих нули диаграммы направленности.

**Ключевые слова:** фазированная решетка, нуль диаграммы направленности, ширина провала

## Investigation of the Width of the Dips in the Upper and Lower Half-Spaces of the АРАА Radiation Pattern

**O. A. Kurdyumov**, *Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof.*, [kurdyumov\\_oa@orkkniikp.ru](mailto:kurdyumov_oa@orkkniikp.ru)  
Branch of JSC “ORKK”–“NII KP”, Moscow, Russian Federation

**V. E. Sagach**, [sagach\\_ve@orkkniikp.ru](mailto:sagach_ve@orkkniikp.ru)  
Branch of JSC “ORKK”–“NII KP”, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** In the article, arrays of two and three microstrip emitters of elliptical polarization are studied by the methods of electrodynamic analysis. Formulas are obtained for determining the corrections to the amplitudes and phases of the array elements, which ensure the presence of dips in the resulting radiation pattern. The dependence of the width of the dip near zero of the radiation pattern on the number of elements in the array, its pitch, and design has been studied. It is shown that at a fixed dip depth exceeding minus 100 dB, its width slightly depends on the array type and dip orientation in the upper or lower hemisphere of the diagram. At the same time, at different depths of the dip, its width can vary significantly and depends on the accuracy of compliance with the amplitude-phase relationships that provide zeros of the radiation pattern.

**Keywords:** phased array, zero of the radiation pattern, dip width

## Введение

Использование многоэлементных антенных решеток в течение длительного времени является одним из основных методов повышения эффективности приема сигналов при наличии помех. В обычных системах отношение сигнал–шум уменьшается в связи с присутствием, наряду с полезным сигналом, нежелательных сигналов, поступающих на вход приемника по боковым или главному лепестку диаграммы направленности антенны (ДН) [1].

Эти нежелательные сигналы могут создаваться передатчиками помех, эффектами многолучевого распространения и другими источниками шума. Системы с адаптивными решетками позволяют повысить эффективность приема полезных сигналов при наличии указанных помех в радионавигации [2]. Возможность подавления помехи адаптивными решетками определяется возможностью формирования нуля диаграммы направленности в направлении на ее источник.

Помехоустойчивость современных навигационных приемников обычно составляет  $\sim 40$  дБ. Мощность помехи может превышать чувствительность приемников на  $\sim 90$  дБ [3]. Поэтому от системы АФАР требуется дополнительное подавление помехи на величину  $\sim 50$  дБ.

Для спутниковых навигаторов с АФАР, установленных на подвижных носителях, ширина провала имеет первостепенное значение. При угловых колебаниях носителя подстройка направления на помеху может быть невозможна из-за инерционности цифрового устройства. Поэтому представляет интерес исследовать ширину провалов вблизи нулей ДН на уровне минус 50 дБ.

Традиционно адаптивные решетки использовались для подавления помех в верхнем полупространстве ДН АФАР. На подвижных объектах зачастую полезные сигналы приходят из верхнего полупространства ДН, а помеховые сигналы — из нижнего полупространства АФАР. Кроме того, практически не исследовалась зависимость ширины провалов в ДН от шага решетки и ее конструкции [4].

В настоящей статье методами электродинамического анализа исследованы решетки из двух и трех микрополосковых излучателей эллиптической поляризации. На основании этого исследо-

вания сделаны выводы о свойствах адаптивных решеток излучателей с эллиптической поляризацией.

## Решетка из двух излучателей

На рис. 1 изображена исследуемая модель решетки из двух микрополосковых излучателей. Они расположены на круглом металлическом экране диаметром 200 мм. Излучателями являются металлические пластины, помещенные на диэлектрические подложки из материала с диэлектрической проницаемостью 9,6. Размеры дисков: диаметр 42 мм, высота подложек 6 мм. Размеры и форма излучающей пластины выбраны таким образом, чтобы обеспечить возбуждение двух ортогональных резонирующих колебаний на частоте 1,6 ГГц. Сдвиг резонансных частот между двумя колебаниями вызывает фазовый сдвиг между ними, равный  $\sim 90^\circ$ , необходимый для возбуждения результирующей эллиптической поляризации. Эти антенны используются для приема сигналов ГНСС на частотах диапазона L1.

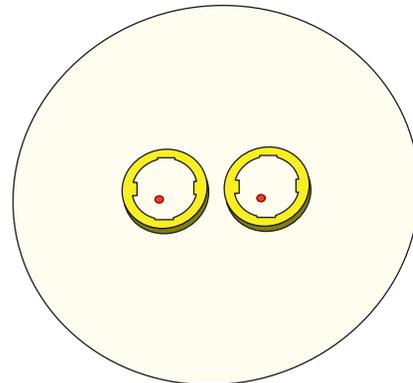


Рис. 1. Модель решетки из двух микрополосковых излучателей

Электродинамический анализ этой модели позволяет получить ДН правой и левой поляризации каждого из излучателей.

В силу несимметрии системы несимметричны оказываются диаграммы направленности излучателей. При этом чем ближе друг к другу расположены элементы, тем сильнее искажаются ДН. На рис. 2 изображены их ДН для правой поляризации при расстоянии между центрами излучателей 50 мм.

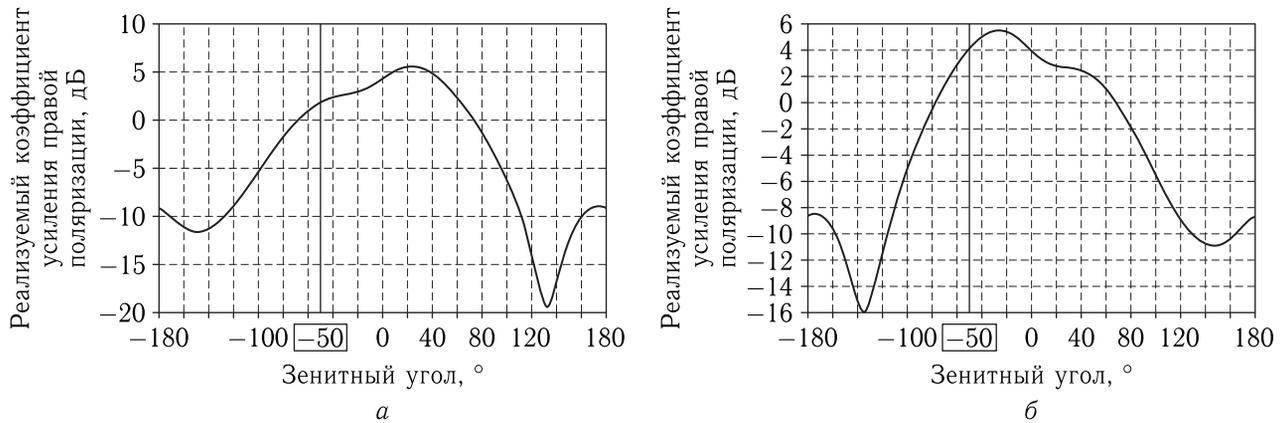


Рис. 2. Зенитные диаграммы направленности двух излучателей: а) левый, б) правый

На вход приемника поступают результирующие сигналы излучателей — неполяризованные. Для образования нуля ДН неполяризованного излучения необходимо проанализировать амплитуды и фазы сигналов обоих излучателей в выбранном направлении ДН и выбрать необходимые поправки к этим амплитудам и фазам.

Обозначим амплитуды и фазы правой и левой поляризаций двух элементов AR1, AL1, AR2, AL2 и FR1, FL1, FR2, FL2 соответственно. Тогда абсолютные значения (неполяризованные) амплитуд и фаз сигналов определяются формулами:

$$E_i = \sqrt{AR_i^2 + AL_i^2 + 2AR_iAL_i \cos(FR_i - FL_i)}, \quad (1)$$

$$F_i = \tan^{-1} \frac{AR_i \sin FR_i + AL_i \sin FL_i}{AR_i \cos FR_i + AL_i \cos FL_i}, \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

где  $i$  — номер излучателя.

Чтобы получить провал в выбранном направлении, потребуем:

$$\begin{aligned} E_1 \sin F_1 + E_2 K_2 \sin(F_2 + \Delta F_2) &= 0, \\ E_1 \cos F_1 + E_2 K_2 \cos(F_2 + \Delta F_2) &= 0. \end{aligned}$$

Отсюда получаем поправки к амплитуде и фазе излучателя 2:

$$K_2 = \frac{E_1}{E_2}, \quad \Delta F_2 = F_1 - F_2. \quad (3)$$

На рис. 3 приведены ДН вблизи провала решетки, изображенной на рис. 1, для которой условия (3) выполняются для зенитного угла  $\theta = 50^\circ$

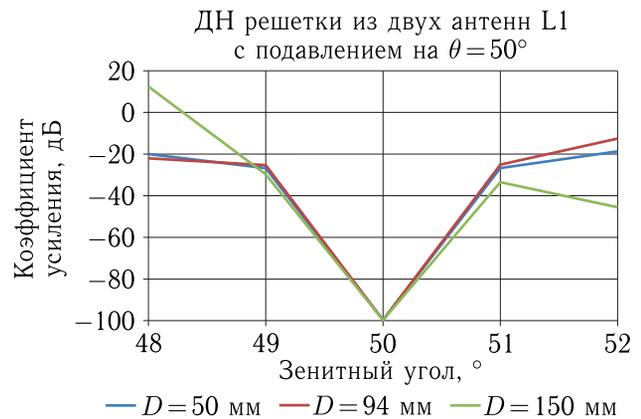


Рис. 3. ДН решетки из двух излучателей вблизи провала при  $\theta = 50^\circ$

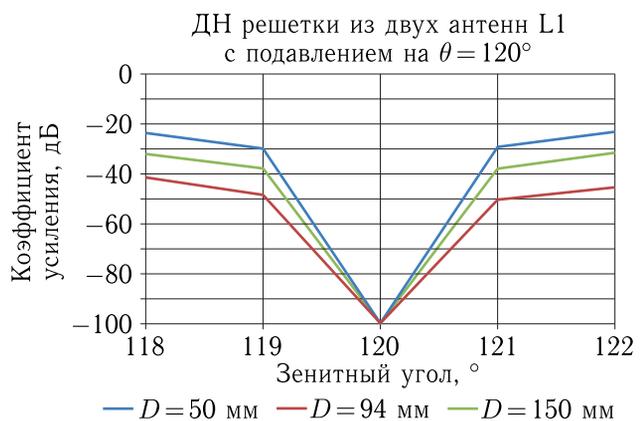


Рис. 4. ДН решетки из двух излучателей вблизи провала при  $\theta = 120^\circ$

для трех значений диаметра экрана:  $D = 50, 94, 150$  мм, а на рис. 4 — аналогичные ДН для угла в нижней полусфере  $\theta = 120^\circ$ . Глубина провала

определяется тем, насколько точно выполняются соотношения (3) в точке нуля. Амплитудно-фазовые соотношения в обоих случаях подобраны так, чтобы глубина нуля ДН была близка к 100 дБ. При меньшей глубине нуля ширина провала на уровне минус 50 дБ может существенно зависеть от глубины нуля.

Из этих рисунков видно, что шагу решетки, равному половине длины волны (94 мм), в верхней полусфере соответствует самый узкий провал, а в нижней полусфере — самый широкий.

Сравнивая диаграммы рис. 3 и 4, можно прийти к выводу, что в нижней полусфере ширина провала по уровню минус 50 дБ составляет  $2^\circ$ , что почти в два раза больше, чем в верхней полусфере ( $1,3^\circ$ ).

## Решетка из трех излучателей, расположенных по кругу

Модель решетки из трех микрополосковых излучателей, расположенных по кругу, показана на рис. 5.

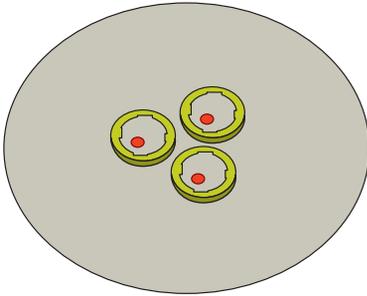


Рис. 5. Модель решетки из трех микрополосковых излучателей, расположенных по кругу

Чтобы получить поправки к амплитудам и фазам, обеспечивающие нули на двух углах, необходимо решить систему уравнений:

$$E_{1j} \sin F_{1j} + K_2 E_{2j} \sin(F_{2j} + \Delta F_2) + K_3 E_{3j} \sin(F_{3j} + \Delta F_3) = 0, \quad (4)$$

$$E_{1j} \cos F_{1j} + K_2 E_{2j} \cos(F_{2j} + \Delta F_2) + K_3 E_{3j} \cos(F_{3j} + \Delta F_3) = 0, \quad (5)$$

где  $j = 1, 2$  — номер угла, при котором обеспечивается нуль ДН, а  $K_i$  и  $\Delta F_i$  — поправки к амплитуде и фазе  $i$ -го излучателя.

Решение этой системы уравнений относительно  $K_2$ ,  $\Delta F_2$ ,  $K_3$ ,  $\Delta F_3$  приводит к следующим результатам:

$$K_2 = \frac{E_{11} \sin(F_{11} - F_{31} - \Delta F_3)}{E_{21} \sin(F_{31} - F_{21} + \Delta F_3 - \Delta F_2)}, \quad (6)$$

$$K_3 = \frac{E_{11} \sin(F_{21} - F_{11} + \Delta F_2)}{E_{31} \sin(F_{31} - F_{21} + \Delta F_3 - \Delta F_2)}, \quad (7)$$

$$\Delta F_2 = \tan^{-1} \frac{\sin(F_{11} - F_{21}) - A \sin(F_{12} - F_{22})}{\cos(F_{11} - F_{21}) - A \cos(F_{12} - F_{22})}, \quad (8)$$

$$\Delta F_3 = \tan^{-1} \frac{\sin(F_{11} - F_{31}) - B \sin(F_{12} - F_{32})}{\cos(F_{11} - F_{31}) - B \cos(F_{12} - F_{32})}. \quad (9)$$

Здесь

$$A = \frac{E_{12} E_{31} \sin(F_{31} - F_{21} + \Delta F_3 - \Delta F_2)}{E_{11} E_{32} \sin(F_{32} - F_{22} + \Delta F_3 - \Delta F_2)},$$

$$B = \frac{E_{12} E_{21} \sin(F_{31} - F_{21} + \Delta F_3 - \Delta F_2)}{E_{11} E_{22} \sin(F_{32} - F_{22} + \Delta F_3 - \Delta F_2)},$$

а разность поправок  $\Delta F_3 - \Delta F_2$  должна быть найдена из трансцендентного уравнения

$$\Delta F_3 - \Delta F_2 = \frac{\tan \Delta F_3 - \tan \Delta F_2}{1 + \tan \Delta F_3 \tan \Delta F_2}.$$

Проведено решение системы уравнений (6)–(9) для получения нулей на зенитных углах  $50^\circ$  и  $120^\circ$  и построены соответствующие ДН. На рис. 6 и 7 показаны участки этих диаграмм вблизи провалов для нескольких шагов решетки.

Сравнивая эти диаграммы с соответствующими диаграммами решетки из двух элементов, видим противоположные результаты: полуволновый

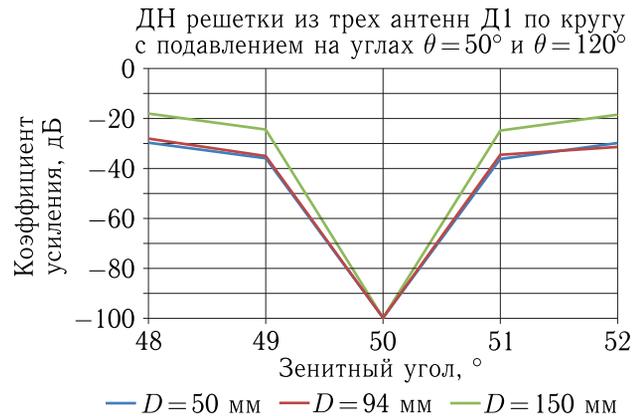


Рис. 6. ДН решетки из трех излучателей, расположенных по кругу, вблизи провала при  $\theta = 50^\circ$

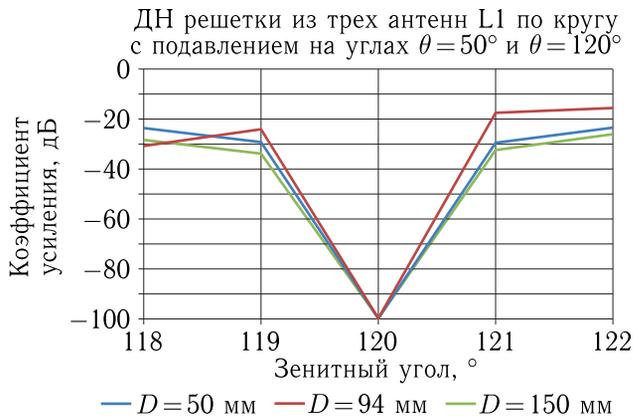


Рис. 7. ДН решетки из трех излучателей, расположенных по кругу, вблизи провала при  $\theta = 120^\circ$

шаг между излучателями для угла  $50^\circ$  соответствует самому широкому провалу, а для угла  $120^\circ$  — самому узкому.

Из диаграмм рис. 6 и 7 видно, что в случае решетки из трех элементов, расположенных по кругу, ширина провала по уровню минус 50 дБ и в верхней и нижней полусферах составляет  $\sim 1,3^\circ$ .

### Решетка из трех излучателей, расположенных линейно

В ряде случаев расположение элементов решетки по кругу неудобно или невозможно, поэтому рассмотрим случай линейного расположения элементов. Модель решетки из трех микрополосковых излучателей, расположенных линейно, показана на рис. 8.

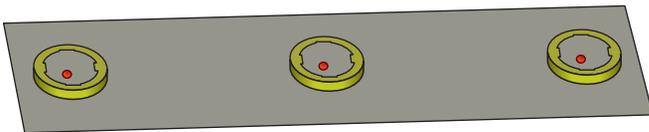


Рис. 8. Модель решетки из трех микрополосковых излучателей, расположенных линейно

Система уравнений (6)–(9) была решена для углов нулей  $50^\circ$  и  $120^\circ$ . Результаты приведены на рис. 9 и 10.

В отличие от предыдущего случая полуволновому расстоянию между излучателями соответствует самый широкий провал для углов как в верхней полусфере, так и в нижней полусфере ДН.

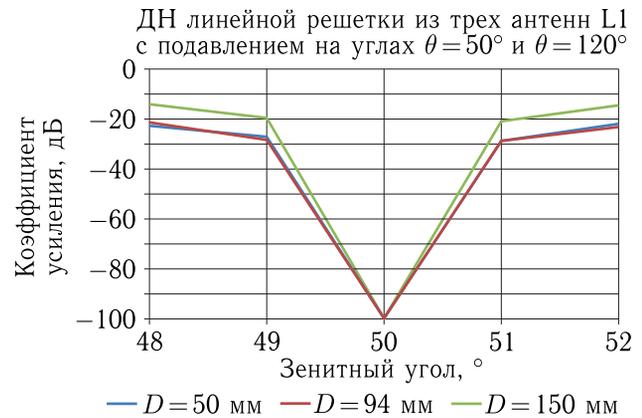


Рис. 9. ДН решетки из трех излучателей, расположенных линейно, вблизи провала при  $\theta = 50^\circ$

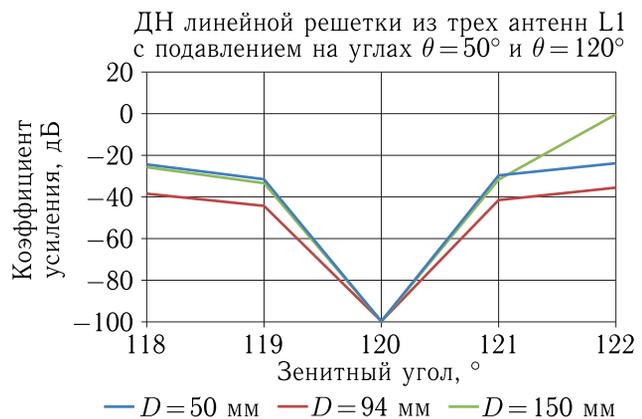


Рис. 10. ДН решетки из трех излучателей, расположенных линейно, вблизи провала при  $\theta = 120^\circ$

Ширина провала на уровне минус 50 дБ составляет в верхней полусфере  $\sim 1,4^\circ$ , а в нижней полусфере —  $\sim 1,8^\circ$ .

Полученные результаты позволяют сделать выводы, которые приведены в табл. 1. Ширина провала по уровню минус 50 дБ для рассмотренных решеток показана в табл. 2.

Подведем итог проведенным исследованиям: при фиксированной глубине провала (100 дБ) ширина провала слабо зависит от типа решетки и ориентации провала в верхней или нижней полусфере ДН. Вместе с тем при различной глубине провала его ширина может значительно меняться, так что все зависит от точности соблюдения амплитудно-фазовых соотношений, обеспечивающих нули ДН. Ширина провала на уровне минус 50 дБ

Таблица 1. Зависимость ширины провалов от типа решетки и от ориентации провала в верхней и нижней полусферах ДН для полуволнового шага решетки

Тип решетки	Зенитный угол провала 50°	Зенитный угол провала 120°
2 элемента	Самый узкий	Самый широкий
3 элемента по кругу	Самый широкий	Самый узкий
3 элемента линейно	Самый широкий	Самый широкий

Таблица 2. Ширина провала по уровню минус 50 дБ

Тип решетки	Верхняя полусфера	Нижняя полусфера
2 элемента	1,3°	2°
3 элемента по кругу	1,3°	1,3°
3 элемента линейно	1,4°	1,8°

при глубине нуля минус 100 дБ в большинстве рассмотренных вариантов в нижней полусфере больше, чем в верхней полусфере.

## Список литературы

1. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки. М.: Радио и связь, 1986. С. 9–10.
2. Гусева В. А., Баранов С. А. Исследование антенных решеток. Особенности адаптивных антенных решеток для систем подвижной связи // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. 2016. № 1. С. 86–89.
3. Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д., Мошкина Т. Г. Потенциальная помехоустойчивость навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2012. С. 1–8.
4. Проектирование фазированных антенных решеток. Под редакцией д. т. н., проф. Д. И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2003. 744 с.