

УДК 621.391.82

СКАНИРОВАНИЕ В РАЗРЕЖЕННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ СО СЛУЧАЙНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В АПЕРТУРЕ

О.А. ЮРЦЕВ, И.Ф. ШАЛЯПИН

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

Поступила в редакцию 19 января 2015

Анализируются основные закономерности в плоской разреженной антенной решетке с прямоугольным раскрытием и со случайным расположением излучателей в апертуре. Закон распределения излучателей в апертуре – равномерный.

Ключевые слова: разреженная антенная решетка, амплитудное распределение возбуждения, коэффициент направленного действия, диаграмма направленности, сканирование, метод моментов.

Введение

Разреженные антенные решетки применяются как системы с уменьшенным числом излучателей и, следовательно, с уменьшенной стоимостью. Вместе с отмеченным достоинством такие решетки имеют и существенный недостаток – уменьшенный коэффициент направленного действия (КНД) при одних и тех же размерах апертуры по сравнению с неразреженными решетками. Разреженные антенные решетки, включая решетки со случайным расположением излучателей в апертуре, рассмотрены в ряде публикаций [1–10]. Как правило, в таких решетках рассматриваются средние характеристики решетки и флуктуации их параметров. При этом используется статистический подход. В настоящей статье рассматриваются решетки со случайным расположением излучателей в апертуре, причем не средние значения характеристик, а характеристики отдельных реализаций решеток. Решетки со случайным размещением излучателей получаются из эквидистантных решеток путем удаления части излучателей по случайному равномерному закону. Смысл рассмотрения характеристик отдельных случайных реализаций решеток со случайным расположением излучателей заключается в том, что при изготовлении такой решетки приходится иметь дело с отдельной реализацией размещения излучателей и оптимизировать решетку путем перебора отдельных реализаций по каким-то критериям, например, по максимуму коэффициента направленного действия. Полученные результаты являются новыми и дополняют материалы, имеющиеся в литературе.

Методика анализа

Основные закономерности исследуются численно с помощью специально разработанной для этого программы, основанной на применении теоремы перемножения диаграмм направленности. При рассмотрении решеток из директорных излучателей используется метод моментов. Анализируемая решетка условно показана на рис. 1. Кружками обозначены места расположения излучателей в эквидистантной решетке. Закрашенными кружками обозначены излучатели, которые удаляются для получения разреженной неэквидистантной решетки. Число этих излучателей задается в % от общего числа излучателей

в решетке. Используемые далее обозначения: N_x, N_y – число излучателей по осям X, Y ; D_x, D_y – расстояния между соседними излучателями по осям X, Y в эквидистантной антенной решетке (ЭАР); N_b – % удаленных излучателей для получения разреженной антенной решетки (РАР); θ, φ – угловые координаты точки наблюдения $P(\theta, \varphi)$ в дальней зоне; R_{xy} – расстояние от излучателя с координатами X, Y до точки наблюдения $P(\theta, \varphi)$. Ряды излучателей по оси X далее называются строками, по оси Y – столбцами.

Диаграмма направленности (ДН) решетки определяется известным выражением [11]:

$$f(\theta, \varphi) = f_1(\theta, \varphi) \cdot f_c(\theta, \varphi), \quad (1)$$

где $f_1(\theta, \varphi)$ – ДН одного излучателя; $f_c(\theta, \varphi)$ – множитель системы решеток.

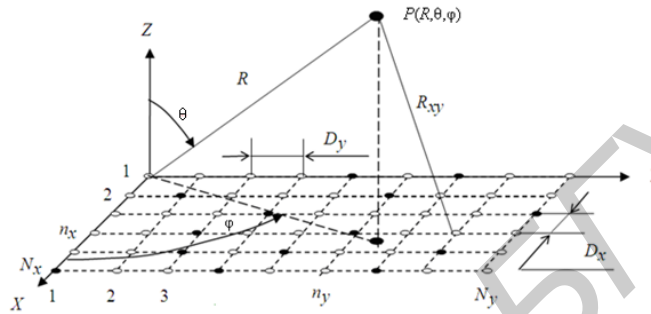


Рис. 1. Решетка в системе координат

В соответствии с [11]

$$f_c(\theta, \varphi) = \sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{n_y=1}^{N_y} A_{xy} \exp[ikD_x(n_x-1)\cos\varphi\sin\theta + ikD_y(n_y-1)\sin\varphi\sin\theta + i\Psi_{xy}], \quad (2)$$

где A_{xy} – нормированная амплитуда возбуждения излучателя с координатами x, y (амплитудное распределение возбуждения излучателей);

$$x = D_x(n_x - 1); \quad y = D_y(n_y - 1); \quad (3)$$

Ψ_{xy} – фаза возбуждения излучателя с координатами x, y (фазовое распределение возбуждения излучателей).

Далее используется разделяющееся по координатам X и Y комбинированное амплитудное распределение (АР) и разделяющееся по X и Y линейное фазовое распределение (ФР). Разделяющееся комбинированное АР задается выражением:

$$A_{xy} = A_x \cdot A_y, \quad (4)$$

где

$$A_x = (1 - \Delta_x) + \Delta_x \left[\sin\left(\pi \frac{n_x - 1}{N_x - 1}\right) \right]^{P_x}, \quad (5)$$

$$A_y = (1 - \Delta_y) + \Delta_y \left[\sin\left(\pi \frac{n_y - 1}{N_y - 1}\right) \right]^{P_y}, \quad (6)$$

Δ_x, Δ_y – нормированная к максимуму амплитуда возбуждения крайних излучателей в строке и в столбце; P_x, P_y – произвольные числа, характеризующие скорость уменьшения амплитуды возбуждения излучателей от центра строки (столбца) к краям.

Разделяющееся по координатам линейное фазовое распределение определяется выражением:

$$\Psi_{xy} = -(n_x - 1)kD_x \sin\theta_{mx} - (n_y - 1)kD_y \sin\theta_{my}, \quad (7)$$

θ_{mx}, θ_{my} – углы отклонения максимума главного лепестка ДН в плоскостях XZ и YZ;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число свободного пространства.

Коэффициент направленного действия (КНД) решетки далее обозначается символом (D) и определяется выражением [11]:

$$D = K_{ef} \frac{4\pi}{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} F^2(\varphi, \theta) \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi}, \quad (8)$$

где $F(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) / f_{\max}$ – нормированная ДН решетки, f_{\max} – максимальное значение ненормированной ДН; $K_{ef} = (N_x \cdot N_y - N_b) / (N_x \cdot N_y)$, N_b – число удаленных излучателей в исходной антенной решетке.

В качестве излучателя решетки использованы 2 модели.

1. Модель 1 – модель гипотетического излучателя с задаваемой шириной главного лепестка ДН ($2\theta_{0,5}^1$) и задаваемым максимальным уровнем боковых лепестков – УБЛ (F_{bm}^1).

2. Модель директорной антенны в составе симметричного резонансного вибратора, линейного рефлектора и N_d директоров. Такая модель анализировалась методом моментов с использованием интегрального уравнения Поклингтона [12] и импульсных функций в качестве базисных и весовых функций.

Результаты анализа

Для изучения основных закономерностей проведено численное моделирование при различных геометрических параметрах решеток $N_x, N_y, D_x, D_y, \Delta_x, \Delta_y, P_x, P_y$, но в статье примеры приводятся для решетки с параметрами $N_x = N_y = 20, D_x = 0,63\lambda$ (при таком D_x в плоскости XZ обеспечивается сектор сканирования $\pm 30^\circ$ без появления дифракционных главных лепестков порядка ± 1), $D_y = 0,7\lambda$.

Разреженная антенная решетка (РАР) со случайным расположением излучателей, как указывалось выше, получается из эквидистантной антенной решетки (ЭАР) путем удаления излучателей. На рис. 2 условно показана ЭАР с $N_x = N_y = 20$ (а) и одна из возможных реализаций такой решетки, полученная из ЭАР путем удаления 40 % излучателей по случайному закону (б). На рис. 2, б удаленные излучатели показаны крупными точками.

При анализе использовано равномерное амплитудное распределение ($\Delta_x = \Delta_y = 1$) и комбинированное, соответствующее значениям $\Delta_x = \Delta_y = 0,3$ и $P_x = P_y = 1$, и линейное фазовое распределение, соответствующее $\theta_{mx} = 0 \dots 30^\circ, \theta_{my} = 0$. т.е. при сканировании в плоскости XZ. Это не снижает общность полученных результатов и выводов из них.

Расчеты ДН и КНД при различном числе удаленных излучателей (N_b) сделаны для конкретных реализаций антенной решетки РАР без усреднения по многим реализациям, так как при проектировании РАР придется делать какую-либо реализацию решетки, выбранную по некоторым критериям: ширине главного лепестка ДН ($2\theta_{0,5}$), максимальному уровню боковых лепестков – УБЛ (F_{bm}), коэффициенту направленного действия – КНД (D).

Далее приводятся результаты моделирования для гипотетического излучателя с шириной главного лепестка 60 град и для излучателя в виде директорной антенны.

Гипотетический излучатель. Проведенный анализ показывает, что параметры решетки $2\theta_{0,5}, F_{bm}$ слабо зависят от числа удаленных излучателей N_b . Для иллюстрации этого на

рис. 3 показаны ДН решетки в плоскости XZ при $N_b = 20\%$ (а) и 60% (б) для равномерного амплитудного распределения и $\theta_{mx}=0$. Параметры решетки: при $N_b = 20\%$ ширина главного лепестка $2\theta_{0,5} = 3,8^\circ$; $F_{bm} = -14,13$ дБ; при $N_b = 60\%$ ширина главного лепестка $2\theta_{0,5} = 3,64^\circ$; $F_{bm} = -12,4$ дБ.

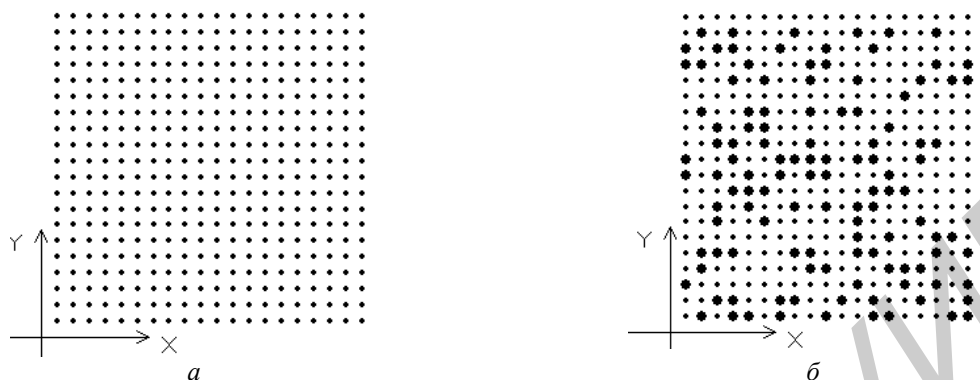


Рис. 2. Эквидистантная решетка (а) и решетка с 40 % удаленных излучателей по случайному закону (б)

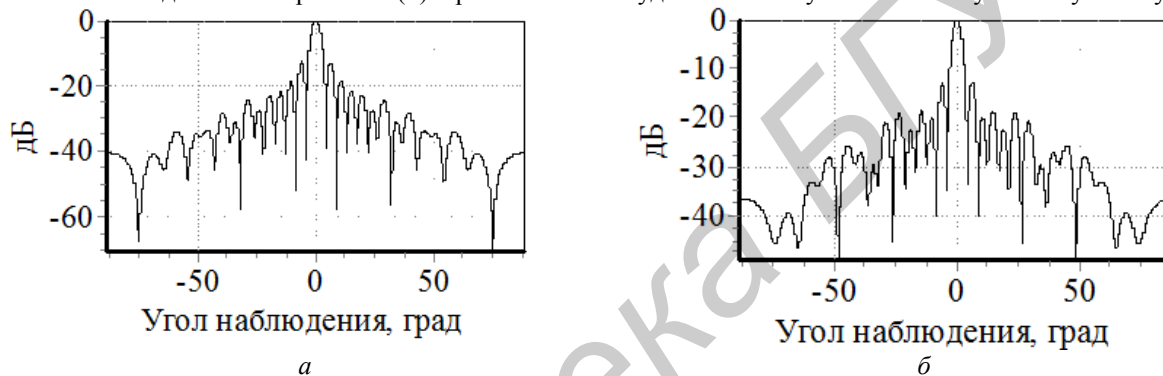


Рис. 3. ДН решетки при разных значениях удаленных излучателей: а – $N_b = 20\%$; б – $N_b = 60\%$

КНД решетки уменьшается с увеличением N_b . В частности, для той же решетки КНД уменьшается со значения $33,8$ дБ при $N_b = 0$ до значения $25,2$ дБ при $N_b = 60\%$.

Аналогичные результаты получены и для комбинированного АР. Необходимо отметить, что при одних и тех же параметрах решетки N_x , N_y , D_x , D_y , Δ_x , Δ_y , P_x , P_y , N_b параметры $2\theta_{0,5}$, F_{bm} , D меняются от реализации к реализации структуры расположения удаленных излучателей. На рис. 4 показаны зависимости указанных параметров от номера реализации при $\Delta_x = \Delta_y = 0,3$ и $P_x = P_y = 1$ и $N_b = 40\%$ и двух значениях угла сканирования в плоскости XZ: $\theta_{mx} = 0$ (обозначен цифрой 1) и $\theta_{mx} = 30^\circ$ (обозначен цифрой 2). Угол сканирования в плоскости YZ равен нулю. Из рис. 4 следует, что КНД в меньшей степени зависит от номера реализации.

Известно, что в эквидистантной решетке с прямоугольным раскрытием и разделяющимся амплитудно-фазовым распределением (АФР) параметры ДН в двух главных плоскостях независимы друг от друга. В рассматриваемой решетке РАР такая зависимость появляется. Для иллюстрации этого на рис. 5 показаны зависимости ширины главного лепестка (а) и максимального УБЛ (б) от числа строк N_y . Расчеты сделаны для решетки с параметрами $\Delta_x = \Delta_y = 0,3$; $P_x = P_y = 1$; $N_b = 40\%$; $D_x = 0,63\lambda$; $D_y = 0,7\lambda$; $N_x = 20$; $\theta_{mx} = \theta_{my} = 0$.

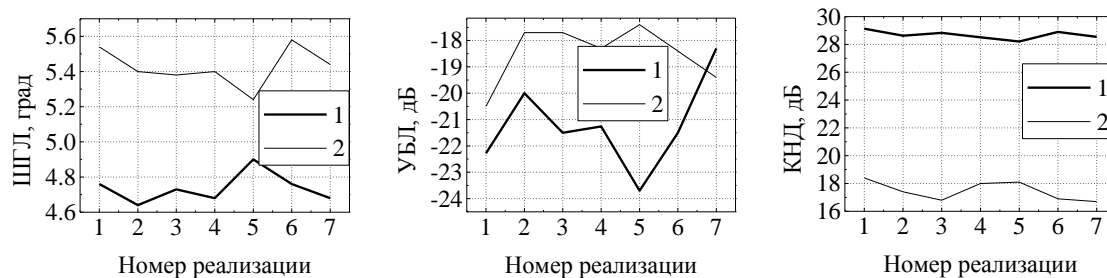


Рис. 4. Зависимость параметров решетки от номера реализации структуры расположения удаленных излучателей

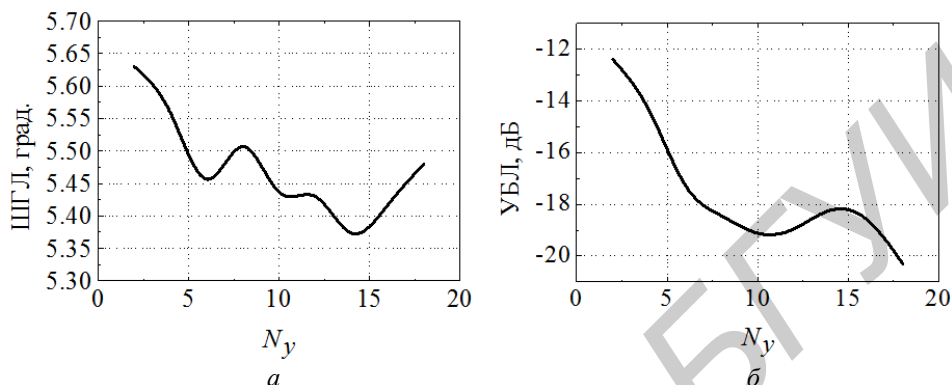


Рис. 5. Зависимость ширины главного лепестка (а) и максимального УБЛ (б) от числа строк N_y

В эквидистантной антенной решетке расстояния D_x и D_y должны удовлетворять условию единственности главного лепестка нулевого порядка при сканировании в заданном угловом секторе. При удалении части излучателей из раскрыва решетки ЭАР по случайному закону некоторые расстояния между излучателями становятся больше и могут не удовлетворять условию единственности главного лепестка, но дифракционные главные лепестки не появляются. С ростом N_b первые боковые лепестки меняются в небольших пределах, остальные боковые лепестки возрастают и как бы несколько «размазываются» по пространству углов. Это видно и на рис. 3.

Если условие единственности главного лепестка в ЭАР не выполняется, появляются побочные главные лепестки. Для случая $D_x = 1,5\lambda$; $D_y = 0,7\lambda$; $\Delta_x = \Delta_y = 0,3$; $P_x = P_y = 1$; $N_b = 0$; $N_x = N_y = 20$; $\theta_{mx} = \theta_{my} = 0$ диаграмма направленности показана на рис. 6, а. На рис. 6, б показана ДН той же решетки при $N_b = 60\%$. Как видно, боковые лепестки, расположенные между главными лепестками, в результате удаления излучателей «размазываются» (усредняются), а первые боковые лепестки, расположенные у главного лепестка нулевого порядка, даже уменьшаются. Но уровень дифракционных главных лепестков порядка ± 1 не меняется.

Излучатель директорная антенна. Приведенные выше результаты получены при использовании в качестве излучателя гипотетического излучателя шириной главного лепестка 60° , т.е. без учета взаимодействия излучателей между собой. Учет взаимодействия на характеристики разреженной решетки выполнен при использовании в качестве излучателя решетки директорной антенны с числом директоров N_d .

Использован метод моментов. Изучено взаимодействие каждого излучателя с ближайшим окружением. На рис. 7, а, б показаны рассчитанные ДН без учета взаимодействия в плоскости E (в плоскости XZ) – толстой линией и в плоскости H (в плоскости YZ) – тонкой линией: а – число директоров $N_d = 1$, б – число директоров $N_d = 3$. На рис. 7, в, г показаны ДН директорной антенны с $N_d = 1$ с учетом взаимодействия в составе фрагмента с M излучателями. Во фрагменте решетки, в котором учтено взаимодействие, возбуждается только один – центральный излучатель: (а) – $M = 9$, (б) – $M = 25$.

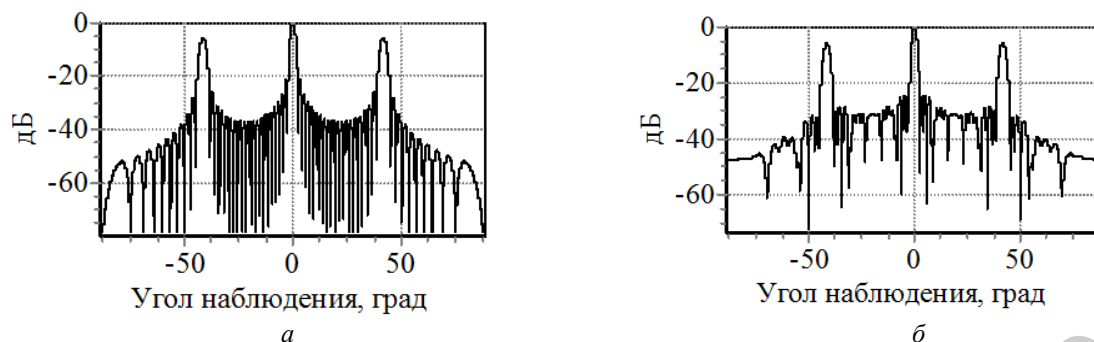


Рис. 6. ДН решетки с невыполненным условием единственности главного лепестка при $N_b = 0$ (а) и при $N_b = 60\%$ (б)

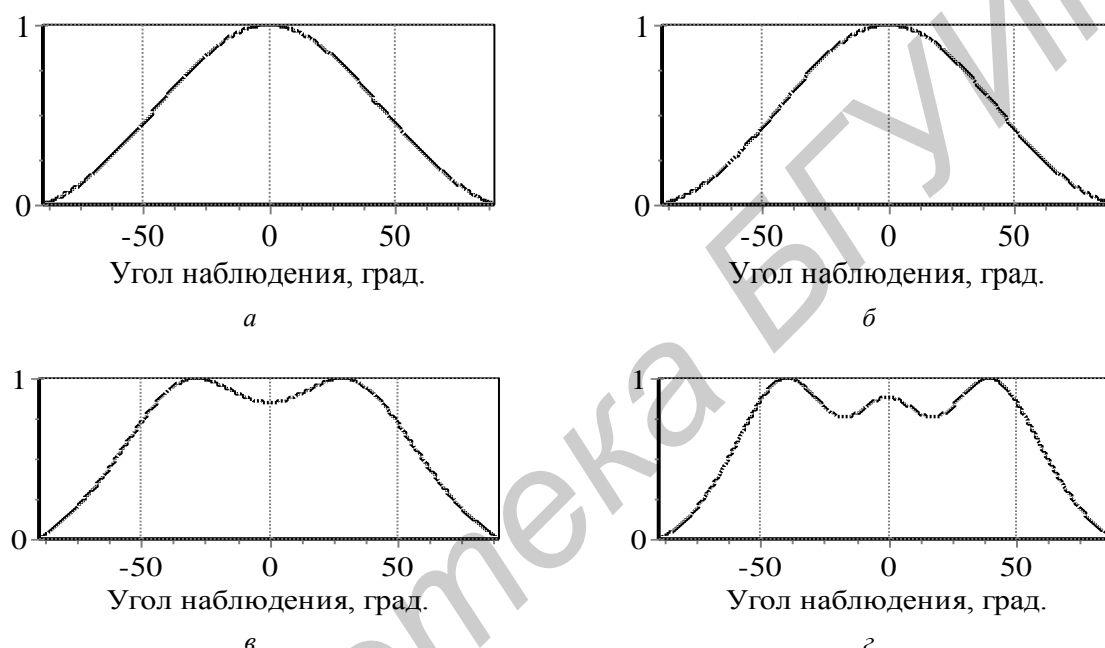


Рис. 7. ДН директорной антенны: без учета взаимодействия при $N_d = 1$ (а), $N_d = 3$ (б) и с учетом взаимодействия при $N_d = 1$: $M = 9$ (в), $M = 25$ (г)

Из результатов анализа вариантов решеток с различными исходными данными (число излучателей, амплитудное распределение возбуждения, угол сканирования, число удаленных излучателей, номер случайной реализации) следует, что максимальный уровень боковых лепестков практически не увеличивается при увеличении N_b .

Заключение

Проведенный анализ показал, что в разреженной решетке, полученной из эквидистантной решетки, в которой выполнено условие единственности главного лепестка, при удалении не менее 60% излучателей ширина главного лепестка и УБЛ решетки почти не меняются. Существенно уменьшается КНД, как и при всех других способах разрежения. Если в эквидистантной антенной решетке условие единственности главного лепестка не выполняется, после удаления части излучателей по случайному закону дифракционные главные лепестки не уменьшаются, несмотря на нарушение эквидистантности.

SCANNING OF SPARSE ANTENNA ARRAY WITH RANDOM DISTRIBUTION OF RADIATORS AT THE APERTURE

O.A. YURTSEV, I.F. SHALYAPIN

Abstract

The main regularities of planar rectangular sparse antenna array with a random radiators distribution at the aperture are analyzed.

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. *Заксон 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. *Андреанов В.И., Козлов К.В., Курочкин А.П. и др.* // Радиотехника. 2013. № 1. С. 97–100.
11. *Фельд Я.Н., Бененсон Л.С.* Основы теории антенн. М., 2007.
12. *Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Митры.* М., 1977.