

УДК 621.396.677

## ВЛИЯНИЕ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОГРАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Д.В. МОСКАЛЕВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 10 октября 2011

Исследуется влияние выхода из строя излучающих элементов на характеристики многогранных антенных решеток. Под излучающими элементами понимается отдельный излучатель или фрагмент решетки в виде прямоугольной подрешетки. Выход из строя излучателей – это его отказ, т.е. возбуждение с нулевой амплитудой или с фазой, отличающейся от нужной на  $180^\circ$ . Отказавшие элементы могут быть разбросаны на поверхности решетки по случайному закону.

*Ключевые слова:* многогранная антенная решетка, выход из строя элементов, численное моделирование.

### Введение

Исследованию влияния отказов излучающих элементов в решетках посвящен ряд работ, например [1–5]. В отличие от известных работ в настоящей статье анализ влияния отказавших элементов на характеристики решетки производится численно без наложения каких-либо ограничений на число излучателей в решетке и характер расположения отказавших излучателей на раскрыте решетки – равномерно или в виде компактных групп. Влияние отказов элементов оценивается при различных амплитудных распределениях возбуждения излучателей в решетке.

### Методика теоретического анализа

Для выполнения расчетов параметров многоугольной антенной решетки (МАР) разработана программа моделирования. Программа позволяет рассчитывать диаграмму направленности (ДН) и ее параметры. ДН вычисляется с помощью следующего выражения

$$U = \sum_{n=1}^{n=M} ARn \cdot F_n(\theta) \cdot \exp[j(Phi_n(\theta_m) - Phi_n(\theta))], \quad (1)$$

где  $M$  – количество активных (возбуждаемых в режиме передачи) излучателей,  $ARn$  – нормированная амплитуда возбуждения  $n$ -го излучателя,  $F_n(\theta)$  – нормированная ДН излучателя,  $j$  – мнимая единица. От каждого активного излучателя геометрическая длина пути до точки в дальней зоне различная. Эту разницу в фазовых набегах для каждого излучателя учитывает коэффициент  $Phi_n(\theta) = Rn(\theta) / \lambda \cdot 2\pi$ , где  $Rn(\theta)$  – расстояние от  $n$ -го излучателя до точки в дальней зоне,  $\lambda$  – длина волны,  $\theta$  – угол наблюдения,  $\theta_m$  – направление главного максимума. Из (1) видно, что в направлении главного максимума колебания излучателей складываются синфазно.

При моделировании диаграммы направленности и ее параметров использовалось комбинированное, спадающее к краям решетки амплитудное распределение типа косинус в степени  $p$  на «подставке»  $\Delta$  [6].

Фазовое распределение возбуждения излучателей выбиралось исходя из условия фокусировки луча в направлении излучения. Сетка расположения излучателей – прямоугольная. В качестве излучателя используется гипотетический излучатель с задаваемой шириной главного лепестка ДН.

КНД решетки (далее обозначается символом  $D$ ) определялся с помощью известного выражения [4, 5]:

$$D = \frac{4\pi}{\int_0^\pi \int_0^{2\pi} F^2(\theta, \varphi) \sin \theta \cdot d\varphi \cdot d\theta}, \quad (2)$$

где  $F(\theta, \varphi)$  – нормированная ДН решетки.

Многоугольная решетка состоит из  $M_x$  столбцов модулей и  $M_y$  строк модулей. Причем каждый столбец из модулей является отдельной гранью. Каждая грань имеет отличную от других ориентацию в пространстве.

Число отказавших излучателей задается в % от общего числа излучателей. Распределение таких излучателей по раскрытию случайное, закон распределения – равномерный. На рис. 1 для примера показаны раскрыт решетки со всеми исправными излучателями и раскрыт с 30% излучателей вышедших из строя. Дефектные излучатели на рисунках отсутствуют, исправные излучатели обозначены кружками.

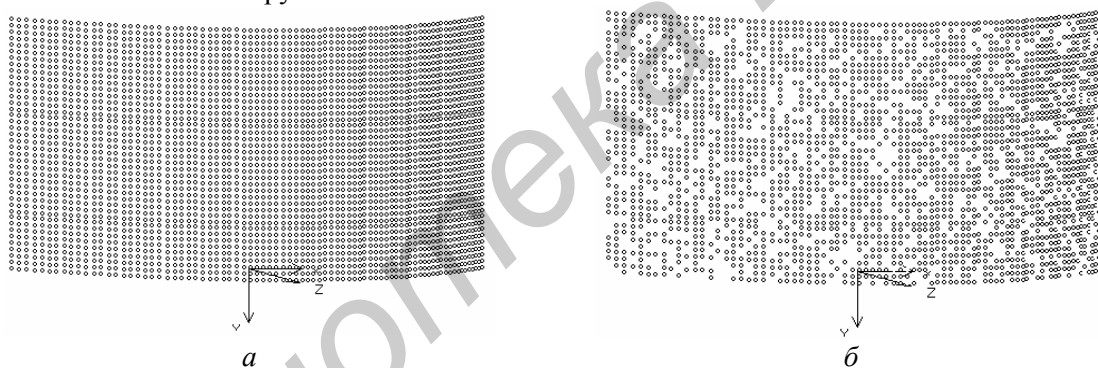


Рис. 1. Раскрыт многоугольной решетки: все излучатели исправны (а); 30 % излучателей дефектные (б)

Рис. 2 иллюстрирует случай выхода из строя излучателей в виде компактных групп (модулей). Такая ситуация может возникнуть в решетке с модульным построением. Каждый модуль – это прямоугольная подрешетка с числом излучателей по оси  $X$  –  $N_x$ , по оси  $Y$  –  $N_y$ . На рис. 2 показана многоугольная решетка, состоящая из 50 модулей. Каждый модуль имеет  $N_x = N_y = 8$  излучателей. Число отказавших модулей  $M_m = 10$ . Рис. 2 иллюстрируют выход из строя модулей, расположенных периодически (а) и беспорядочно (б).

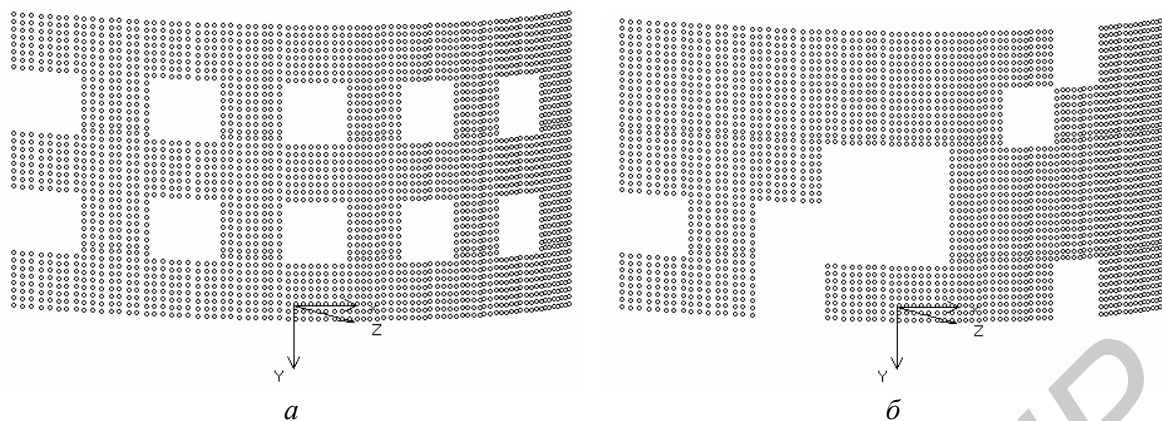


Рис. 2. Решетка с модульным построением: дефектные модули расположены периодически (а) и беспорядочно (б)

### Результаты численного моделирования

#### 1. Влияние отказов отдельных излучателей.

Далее рассматриваются зависимости параметров ДН от числа отказавших излучателей  $Nd$ : изменение ширины главного лепестка диаграммы направленности  $-2\theta_{0,5}$ , изменение уровня первого бокового лепестка  $-F_{mb}$  и изменение коэффициента направленного действия (КНД)  $-D$ .

Для примера расчеты приведены для следующих параметров решетки: число модулей  $M_x = 10$ ,  $M_y = 5$ . Расстояние между соседними излучателями по осям  $X$ ,  $Y$  одинаковое и равно  $D_x = D_y = 0,55\lambda$ . В этом случае обеспечивается условие единственности главного максимума ДН при фазовом сканировании в секторе углов  $\pm 40^\circ$ . Угловой размер одной грани равен  $6,30^\circ$ , радиус цилиндра решетки равен  $40\lambda$ .

Чтобы отразить основные закономерности, существующие в МАР при отказе элементов, достаточно рассмотреть параметры ДН в плоскости  $XZ$ . Далее приведенные параметры для ДН относятся именно к этой плоскости. Параметры амплитудного распределения в многоугольной антенной решетке  $\Delta_x = 0,3$ ;  $\Delta_y = 1$ ;  $P_x = P_y = 1$ . При таком АФР и при отсутствии дефектных излучателей и модулей обеспечивается ширина главного лепестка  $2\theta_{0,5} = 1,45^\circ$ ; максимальный боковой лепесток  $F_{bm} = -20,03$  дБ.

Решетка со случайно расположенными излучателями с нулевой амплитудой по своим геометрическим свойствам близка к неэквидистантной решетке со случайно расположенными излучателями. В такой решетке, как известно, ширина главного лепестка зависит от волновых размеров апертуры, которая не меняется с изменением числа отказавших излучателей  $Nd$ . Поэтому теоретически  $2\theta_{0,5}$  должен слабо изменяться в зависимости от числа отказавших излучателей. Численное моделирование полностью это подтвердило. Но с ростом  $Nd$  существенно меняется ДН в области боковых лепестков. На рис. 3 показана ДН решетки с рассматриваемыми параметрами при  $Nd=0$  и  $Nd=70\%$ . Как видно, боковые лепестки существенно возрастают и теряют регулярный характер, а главный лепесток практически неизменен. Зависимости уровня боковых лепестков (УБЛ) и величины уменьшения КНД ( $dD$ ) от числа отказавших излучателей с нулевой амплитудой показаны на рис. 4. Колебательный характер кривой УБЛ связан с тем, что значения уровня боковых лепестков определялись не по средней ДН, а по ДН, соответствующей одной из реализаций распределения отказавших излучателей на раскрытие решетки. Тип отказов, при котором амплитуды дефектных излучателей обнуляются, далее будет называться первым типом отказов.

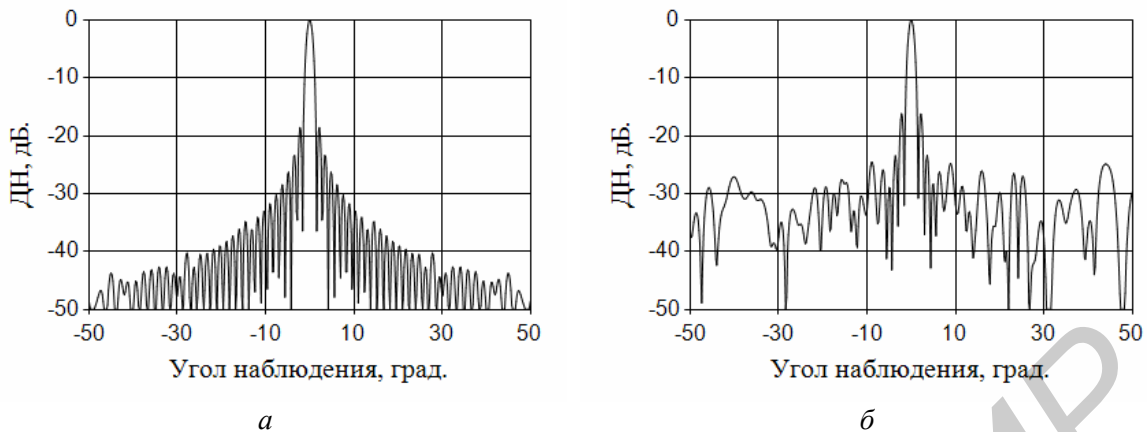


Рис. 3. Диаграммы направленности решетки: *a* –  $Nd=0$ ; *б* –  $Nd=70\%$

Из рис. 4 следует, что уровень максимального бокового лепестка слабо зависит от  $Nd$ , а КНД уменьшается из-за роста среднеарифметического УБЛ. В антенной решетке могут существовать отказы излучателей второго типа в виде изменения фазы возбуждения на  $180^\circ$ .

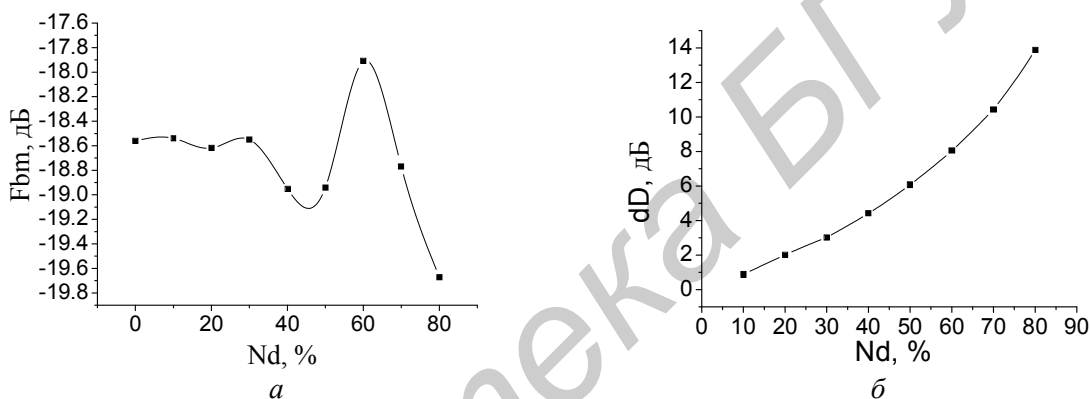


Рис. 4. Зависимость  $F_{bm}$  и  $dD$  от числа отказавших излучателей: максимальный УБЛ ( $F_{bm}$ ) (*a*); уменьшение КНД ( $dD$ ) (*б*)

Для иллюстрации на рис. 5, *a, б* приведены ДН для  $Nd = 30\%$  и  $Nd = 70\%$ , показывающие влияние этих отказов. Рис. 5 показывает, что с ростом  $Nd$ , уровень боковых лепестков вдали от главного максимума существенно возрастает и перестает носить регулярный характер. Так как уровень бокового излучения возрастает во всем диапазоне углов, отказы второго типа приводят к более существенному уменьшению КНД, чем отказы первого типа. Пример: при  $Nd = 30\%$  отказ первого типа приводит к уменьшению КНД на 1,6 дБ, а отказ второго типа к уменьшению КНД на 7,7 дБ.

Интересный эффект наблюдается при отказах второго типа, когда  $Nd$  стремится к 50%. Рис. 5, *в, г* демонстрирует ДН при  $Nd = 40\%$  и 50%. Заметно, что уже при  $Nd = 40\%$  резко возрастает уровень бокового излучения во всем диапазоне углов, а при  $Nd = 50\%$  главный максимум перестает существовать, ДН «разваливается». Такое поведение ДН физически легко объяснить.

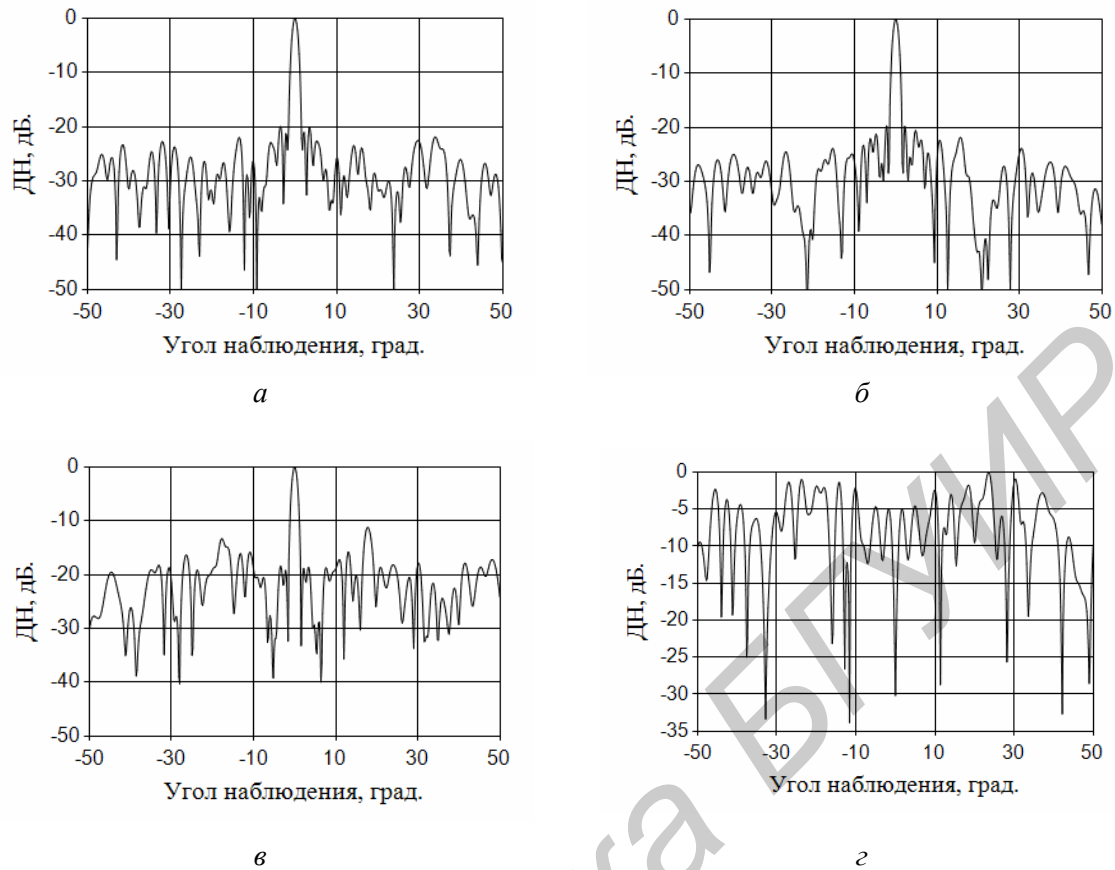


Рис. 5. ДН решетки при  $\Delta\varphi=180$ : а –  $Nd = 30\%$ ; б –  $Nd = 70\%$ ; в –  $Nd = 40\%$ ; г –  $Nd = 50\%$

Степень влияния числа отказавших излучателей на уровень боковых лепестков зависит от исходного уровня боковых лепестков, т.е. от амплитудного распределения возбуждения излучателей решетки. Чем меньше исходный УБЛ при отсутствии отказов, тем сильнее возрастет УБЛ с ростом  $Nd$ . Для иллюстрации на рис.6 показаны ДН при  $Nd=50\%$  при двух значениях  $F_{bm}$  – максимального УБЛ при отсутствии отказов ( $Nd=0$ ): рис. 6,а –  $F_{bm} = -20$  дБ и рис. 6,б –  $F_{bm} = -32$  дБ. В первом случае отказы излучателей привели к росту УБЛ на 1 дБ, во втором случае – на 8 дБ.

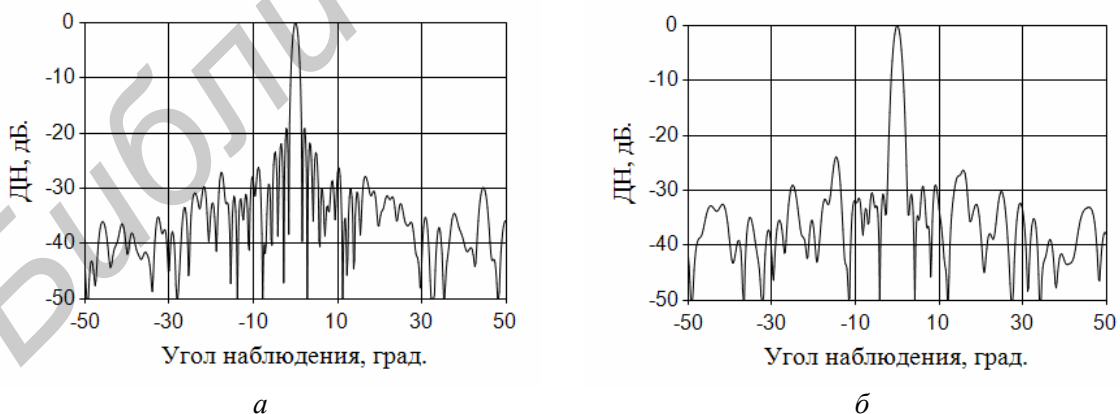


Рис. 6. ДН решетки при отказах излучателей и различном исходном УБЛ: а –  $F_{bm} = -19$  дБ при  $Nd = 50\%$  ( $F_{bm} = -20$  дБ при  $Nd = 0$ ); б –  $F_{bm} = -24$  дБ  $Nd = 50\%$  ( $F_{bm} = -32$  дБ при  $Nd=0$ )

## 2. Влияние отказов модулей.

Характер изменения ДН решетки с модульным построением при изменении числа отказавших модулей и типа отказа зависит от характера расположения отказавших модулей на раскрыве решетки. На рис. 7 приведены ДН решетки, показанной на рис. 2, с параметрами: число

модулей в строках и в столбцах решетки  $M_x=10$ ,  $M_y=5$ ; число излучателей в одном модуле  $N_x=N_y=8$ ; число отказавших модулей  $M_m=10$ . Амплитудное распределение возбуждения излучателей в решетке равномерное: рис. 7,а – расположение отказавших модулей на раскрыве периодическое, рис. 7,б – расположение отказавших модулей на раскрыве случайное. В отказавших модулях амплитуда возбуждения излучателей равна нулю.

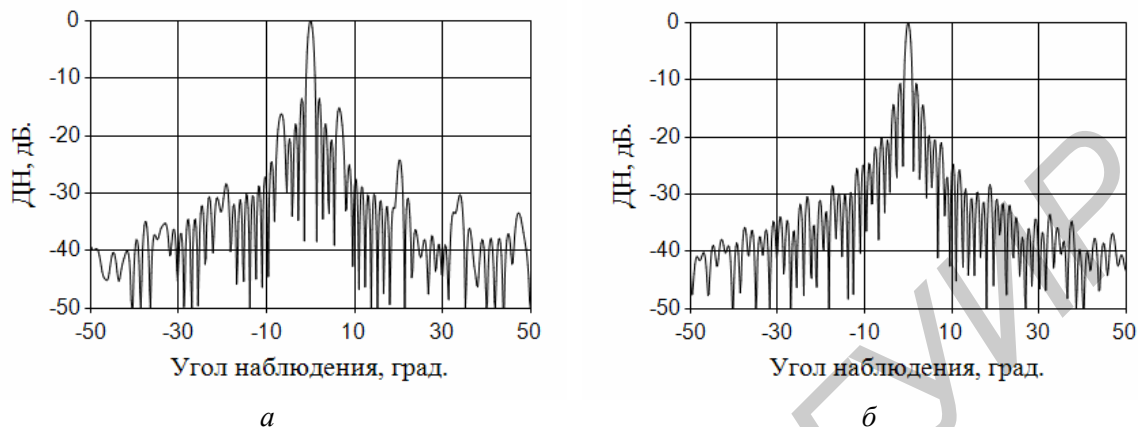


Рис. 7. ДН решетки с отказавшими модулями (первый тип отказов)

Как видно, в первом случае существенно возрастают отдельные боковые лепестки, расположенные в пространстве периодически. Это обстоятельство может быть использовано для оценки характера расположения отказавших модулей.

Отказ второго типа ( $\Delta\varphi=180^\circ$ ) влияет сильнее на изменение ДН, меняется также характер проявления на структуре боковых лепестков. Рис. 8 иллюстрирует сказанное. На нем показаны ДН той же решетки, что и на рис. 7, и для тех же случаев.

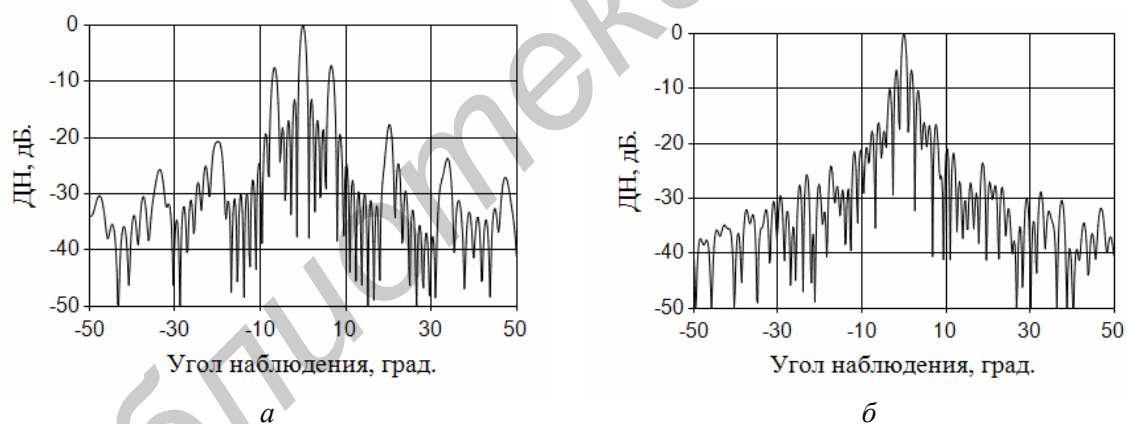


Рис. 8. ДН решетки с отказавшими модулями (второй тип отказов)

Степень влияния отказавших модулей существенно сильнее, чем влияние отказавших излучателей. Так, в решетке с прямоугольным раскрывом при исходном максимальном УБЛ, равном  $-25$  дБ, отказ первого типа 20% случайно расположенных по раскрыву излучателей приводит к росту боковых лепестков до  $-24$  дБ, а отказ 20% излучателей в составе модулей приводит к росту боковых лепестков до  $-19$  дБ. Для этих двух случаев и отказах первого типа ДН показаны на рис. 9.

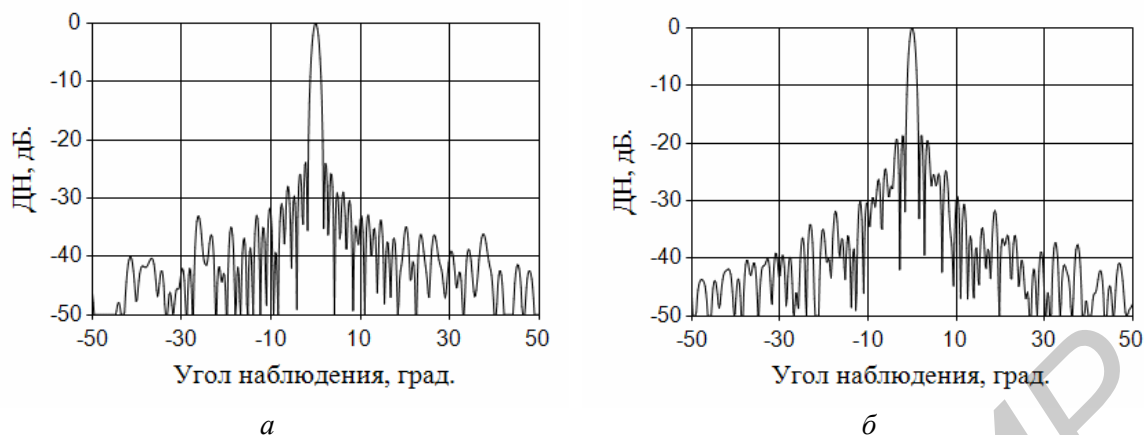


Рис. 9. Влияние отказавших излучателей (а) и модулей (б) на ДН плоской решетки

Качественные зависимости степени влияния числа отказавших модулей ( $M_m$ ) на ДН и КНД решетки такие же, как и при отказах отдельных излучателей: чем больше  $M_m$ , тем больше боковые лепестки ДН и меньше КНД; чем меньше исходный УБЛ, тем в большей степени возрастают боковые лепестки.

Моделирование ДН решетки производилось при различных радиусах многогранной антенной решетки. Можно отметить, что основные закономерности в зависимостях, отмеченные выше, справедливы для многогранных решеток с различным радиусом, однако количественная оценка необходима при каждом наборе исходных данных.

### Заключение

Методом численного моделирования исследованы основные закономерности влияния отказов излучающих элементов на характеристики многогранной антенной решетки. Рассмотрены два типа отказов. Первый тип: в отказавших излучателях амплитуда возбуждения равна нулю. Второй тип: амплитуда возбуждения неизменна, фаза возбуждения изменяется на  $180^\circ$  по сравнению с нужной фазой. Рассмотрены также два типа расположения излучателей на раскрыве решетки – случайное с равномерным законом распределения отказавших и отказ фрагментов решетки в виде подрешеток прямоугольной формы (модулей). Отказы второго типа влияют сильнее на параметры ДН, чем отказы первого типа. Отказ модулей, по сравнению с отказом отдельных излучателей, приводит к большему росту максимального уровня бокового излучения при одном и том же числе отказавших излучателей. Основные закономерности сохраняются для многогранных решеток с различным радиусом.

## EFFECT OF RADIATING ELEMENTS FAILURE ON MULTIFACETED ANTENNA ARRAY CHARACTERISTICS

D.V. MOSKALIOV

### Abstract

The influence of the failure of the radiating elements on the characteristics of multifaceted antenna arrays is analyzed. Under the radiating elements is understood separate radiator or a piece of array in the form of a rectangular subarray. Failure of the radiator – is his breakdown, ie, excitation with a zero amplitude or phase different from the desired  $180^\circ$ . Faulty elements can be scattered on the array surface at random.

## Литература

1. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. М., 1970.
2. Габриэлян Д.Д., Звездина М.Ю., Шацкий Н.В. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1999. №5. С. 19–23.
3. Шацкий Н.В. // Методы менеджмента качества. 2001. №2. С. 29–31.
4. Шацкий В.В., Шацкий Н.В., Колмогоров О.В. // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Приложение. 2004. №4. С. 43–46.
5. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М., 1988.
6. Ямайкин В.Е., Северьянов В.Ф., Кишкунов В.К. и др. Антенные устройства. Мн., 1965.

Библиотека БГУИР