

УДК 621.396.677

ВЛИЯНИЕ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

О.А. ЮРЦЕВ, Д.В. МОСКАЛЕВ, В.В. КИЗИМЕНКО

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

Поступила в редакцию 1 ноября 2011

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

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

Введение

Исследованию влияния отказов излучающих элементов в решетках посвящен ряд работ, например [1–4]. 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, форму раскрытия решетки и характер расположения отказавших излучателей на раскрытие решетки – равномерно или в виде компактных групп. Влияние отказов элементов оценивается при различных амплитудных распределениях возбуждения излучателей в решетке.

Методика теоретического анализа

Для расчета диаграммы направленности (ДН) используется известное выражение [5]:

$$f(\theta, \phi) = f_1(\theta, \phi) \left| \sum_{m_x=1}^{M_x} \sum_{m_y=1}^{M_y} A_{xy} \cdot \exp(i\Psi_{xy}) \exp(ik \cdot \delta r) \right|, \quad (1)$$

где $f_1(\theta, \phi)$ – ДН одного излучателя; θ, ϕ – угловые координаты точки наблюдения в пространстве дальней зоны (угол θ отсчитывается от нормали к плоскости решетки); M_x, M_y – число строк и столбцов решетки; m_x, m_y – номера строк и столбцов решетки; A_{xy}, Ψ_{xy} – нормированная к максимуму амплитуда и начальная фаза возбуждения излучателя, стоящего на пересечении строки с номером m_x и столбца с номером m_y ; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число свободного пространства; λ – длина волны.

$$\delta r = (m_x - 1)D_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi + (m_y - 1)D_y \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi; \quad (2)$$

D_x, D_y – расстояния между соседними излучателями вдоль строк и столбцов.

Спадающее к краям решетки комбинированное амплитудное распределение A_{xy} задавалось в виде [6]:

$$A_{xy} = \left[\Delta_x + (1 - \Delta_x) \sin^{P_x} \left(\pi \frac{m_x - 1}{M_x - 1} \right) \right] \left[\Delta_y + (1 - \Delta_y) \sin^{P_y} \left(\pi \frac{n_y - 1}{N_y - 1} \right) \right], \quad (3)$$

где Δ_x (Δ_y) – уровни возбуждения крайних излучателей в строке (в столбце); P_x (P_y) – числа, характеризующие скорость спада амплитудного распределения от центра решетки к краю строки (столбца).

Фазовое распределение возбуждения излучателей считалось равномерным ($\Psi_{xy}=0$). Сетка расположения излучателей – прямоугольная. Расстояние между соседними излучателями в строке и в столбце одинаково.

В качестве излучателя используется гипотетический излучатель с задаваемой шириной главного лепестка ДН.

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

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

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

Рассмотрены три формы раскрыва – прямоугольная, эллиптическая и восьмиугольная. Прямоугольный и эллиптический раскрыв задаются числом излучателей M_x и M_y (для эллиптического раскрыва вдоль главных диаметров). Восьмиугольная форма задается числом излучателей M_x , M_y и числом излучателей в усеченной части в углах прямоугольника вдоль кромки решетки – N_b .

Число отказавших излучателей задается в процентах от общего числа излучателей. Распределение таких излучателей по раскрыву равномерное. На рис. 1 для примера показаны прямоугольный и восьмиугольный раскрывы с 30% отказавших излучателей. Для обоих раскрывов $M_x=50$, $M_y=25$. Для восьмиугольного раскрыва $N_b=7$. Отказавшие излучатели на рисунках отсутствуют, исправные излучатели обозначены точками.

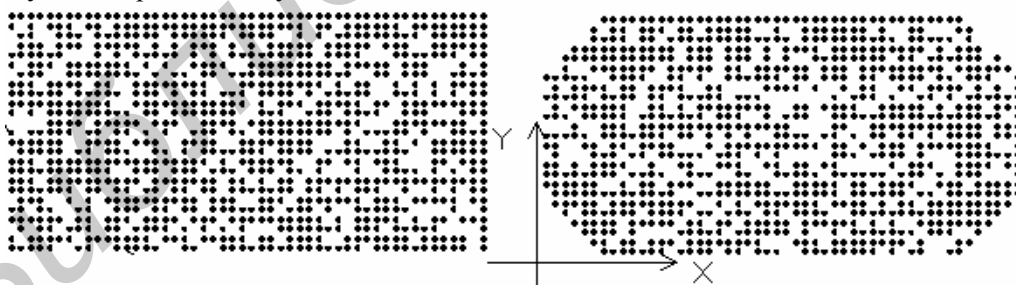


Рис. 1. Прямоугольный и восьмиугольный раскрывы с отказавшими излучателями

Рис. 2 иллюстрирует случай выхода из строя излучателей в виде компактных групп. Такая ситуация возможна 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,а показана решетка с прямоугольным раскрывом из 50-ти модулей. Каждый модуль имеет $N_x=N_y=8$. Число отказавших модулей $M_m=6$. На рис.2,б показана решетка со сложным раскрывом при $M_m=6$. В решетках с таким раскрывом, как известно, уровень боковых лепестков меньше, чем в решетках с прямоугольным раскрывом, при одном и том же амплитудном распределении

возбуждения излучателей. Влияние отказов модулей далее рассматривается для таких двух форм раскрыва.

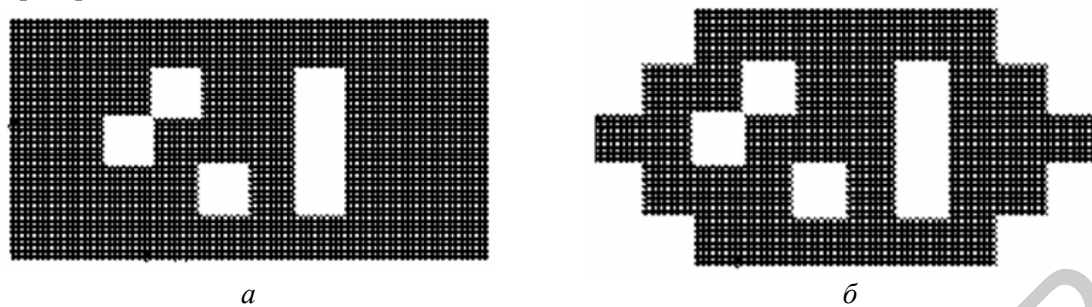


Рис. 2. Решетка с модульным построением:
a – прямоугольная форма раскрыва; *б* – сложная форма раскрыва

Результаты численного моделирования

Влияние отказов отдельных излучателей. Далее рассматриваются зависимости от числа отказавших излучателей N_d : изменение ширины главного лепестка диаграммы направленности $2\theta_{0,5}$, изменение уровня первого бокового лепестка F_{mb} и изменение КНД для трех форм раскрыва.

Для примера расчеты приведены для следующих параметров решетки: число излучателей $M_x=50$, $M_y=50$. 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 $\pm 40^\circ$. Число излучателей на кромке усеченной части раскрыва восьмиугольной формы $N_b=16$. При этом обеспечиваются одинаковые параметры ДН в главных плоскостях XZ и YZ , и все стороны восьмиугольного раскрыва имеют одинаковую длину.

В решетке с восьмиугольным раскрывом амплитудное распределение равномерное, и параметры ДН в главных плоскостях равны: ширина главного лепестка $2\theta_{0,5}=2,1^\circ$; максимальный боковой лепесток $F_{bm}=-18,3$ дБ. В решетке с прямоугольным раскрывом параметры амплитудного распределения $\Delta_x=\Delta_y=0,465$; $P_x=P_y=1$. В решетке с эллиптическим раскрывом: $\Delta_x=\Delta_y=0,81$; $P_x=P_y=1$. При указанных параметрах амплитудного распределения ширина главного лепестка и уровень первого бокового лепестка в решетках с тремя формами раскрыва практически одинаковы.

Анализ численных результатов показывает, что $2\theta_{0,5}$ практически не зависит от числа отказавших излучателей с нулевой амплитудой возбуждения. Этот результат легко объясним. 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 N_d . Но с ростом N_d существенно меняется ДН в области боковых лепестков. На рис.3 показана ДН решетки с рассматриваемыми параметрами и прямоугольным раскрывом при $N_d=0$ и $N_d=70\%$. Как видно, главный лепесток практически неизменен, а боковые лепестки существенно возрастают и теряют регулярный характер. Зависимости уровня боковых лепестков (УБЛ) от числа отказавших излучателей с нулевой амплитудой для трех форм раскрыва показаны на рис. 4: рис. 4,*a* – уровень максимального бокового лепестка (F_{bm}), рис. 4,*б* – среднеарифметический уровень (F_{bs}). Колебательный характер кривых связан с тем, что значения уровня боковых лепестков определялись не по средней ДН, а по ДН, соответствующей одной из реализаций распределения отказавших излучателей на раскрыве решетки. Такой тип отказов далее называется первым типом отказов.

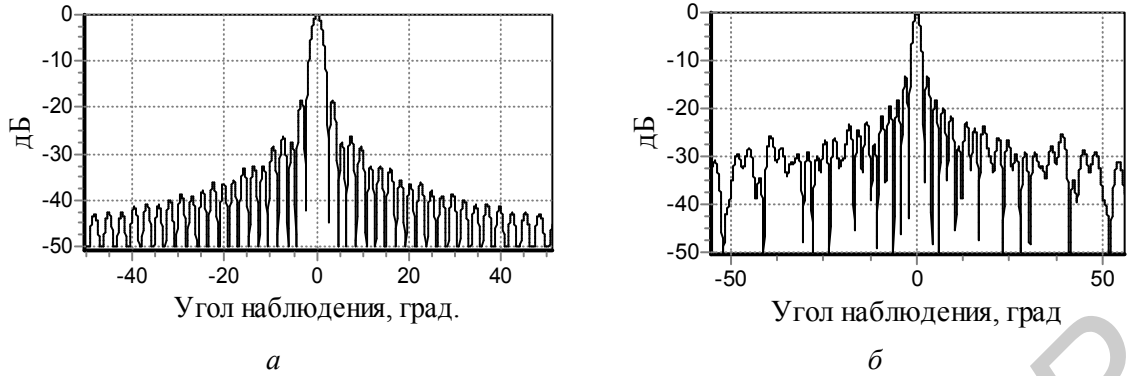


Рис. 3. Диаграммы направленности решетки с восьмиугольным раскрывом: *a* – $N_d=0$; *б* – $N_d=70\%$

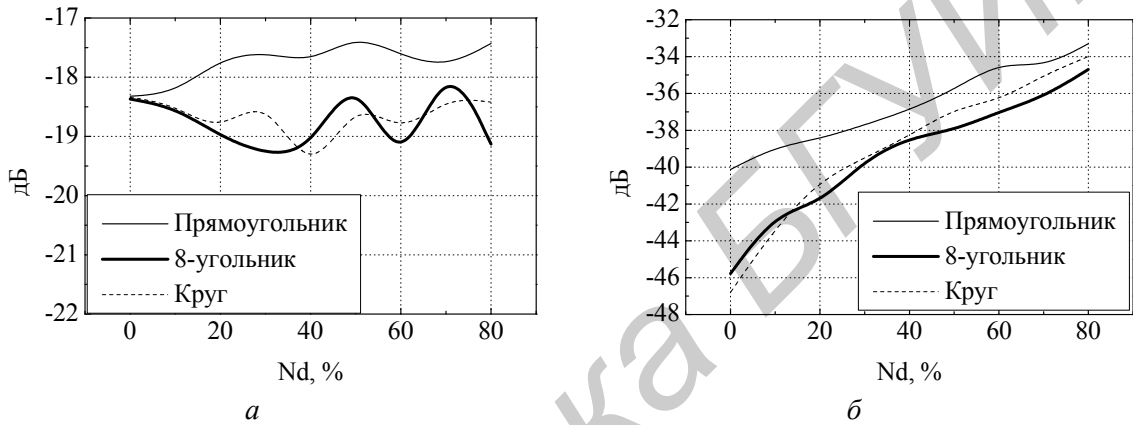


Рис. 4. Зависимость уровня боковых лепестков от числа отказавших излучателей:
a – максимальный УБЛ (F_{bm}); *б* – среднеарифметический УБЛ (F_{bs})

Из рис. 4 следует, что уровень максимального бокового лепестка слабо зависит от N_d , а среднеарифметический УБЛ растет с увеличением N_d . При условии равенства уровня максимальных боковых лепестков в решетках с 8-угольным и круглым раскрывами при малом числе N_d средний УБЛ существенно меньше среднего УБЛ решетки с прямоугольным раскрывом. С ростом N_d это различие уменьшается. Отказы излучателей второго типа в виде изменения фазы возбуждения на 180° ($\Delta\phi = 180^\circ$) по сравнению с нужной значительно влияет на изменение параметров ДН решетки. Для иллюстрации на рис.5*a* приведены графики, аналогичные показанным на рис. 4,*б*, для такого вида отказов. На рис.5*б* показана ДН решетки с такими отказами при $N_d=70\%$ (для сравнения с рис. 3,*б*).

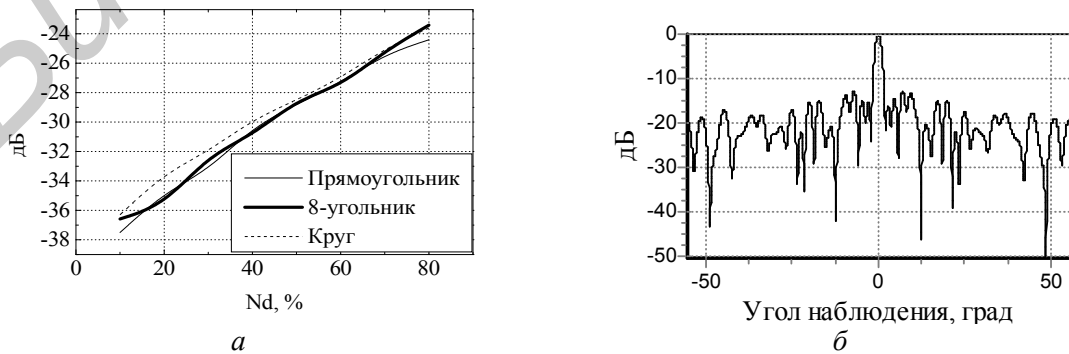


Рис. 5. Зависимость среднего УБЛ от N_d (*a*) и ДН решетки при $N_d=70\%$ (*б*)

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 N_d . Для иллюстрации на рис.6 показаны ДН при $N_d=50\%$ для решетки с прямоугольным раскрытием при двух значениях F_{bm} – максимального УБЛ при отсутствии отказов ($N_d=0$): рис. 6,а – $F_{bm}=-20$ дБ и рис. 6,б – $F_{bm}=-35$ дБ. В первом случае отказы излучателей привели к росту УБЛ на 0,5 дБ, во втором случае – на 6,5 дБ.

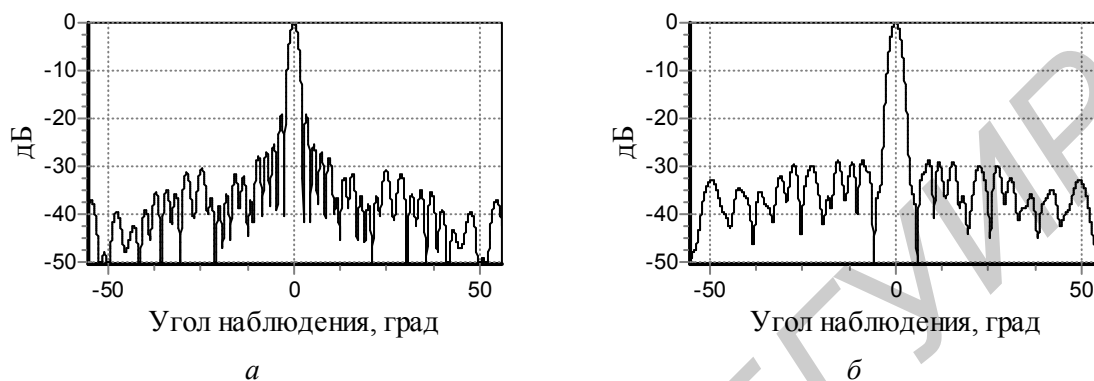


Рис. 6. ДН решетки при отказах излучателей и различном исходном УБЛ: а – $F_{bm}=-19,3$ дБ при $N_d=50\%$ ($F_{bm}=-20$ дБ при $N_d=0$); б – $F_{bm}=-28,5$ дБ при $N_d=50\%$ ($F_{bm}=-35$ дБ при $N_d=0$)

Отказы излучателей приводят к уменьшению КНД. Причем отказы второго типа влияют сильнее. От формы раскрытия влияние отказов зависит слабо.

Влияние отказов модулей. Характер изменения ДН решетки с модульным построением в зависимости от числа отказавших модулей и типа отказа зависит от характера расположения отказавших модулей на раскрытии решетки. На рис. 7 приведены ДН решетки, показанной на рис. 2,а с параметрами: число излучателей в строках и в столбцах решетки $M_x=50$, $M_y=25$; 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 раскрытии случайное, рис. 7,б – расположение отказавших модулей на раскрытии периодическое. В отказавших модулях амплитуда возбуждения излучателей равна нулю.

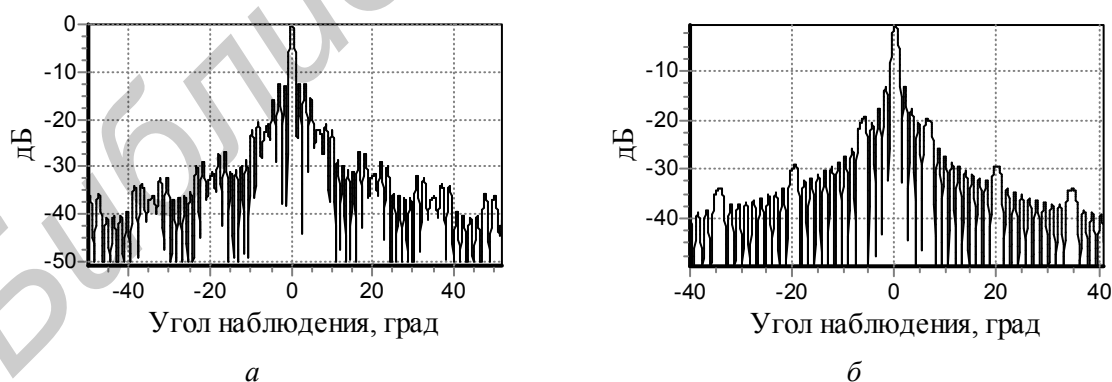


Рис. 7. ДН решетки с отказавшими модулями (первый тип отказов)

Как видно, во втором 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.

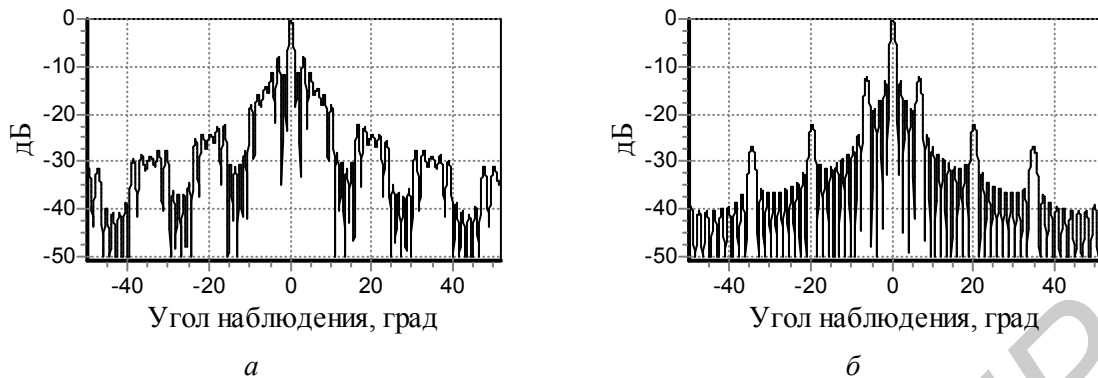


Рис. 8. ДН решетки с отказавшими модулями (второй тип отказов)

Степень влияния отказавших модулей существенно сильнее, чем влияние отказавших излучателей. Так, в решетке с прямоугольным раскрытием при исходном максимальном УБЛ, равным -25 дБ, отказ первого типа 20% случайно расположенных по раскрытию излучателей приводит к росту боковых лепестков до $-21,5$ дБ, а в составе модуля боковые лепестки увеличиваются до $-16,5$ дБ. Для этих двух случаев и отказов первого типа ДН показаны на рис. 9.

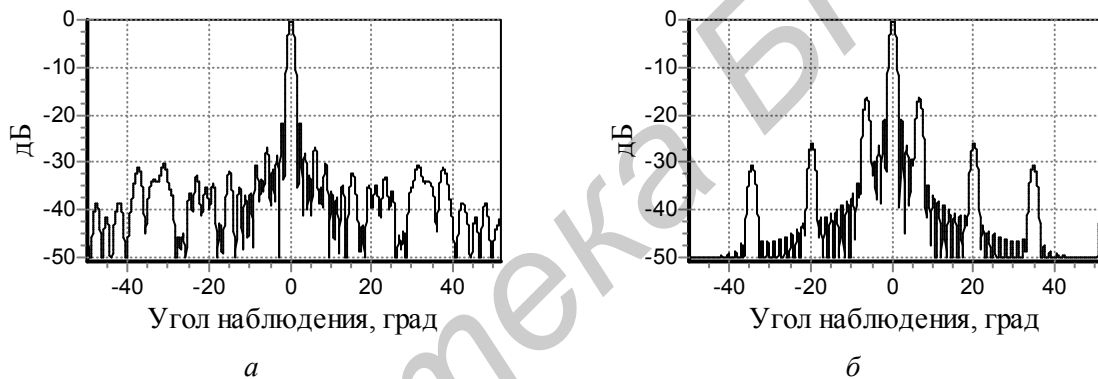


Рис. 9. Влияние отказавших излучателей (а) и модулей (б) на ДН плоской решетки

Влияние отказавших модулей на уменьшение КНД решетки слабее, чем влияние отказов излучателей при одном и том же числе отказавших излучателей. Это объясняется тем, что при отказах случайно расположенных на раскрытии излучателей уровень всех боковых лепестков увеличивается (рис. 9,а), что ведет к существенному уменьшению КНД. При отказах модулей возрастают отдельные боковые лепестки (рис. 9,б), поэтому КНД уменьшается в меньшей степени. Пример: в решетке с ранее рассмотренными параметрами и равномерным амплитудным распределением уровень первого бокового лепестка составляет $-13,2$ дБ, и коэффициент направленного действия равен $D=37,7$ дБ. При отказах первого типа 20% излучателей, случайно расположенных на раскрытии, КНД уменьшается до 32 дБ. При отказах 20% излучателей в составе модулей КНД снижается до 36 дБ. Аналогичная картина и при других амплитудных распределениях.

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.

Проведенный анализ показал, что отказы отдельных излучателей и модулей в решетке со сложной формой раскрытия (рис. 2,б) влияют на параметры решетки сильнее, чем в решетке с прямоугольной формой раскрытия (рис. 2,а). Это объясняется тем, что при одном и том же амплитудном распределении исходный УБЛ в решетке со сложной формой меньше.

Заключение

Методом численного моделирования исследованы основные закономерности отказов излучающих элементов на характеристики плоских антенных решеток с разной формой раскрытия – прямоугольной, восьмиугольной и эллиптической. Показано, что форма раскрытия мало влияет на степень влияния отказов. Рассмотрены два типа отказов – нулевая амплитуда возбуждения излучателей и изменение фазы возбуждения на 180° по сравнению с нужной фазой. Рассмотрены также два типа расположения излучателей на раскрытии решетки – равномерное распределение отказавших излучателей по случайному закону и отказ фрагментов решетки в виде подрешеток прямоугольной формы (модулей). Отказы второго типа влияют сильнее на параметры ДН и КНД, чем отказы первого типа. Отказ модулей приводит к более существенным изменениям параметров ДН и к меньшим изменениям коэффициента направленного действия при одном и том же числе отказавших излучателей. Влияние отказов столбцов решетки приводит практически к таким же изменениям в параметрах ДН и КНД, как и отказы отдельных излучателей, если число отказавших излучателей в обоих случаях одинаково.

EFFECT OF RADIATING ELEMENTS FAILURE ON PLANE ANTENNA ARRAY CHARACTERISTICS

O.A. YURTSEV, D.V. MOSKALIOV, V.V. KIZIMENKO

Abstract

The influence of the failure of the radiating elements on the characteristics of planar antenna arrays is analyzed. Under the radiating elements separate radiator or a piece of array in the form of a rectangular subarray is understood. Failure of the radiator – is his breakdown, i.e., excitation with a zero amplitude or phase different from the desired 180° . Faulty elements can be scattered on the grid 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., Кишкунев В.К. и др. Антенные устройства. Мн., 1965.