

## Сравнительный анализ сканирующих случайных антенных решеток с разной формой раскрыва

*Приведены результаты численного моделирования антенной решетки с эллиптическим и 8-угольным раскрывом и случайным расположением излучателей в апертуре в соответствии с равномерным законом распределения. Исследуются зависимости диаграммы направленности и коэффициента направленного действия отдельных реализаций и среднего значения указанных параметров от амплитудно-фазового распределения возбуждения излучателей, степени разрежения по отношению к эквидистантной решетке.*

**Ключевые слова:** антенная решетка, эллиптический и многоугольный раскрыв, случайное расположение излучателей, равномерный закон распределения, диаграмма направленности, коэффициент направленного действия.

Антенные решетки со случайным расположением излучателей в апертуре теоретически исследованы весьма подробно, опубликован ряд работ [1-9 и др.]. В известных работах исследованы средние значения диаграммы направленности (ДН) и коэффициента направленного действия (КНД) и их флуктуации. При этом использован аппарат теории вероятности. Рассмотрены, в том числе, решетки с круглой формой раскрыва [3, 9]. Причем в работе [3] рассмотрен случай, когда разрежение в расположении излучателей увеличивается от центра решетки к ее краям по закону спадающего амплитудного распределения (АР) возбуждения излучателей. В отличие от известных работ в настоящей статье рассматриваются решетки с эллиптической и многоугольной формой раскрыва, в которых расположение излучателей в апертуре решетке подчиняются случайному закону с равномерным распределением. Вариант решетки при равномерном амплитудном распределении и равномерном законе распределения излучателей в решетке имеет больший КНД, чем решетки с неравномерным законом распределения. Кроме того, такие решетки более универсальны, с точки зрения обеспечения требуемого уровня боковых лепестков. Заданный уровень боковых лепестков реализуется выбором амплитудного распределения. Другим отличием настоящей статьи от опубликованных в известных источниках является то, что при анализе использован численный метод. Это позволило определить не только средние значения ДН и КНД, но и их случайные. Анализ отдельных случайных реализаций важен потому, что при изготовлении случайной решетки практическая конструкция будет представлять собой одну из возможных реализаций. В этом случае надо знать ее характеристики и параметры. Кроме того, применение численного метода позволяет анализировать решетки с любой формой апертуры.

Анализ проведен с использованием теоремы перемножения ДН [10]. В качестве элементарного излучателя использован гипотетический излучатель с задаваемой шириной главного лепестка ДН ( $2\theta_{0,5}^1$ ) задаваемым уровнем максимального бокового лепестка ( $F_{bm}^1$ ).

В частности, весь численный анализ сделан для случая  $2\theta_{0,5}^1 = 90^\circ$  при отсутствии боковых

лепестков в переднем полупространстве.

Рассмотрим методику задания амплитудного и фазового распределения (АР и ФР) возбуждения излучателей в апертуре. Воспользуемся рис.1, на котором условно показана эквидистантная антенная решетка с прямоугольной апертурой и прямоугольной сеткой расположения излучателей. Основные геометрические параметры:  $D_x, D_y$  – расстояния между соседними излучателями по осям  $X, Y$ ;  $N_x, N_y$  – число излучателей в решетке по осям  $X, Y$ ;  $L_x, L_y$  – размеры решетки по осям  $X, Y$ . Причем  $L_x = D_x \cdot N_x$ ,  $L_y = D_y \cdot N_y$ . Ось  $Z$  ориентирована перпендикулярно плоскости апертуры решетки. На рисунке пунктирной линией показан также контур эллиптической решетки. При расчете поля эллиптической решетки путем суммирования полей всех излучателей исключаются излучатели, расположенные за пределами эллипса.

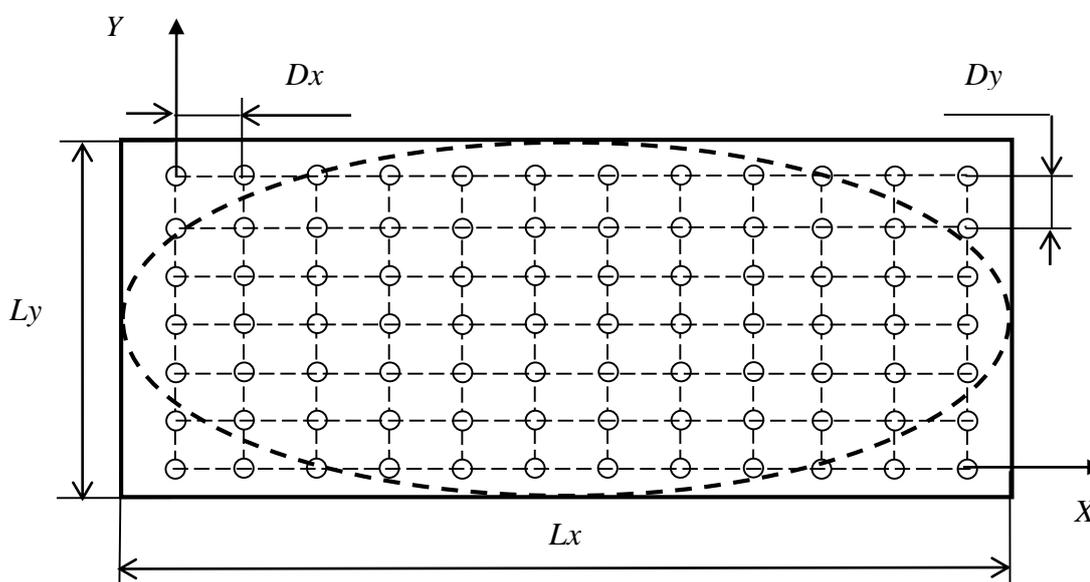


Рисунок 1.

Амплитудное распределение в прямоугольной решетке задается разделяющимся по координатам  $X, Y$ , спадающим к концам решетки по закону синуса по оси  $X$  и по оси  $Y$  до уровня  $\Delta x \leq 1$ ,  $\Delta y \leq 1$ . В центре решетки амплитуда возбуждения излучателя максимальна и равна 1. Степень синуса по осям  $X, Y$  произвольна и равна  $P_x, P_y$ .

Аналогично задается амплитудное распределение в многоугольной решетке. На рис.2 показаны примеры исследованных решеток – 8-угольная и эллиптическая. На правых рисунках удалена часть излучателей для получения разреженной решетки со случайным расположением излучателей в апертуре.

Численное моделирование решеток выполнено при различном соотношении сторон  $L_x/L_y$ , при значениях  $D_x, D_y$ , удовлетворяющих и не удовлетворяющих условию единственности главного лепестка нулевого порядка, различных значениях  $N_x, N_y$ , различном амплитудном распределении (значениях  $\Delta x, \Delta y, P_x, P_y$ ) и различном числе удаленных излучателей для получения разреженной решетки ( $N_b$ ). При сканировании

задавался угол сканирования относительно нормали к плоскости решетки  $\theta_m = 0 \dots \theta_{max}$ . В качестве угла максимального отклонения  $\theta_{max}$  взято значение, равное половине ширины главного лепестка ДН элементарного излучателя  $\theta_{max} = \theta_{0,5}^1 = 45^\circ$ . Расстояния  $D_x, D_y$  взяты равными  $0,53\lambda$ , что обеспечивает в эквидистантной решетке выполнение условия единственности главного лепестка нулевого порядка в секторе сканирования.

Некоторые результаты моделирования, характеризующие основные закономерности, приведены ниже. В качестве примеров, иллюстрирующих закономерности, рассмотрены решетки, получаемые из решетки с прямоугольным раскрытием с числом излучателей  $N_x = 30$  и  $N_y = 30$  при  $L_x/L_y = 1$ . Средняя ДН находилась в результате усреднения 100 случайных реализаций решеток при заданном  $N_b$ . По средней ДН рассчитывался коэффициент направленного действия (КНД). На последующих графиках приводятся средние ДН, максимальный уровень боковых лепестков (УБЛ) средней ДН и средний КНД.

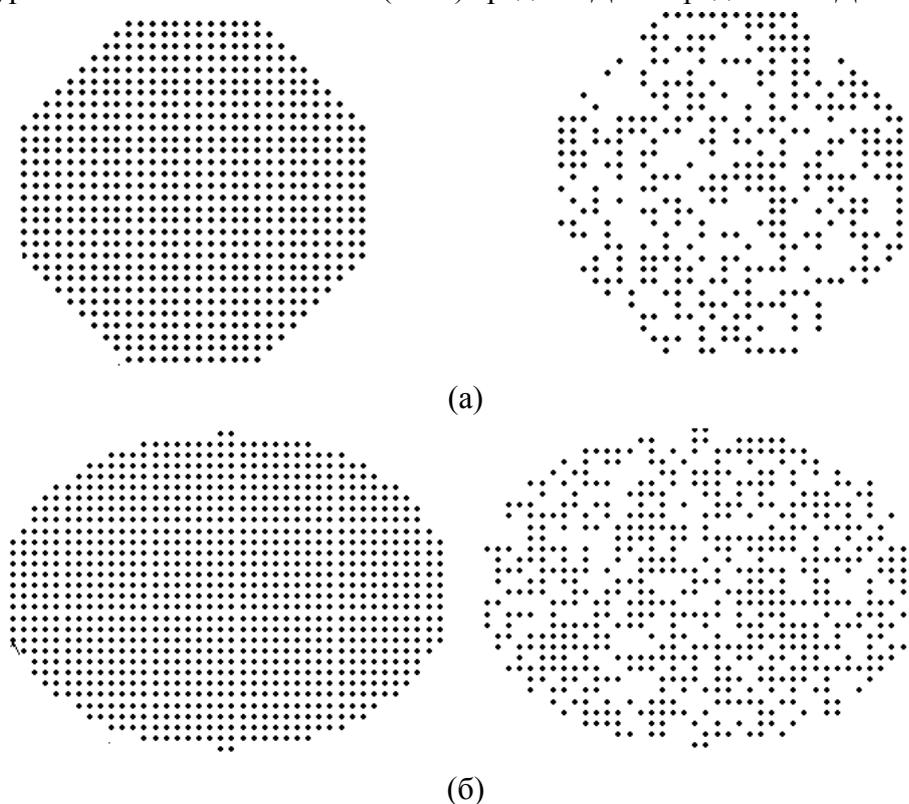


Рисунок 2.

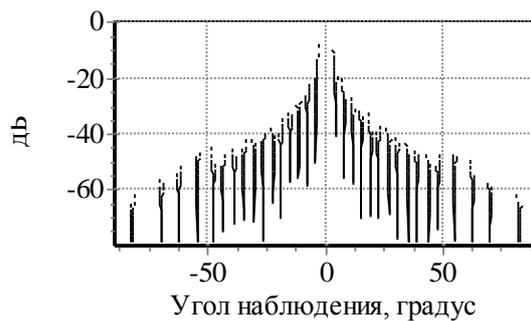
Проведенный анализ показал, что с ростом  $N_b$  (ростом разрежения решетки) максимальный уровень боковых лепестков решетки ( $F_{bm}$ ) и ширина главного лепестка решетки ( $2\theta_{0,5}$ ) практически не меняются. Причем это наблюдается как для средней ДН, так и для отдельных случайных реализаций ДН. Коэффициент направленного действия уменьшается с ростом  $N_b$ . Для иллюстрации на рис.3а представлена ДН решетки в плоскости ХZ (горизонтальной на рис.2) для углов сканирования  $\theta_m = 0$  и  $\theta_m = 45^\circ$  при  $N_b = 0$ . На рис.3б показана средняя ДН при  $N_b = 50\%$ . Амплитудное распределение возбуждения излучателей равномерное ( $\Delta x = 1, \Delta y = 1$ ).

На рис.4 показана зависимость от числа удаленных излучателей  $Nb$  значений КНД решетки при двух углах сканирования ( $\theta_m = 0$  и  $\theta_m = 45^\circ$ ) для трех форм раскрыва – прямоугольной (1), круглой (2) и восьмиугольной (3). Размеры всех сторон в восьмиугольной решетки сделаны одинаковыми для обеспечения одинаковых параметров  $2\theta_{0,5}$  и  $F_{bm}$  в вертикальной, горизонтальной и наклонной плоскостях. Амплитудное распределение возбуждения излучателей равномерное ( $\Delta x = 1$ ,  $\Delta y = 1$ ).

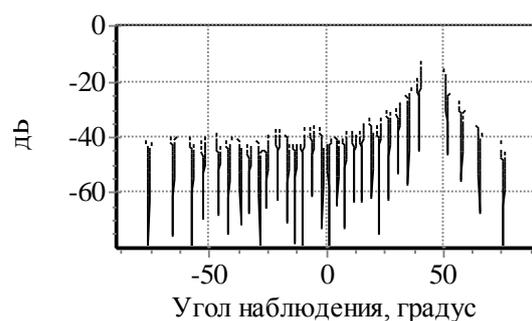
На рис.5 показана зависимость КНД от угла сканирования для трех форм раскрыва при двух значениях  $Nb = 30$  и  $60\%$ , а на рис.6 зависимость максимального уровня боковых лепестков (УБЛ) от угла сканирования при тех же значениях  $Nb$ .

Проведенный численный анализ решеток с тремя формами раскрыва – эквидистантных и разреженных по случайному закону позволяет сделать выводы, что при равномерном амплитудном распределении:

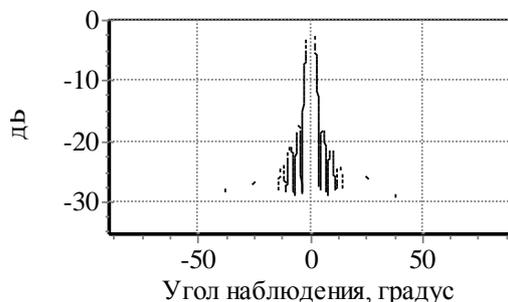
- по величине КНД при нулевом угле сканирования при одинаковых габаритных размерах на первом месте антенная решетка с круглым раскрывом, при сканировании преимущество имеет решетка с прямоугольным раскрывом;
- по уровню УБЛ при тех же условиях и всех углах сканирования преимущество на стороне 8-угольной решетки.



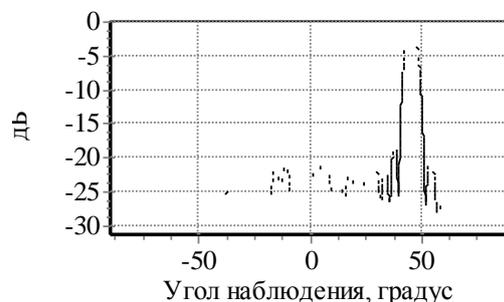
(а)  $\theta_m = 0$   
 $2\theta_{0,5} = 3,6^\circ$ ;  $F_{bm} = -16,9$  дБ; КНД=33,7 дБ



$\theta_m = 45^\circ$   
 $2\theta_{0,5} = 5,0^\circ$ ;  $F_{bm} = -16,0$  дБ; КНД=25,9 дБ



(б)  $\theta_m = 0$   
 $2\theta_{0,5} = 3,4^\circ$ ;  $F_{bm} = -16,9$  дБ; КНД=30,3 дБ



$\theta_m = 45^\circ$   
 $2\theta_{0,5} = 5^\circ$ ;  $F_{bm} = -17,7$  дБ; КНД=17,6 дБ

Рисунок 3.

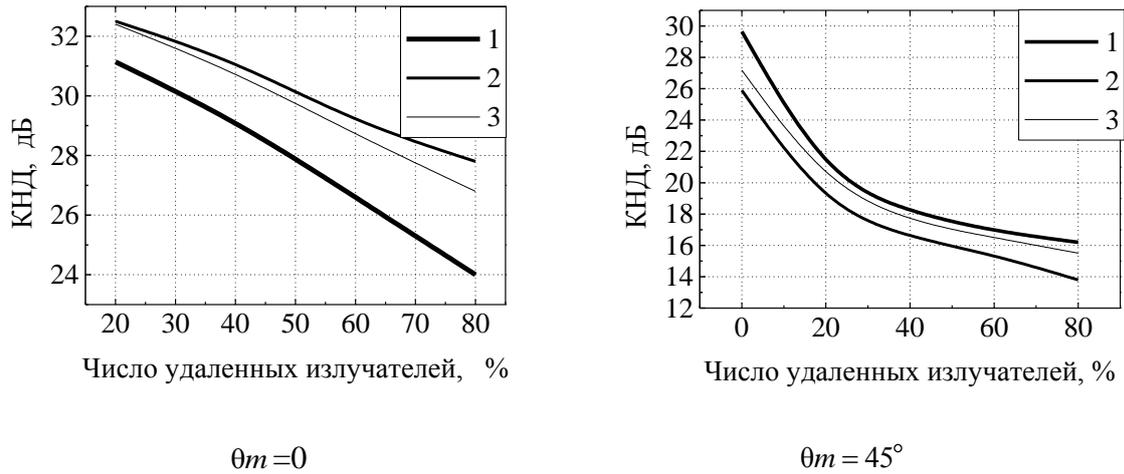


Рисунок 4.

Приведенные выше результаты получены для решеток, в которых при  $Nb = 0$  выполнено условие единственности главного лепестка нулевого порядка в секторе сканирования. Известно, что в зависимости от степени невыполнения этого условия при угле сканирования, большем некоторого значения в множителе системы решетки появляются главные лепестки порядка  $\pm 1$ . На их месте в ДН решетки возрастают боковые лепестки (дифракционные). Удаление части излучателей по случайному закону приводит к нарушению эквидистантности в решетке. Однако это не приводит к «размыванию» дифракционных боковых лепестков. Для иллюстрации этого положения на рис.5 показана средняя ДН решетки с круглым раскрывом при  $Nb = 50\%$  и двух значениях угла сканирования  $\theta_m = 0$  и  $\theta_m = 45^\circ$ . Расстояние между соседними излучателям равно  $\lambda$ ,  $\theta_m = 45^\circ$ . Расчеты сделаны для равномерного амплитудного распределения. От него зависит уровень боковых лепестков, расположенных между главными лепестками. Уровень же дифракционных главных лепестков от амплитудного распределения не зависит.

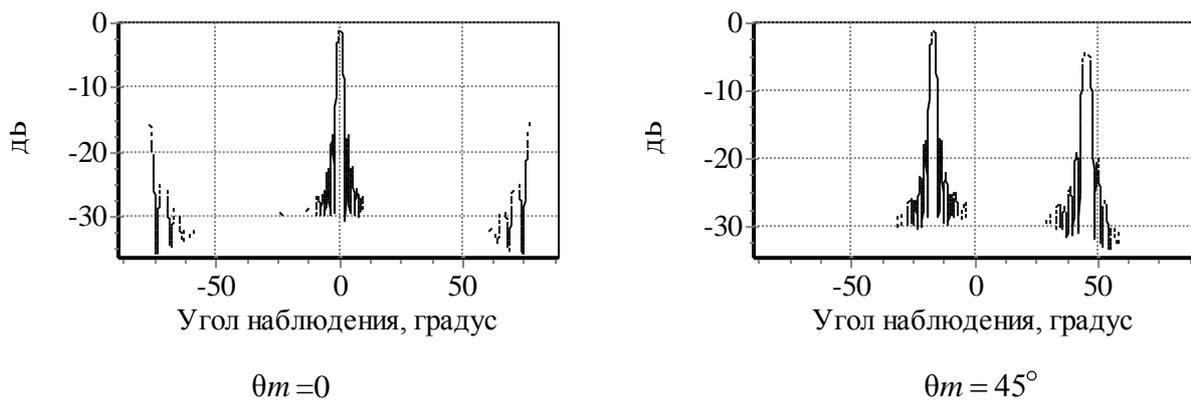


Рисунок 5.

Проведенный численный анализ зависимости параметров ДН и КНД от угла сканирования и степени разрежения эквидистантной решетки по случайному закону позволяет более обоснованно подходить к вопросам применения разреженных сканирующих антенных решеток

#### Библиографический список

1. Lo Y.T. Sidelobe level in nonuniformly spaced antenna arrays/ IEEE Trans. –1963. –v. AP-11, –№ 4 pp. 511 - 512.
2. Lo Y.T. A mathematical theory of antenna arrays with randomly spaced elements /IEEE Trans.–1964. – v. AP-12, –№ 3, pp.257-269.
3. Scolnik M.J, Sherman J.W., Ogg F.C. Statistically designed density-tapered arrays/ IEEE Trans. – 1964. – vol. AP-12, –№ 4, pp. 408 – 417.
4. Lo Y.T and Simcoe R.J. An experiment on antenna arrays with randomly spaced elements/ IEEE Trans. –1967. v. AP-15, –№ 2, pp. 231 - 235.
5. Закон М.Б., Меркулов В.В. Неэквидистантные антенные решетки со случайно расположенными элементами. / Радиотехника и электроника.– 1965. –№ 1, сс. 7-13.
6. Меркулов В.В. КНД решеток со случайно расположенными элементами./ Радиотехника и электроника.– 1966. – № 5, сс. 128-130.
7. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн./ – М.: Сов. Радио. –1979. –381 с.
8. Содин Л.Г. Статистический анализ неэквидистантных линейных антенн-решеток. / Радиотехника и электроника. – 1966. –№ 11, сс. 1953-1959.
9. Шифрин Я.С., Назаренко В.А. Поле случайных антенных решеток в зоне Френеля /Радиотехника и электроника. –1991. –№1, сс. 52-62.
10. Фельд Я.Н., Бененсон Л.С. Основы теории антенн /– М.: Дрофа, –2007. – 491 с.