

УДК 621.391.82

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СКАНИРУЮЩИХ СЛУЧАЙНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С РАЗНОЙ ФОРМОЙ РАСКРЫВА

И.Ф. ШАЛЯПИН, С.А. ЗАВАДСКИЙ, О.А. ЮРЦЕВ

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

Поступила в редакцию 14 декабря 2015

Приведены результаты численного моделирования антенной решетки с прямоугольным, эллиптическим и 8-угольным раскрывом и случайным расположением излучателей в апертуре. 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, равномерный закон распределения, диаграмма направленности, коэффициент направленного действия.

### Введение

Антенные решетки со случайным расположением излучателей в апертуре (случайные решетки) теоретически исследованы весьма подробно, опубликован ряд работ [1–9]. 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. Вариант случайной 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.

В отличие от известных работ в настоящей статье рассматриваются решетки с прямоугольной, эллиптической и многоугольной формами раскрыва, в которых расположение излучателей в апертуре решетки подчиняется случайному закону с равномерным законом распределения.

Решетки с восьмиугольным раскрывом и случайным расположением излучателей в апертуре в известных работах не рассмотрены, хотя они имеют более низкий уровень боковых лепестков по отношению к решеткам с прямоугольным раскрывом, а при некоторых геометрических параметрах раскрыва – и по отношению к решеткам с эллиптическим раскрывом.

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 реализации. 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.

### Методика численного анализа

Анализ проведен с использованием теоремы перемножения ДН [10]. В качестве элементарного излучателя использован гипотетический излучатель с задаваемой шириной главного лепестка ДН ( $2\theta_{0,5}^1$ ) и 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:  $Dx, Dy$  – расстояния между соседними излучателями по осям  $X, Y$ ;  $Nx, Ny$  – число излучателей в решетке по осям  $X, Y$ ;  $Lx, Ly$  – размеры решетки по осям  $X, Y$ . Причем  $Lx = Dx \cdot Nx$ ,  $Ly = Dy \cdot Ny$ . 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.

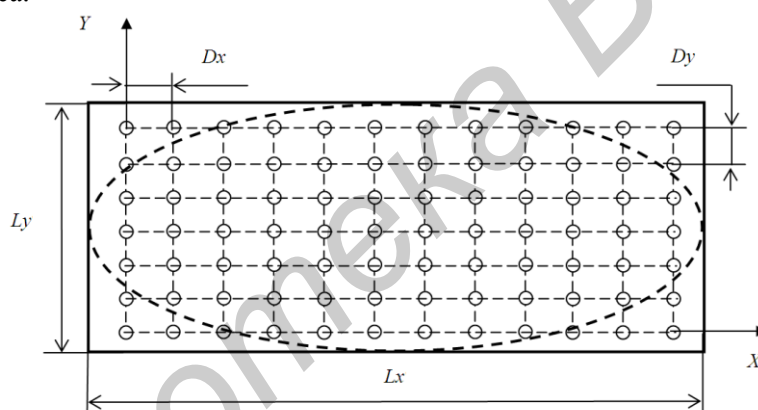


Рис. 1. Антенная решетка

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  $Px, Py$ . Аналогично задается амплитудное распределение в 8-угольной решетке.

На рис. 2 показан пример 8-угольной решетки. На правом рисунке удалена часть излучателей для получения разреженной решетки со случайным расположением излучателей в апертуре. Численное моделирование решеток выполнено при различном соотношении сторон  $Lx/Ly$ , при значениях  $Dx, Dy$ , удовлетворяющих и не удовлетворяющих условию единственности главного лепестка нулевого порядка, различных значениях  $Nx, Ny$ , различном амплитудном распределении (значениях  $\Delta x, \Delta y, Px, Py$ ) и различном числе удаленных излучателей для получения разреженной решетки ( $Nb$ ). 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  $Dx, Dy$  взяты равными  $0,53\lambda$ , что обеспечивает в эквидистантной решетке выполнение условия единственности главного лепестка нулевого порядка в секторе сканирования.



Рис. 2. Восьмиугольная решетка

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.

### Результаты и их обсуждение

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. 3, а представлена ДН решетки в плоскости  $XZ$  (горизонтальной на рис. 2) для углов сканирования  $\theta_m = 0$  и  $\theta_m = 45^\circ$  при  $N_b = 0$ . На рис. 3, б показана средняя ДН при  $N_b = 50\%$ . Амплитудное распределение возбуждения излучателей равномерное ( $\Delta x = 1, \Delta y = 1$ ).

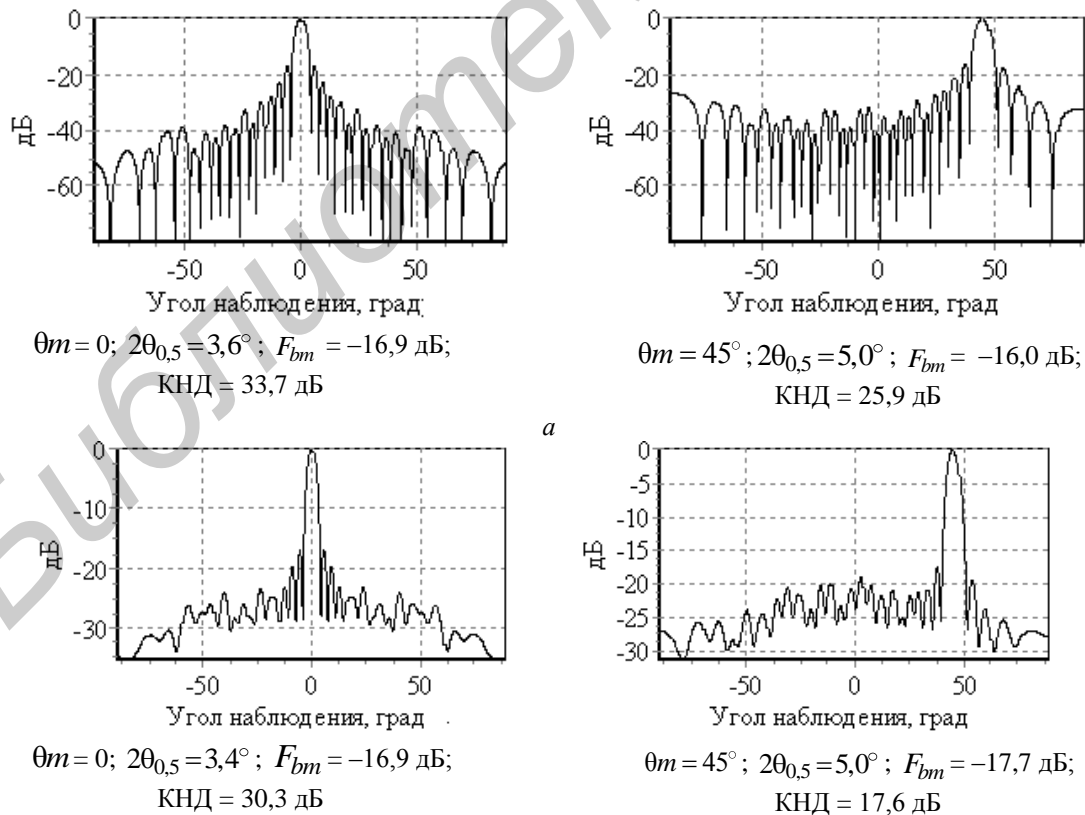


Рис. 3 Диаграммы направленности решетки с круглым раскрытием

На рис. 4 показана зависимость значений КНД решетки от числа удаленных излучателей  $Nb$  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 решетке сделаны одинаковыми для обеспечения одинаковых параметров  $2\theta_{0,5}$  и  $F_{bm}$  в вертикальной, горизонтальной и наклонной плоскостях. Амплитудное распределение возбуждения излучателей равномерное ( $\Delta x = 1$ ,  $\Delta y = 1$ ).

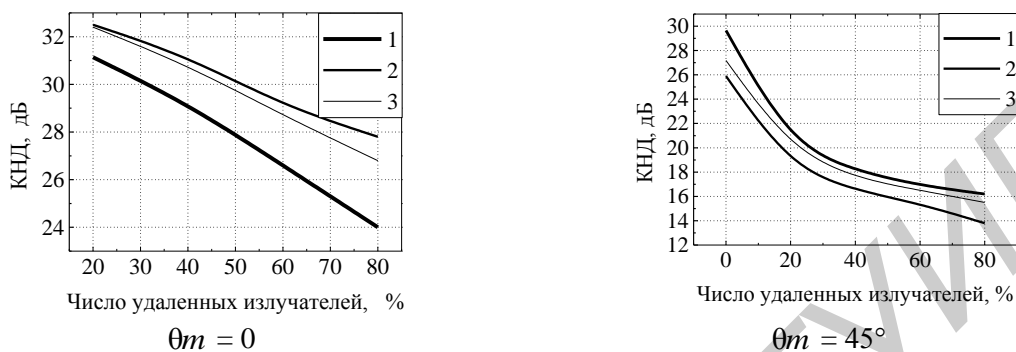


Рис. 4. Зависимость КНД от числа удаленных излучателей при двух углах сканирования  $\theta_m$  для трех форм раскрыва – прямоугольной (1), круглой (2) и восьмиугольной (3)

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  $Nb$ .

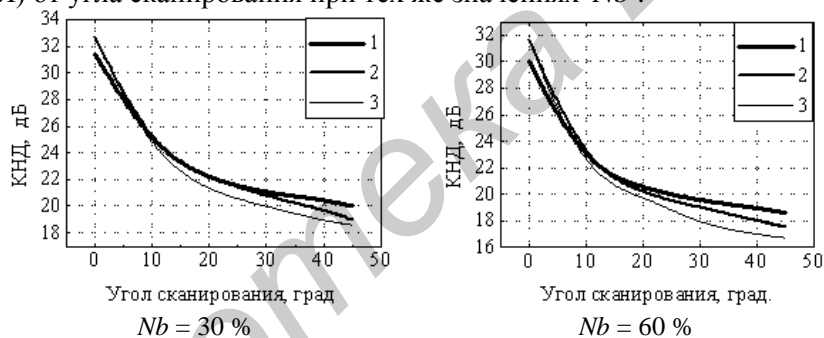


Рис. 5. Зависимость КНД от угла сканирования для трех форм раскрыва

Проведенный численный анализ решеток с тремя формами раскрывов – экидистантных и разреженных по случайному закону позволяет сделать следующие выводы. 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.

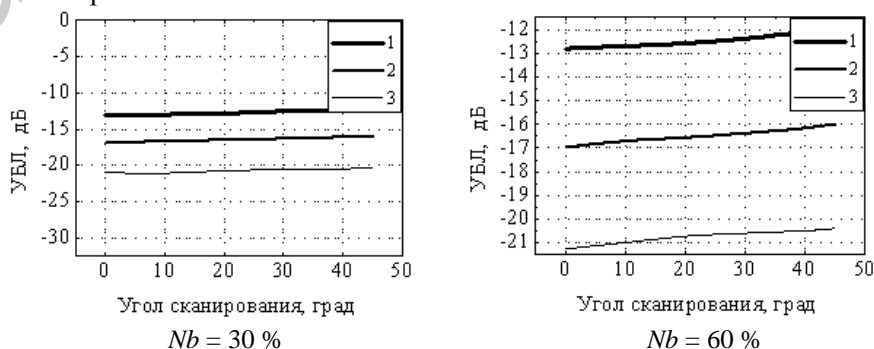


Рис. 6. Зависимости максимального уровня боковых лепестков (УБЛ) от угла сканирования

Сравнительный анализ был сделан для равномерного амплитудного распределения потому, что в активных антенных решетках важно, чтобы приемо-передающие модули всех излучателей работали в режиме передачи с максимальной мощностью. В решетке с 8-угольным раскрывом в одной из продольных плоскостей УБЛ, как известно, может быть сделан меньшего размера, чем во всех других плоскостях. Для этого длина в ортогональной продольной плоскости делается меньше. Эта возможность сохраняется и в разреженной решетке.

Характер изменения параметров ДН и КНД в отдельных реализациях необходимо знать при практическом изготовлении разреженной решетки. Выбор той или иной реализации решетки определяется требованиями к УБЛ и КНД. На рис. 7 проиллюстрировано изменение параметров в разреженной решетке от реализации к реализации. Расчеты сделаны для решеток с 8-угольным раскрывом и числом удаленных излучателей  $Nb = 60\%$ . Как и ранее, число излучателей по осям  $X$  и  $Y$  равно 30, расстояние между соседним излучателями вдоль этих осей равно  $0,53\lambda$ , что обеспечивает в эквидистантной решетке выполнение условия единственности главного лепестка нулевого порядка при максимальном угле сканирования  $\theta_m = 45^\circ$ .

Все предыдущие 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.

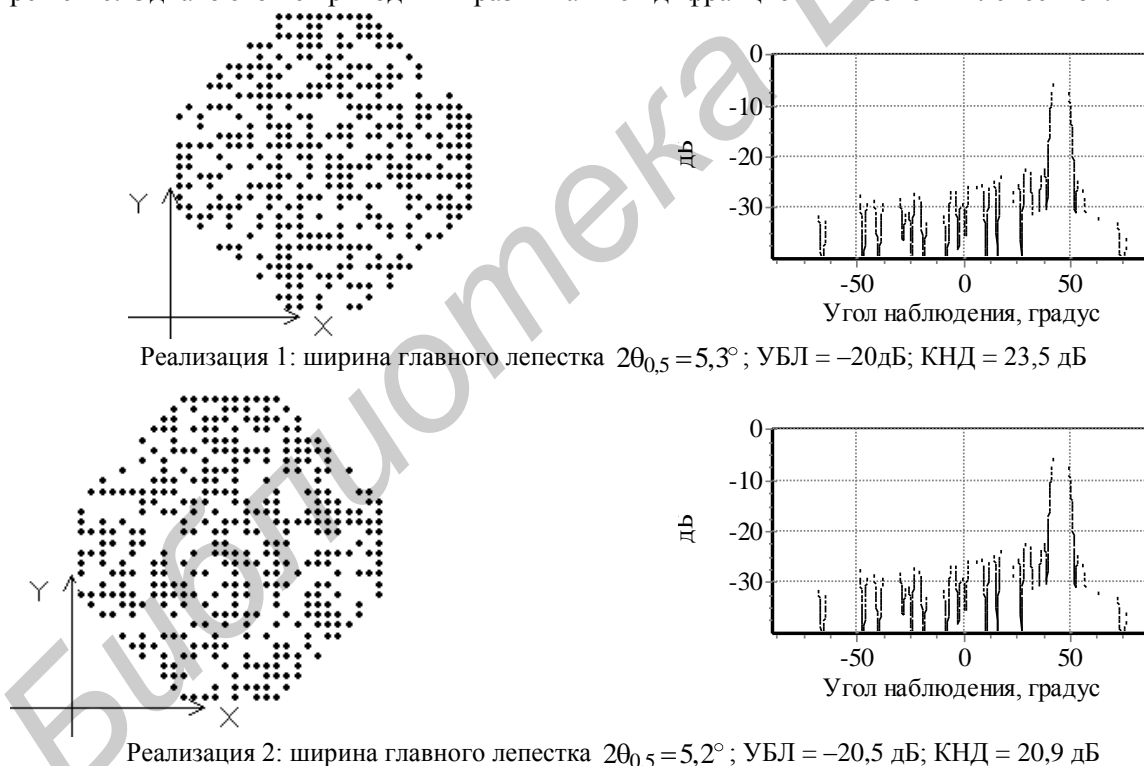


Рис. 7. Параметры отдельных реализаций случайной решетки при  $Nb = 60\%$

Для иллюстрации этого свойства на рис. 8 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 излучателями равно  $\lambda$  (не выполняется условие единственности главного лепестка нулевого порядка). Этот рисунок надо сравнить с рис. 3, б. На рис. 8 при  $\theta_m = 0$  слева появился дифракционный главный лепесток порядка -1, справа – лепесток порядка +1, в центре рабочий главный лепесток нулевого порядка. На рис. 8 при  $\theta_m = 45^\circ$  слева расположен лепесток порядка -1, справа – рабочий главный лепесток нулевого порядка при угле

сканирования  $\theta_m = 45^\circ$ . 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.

Таким образом, для получения разреженной антенной решетки из эквидистантной решетки путем удаления части излучателей по случайному закону необходимо в эквидистантной решетке выполнить условие единственности главного лепестка нулевого порядка.

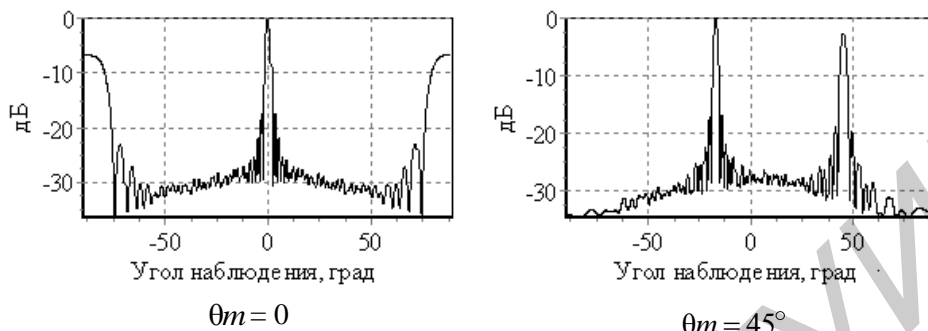


Рис. 8. ДН решетки с круглым раскрытием при невыполнении условия единственности главного лепестка,  $Nb = 50\%$

### Заключение

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 и выбору формы раскрытия.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF RANDOM SCANNING ANTENNA ARRAYS WITH DIFFERENT FORMS OF APERTURE

I.F. SHALYAPIN, S.A. ZAVADSKI, O.A. YURTSEV

### Abstract

The results of numerical simulation of antenna array with rectangular, elliptical and octagonal aperture and uniform distribution of radiators are presented.

*Keywords:* antenna array, uniform distribution law, directional pattern, directivity.

### Список литературы

1. Lo Y.T. // IEEE Trans. 1963. Vol. AP-11, № 4. P. 511–512.
2. Lo Y.T. // IEEE Trans. 1964. Vol. AP-12, № 3. P. 257–269.
3. Scolnik M.J., Sherman J.W., Ogg F.C. // IEEE Trans. 1964. Vol. AP-12, № 4. P. 408–417.
4. Lo Y.T., Simcoe R.J. // IEEE Trans. 1967. Vol. AP-15, № 2. P. 231–235.
5. Закон М.Б., Меркулов В.В. // Радиотехника и электроника. 1965. № 1. С. 7–13.
6. Меркулов В.В. // Радиотехника и электроника. 1966. № 5. С. 128–130.
7. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. М., 1979.
8. Содин Л.Г. // Радиотехника и электроника. 1966. № 11. С. 1953–1959.
9. Шифрин Я.С., Назаренко В.А. // Радиотехника и электроника. 1991. № 1. С. 52–62.
10. Фельд Я.Н., Бененсон Л.С. Основы теории антенн. М., 2007.