

УДК 621.396

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛОСКИХ АКТИВНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С РАЗНОЙ ФОРМОЙ РАСКРЫВА ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ**

О.А. ЮРЦЕВ, А.П. ЮБКО, Д.В. МОСКАЛЕВ, Н.М. НАУМОВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 22 декабря 2011*

Сравниваются активные антенные решетки с прямоугольной, эллиптической и восьмиугольной формами раскрыва по мощности излучения при ограничении на максимальную мощность излучения одного приемо-передающего модуля. Условия сравнения: максимальная мощность излучения одного приемо-передающего модуля, основные параметры диаграммы направленности и коэффициент направленного действия одинаковы в решетках с разной формой раскрыва.

*Ключевые слова:* активная антенная решетка, форма раскрыва, энергетический показатель, численное моделирование.

**Введение**

При проектировании антенных решеток задаются требования к электрическим характеристикам и параметрам. Основными из них являются ширина главного лепестка диаграммы направленности (ДН) –  $2\theta_{0,5}$ , уровень максимального бокового лепестка –  $F_{bm}$ , средний уровень бокового излучения –  $F_{bs}$ , коэффициент направленного действия (КНД). Эти параметры зависят от амплитудного распределения возбуждения излучателей решетки (АР) и формы раскрыва решетки. В активных антенных решетках каждый излучатель в режиме передачи является нагрузкой своего усилителя мощности, и требуемое АР устанавливается изменением коэффициентов усиления усилителей. При спадающем к краям решетки АР, которое используется для уменьшения уровня боковых лепестков, в режиме максимальной мощности работает только один центральный или группа центральных усилителей. Поэтому общая мощность излучения уменьшается по сравнению с максимальной, соответствующей равномерному АР. В работе [1] решена задача синтеза амплитудного распределения возбуждения для линейной решетки, при котором потери мощности на излучение минимальны при заданном уровне боковых лепестков. В настоящей работе рассматривается вопрос об уменьшении потерь мощности путем выбора формы раскрыва решетки. Известно, что в решетках с формой раскрыва, отличной от прямоугольной, уровень боковых лепестков меньше, чем в прямоугольной, при одном и том же АР. В таких решетках заданный уровень боковых лепестков может быть обеспечен амплитудным распределением, более равномерным, что приведет к росту общей мощности излучения. С целью количественной оценки возможного энергетического выигрыша за счет изменения формы раскрыва проведено численное моделирование решеток с разной формой раскрыва – прямоугольной, эллиптической, восьмиугольной и сравнение их по следующему предлагаемому энергетическому показателю  $K_e = P_s / P_{1\max}$ , где  $P_s$  – полная мощность излучения решетки,  $P_{1\max}$  – максимальная мощность излучения одного приемо-передающего модуля активной решетки (ППМ).

## Методика теоретического анализа

Анализ производится численно. Для расчета ДН используется известное выражение [2]:

$$f(\theta, \varphi) = f_1(\theta, \varphi) \left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} \cdot \exp(i\Psi_{mn}) \exp(ik \cdot \delta r) \right|, \quad (1)$$

где  $f_1(\theta, \varphi)$  – ДН одного излучателя;  $\theta, \varphi$  – угловые координаты точки наблюдения в пространстве дальней зоны (угол  $\theta$  отсчитывается от нормали к плоскости решетки);  $M, N$  – число строк и столбцов решетки;  $m, n$  – номера строк и столбцов решетки;  $A_{mn}, \Psi_{mn}$  – нормированная к максимуму амплитуда и начальная фаза возбуждения излучателя, стоящего на пересечении строки с номером  $m$  и столбца с номером  $n$ ;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число свободного пространства;  $\lambda$  – длина волны;

$$\delta r = (m-1)D_m \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi + (n-1)D_n \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi, \quad (2)$$

где  $D_m, D_n$  – расстояния между соседними излучателями вдоль строк и столбцов.

Спадающее к краям решетки комбинированное амплитудное распределение  $A_{mn}$  задавалось в виде [3]:

$$A_{mn} = \left[ \Delta_m + (1 - \Delta_m) \sin^{P_m} \left( \pi \frac{m-1}{M-1} \right) \right] \left[ \Delta_n + (1 - \Delta_n) \sin^{P_n} \left( \pi \frac{n-1}{N-1} \right) \right], \quad (3)$$

где  $\Delta_m (\Delta_n)$  – уровни возбуждения крайних излучателей в строке (в столбце);  $P_m (P_n)$  – числа, характеризующие скорость спада амплитудного распределения от центра решетки к краю строки (столбца).

Фазовое распределение возбуждения излучателей считалось равномерным ( $\Psi_{mn}=0$ ). Сетка расположения излучателей – прямоугольная. Расстояние между соседними излучателями в строке и в столбце одинаково и равно  $D_m = D_n = D_0 = 0,57\lambda$ , что обеспечивает выполнение условия единственности главного максимума ДН при электронном сканировании в секторе углов  $\pm 40^\circ$ . В качестве излучателя использован полуволновый симметричный резонансный вибратор с линейным рефлектором. Диаграмма направленности одного излучателя  $f_1(\theta, \varphi)$  рассчитана методом моментов с использованием интегрального уравнения Поклингтона для тока в тонком проводнике [4]. При расчете  $f_1(\theta, \varphi)$  учтено влияние на активный излучатель с номером  $(n, m)$ , стоящий на пересечении строки с номером  $m$  и столбца с номером  $n$ , двумя кольцами окружения пассивными излучателями. На рис. 1 возбуждаемый излучатель с номером 13 отмечен жирной точкой. Пассивные излучатели нагружены на согласованные нагрузки.

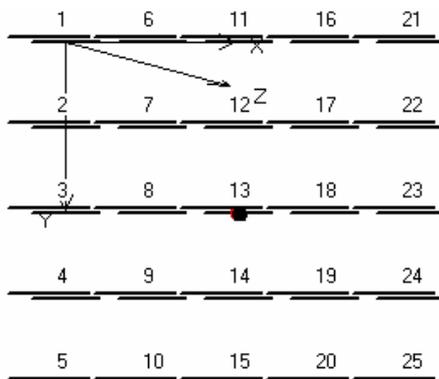


Рис. 1. Фрагмент решетки для учета взаимодействия

На рис. 2,а показана ДН в передней полусфере в плоскостях  $E$  и  $H$  с учетом взаимодействия, на рис. 2,б – без учета взаимодействия. Как видно, взаимодействие излучателей приводит к расширению главного лепестка ДН излучателя. Вследствие этого увеличиваются боковые лепестки ДН решетки, уменьшается КНД. Геометрические размеры используемого излучателя

оптимизированы по минимуму обратного излучения и обеспечивают на центральной частоте входное сопротивление 75 Ом. Математическая модель излучателя не учитывает наличие элементов крепления.

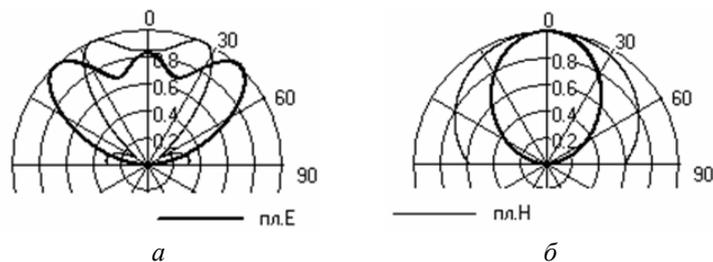


Рис. 2. ДН излучателя решетки: *а* – с учетом взаимодействия, *б* – без учета взаимодействия

Мощность излучения каждого приемо-передающего модуля решетки пропорциональна квадрату амплитуды электрического поля, возбуждающего излучатель. Поэтому энергетический показатель  $K_e = P_s / P_{1\max}$  определяется выражением:

$$K_e = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn}^2. \quad (4)$$

КНД решетки (далее обозначается символом  $D$ ) определяется с помощью известного выражения [2, 3]:

$$D = \frac{4\pi}{\int_0^\pi \int_0^{2\pi} F^2(\theta, \varphi) \sin \theta \cdot d\varphi \cdot d\theta}, \quad (5)$$

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

Как уже отмечалось, рассмотрены три формы раскрыва – прямоугольная, эллиптическая и восьмиугольная. Прямоугольный и эллиптический раскрывы задаются числом излучателей  $M$  и  $N$  (для эллиптического раскрыва вдоль главных диаметров). Восьмиугольная форма задается числом излучателей  $M$  и  $N$  и числом излучателей в усеченной части в углах прямоугольника вдоль кромки решетки –  $N_b$ .

### Результаты численного моделирования

Ниже на графиках представлены зависимости энергетического показателя  $K_e$  от числа излучателей для решеток с тремя указанными формами раскрыва при  $N=M$  и одинаковым амплитудным распределением в строках и в столбцах ( $\Delta_m = \Delta_n = \Delta$ ,  $P_m = P_n = P$ ). Для эллиптического и восьмиугольного раскрывов  $M$  – число излучателей в строке с максимальным числом излучателей.

Сравнение решеток проводилось при условии равенства ширины главного лепестка и уровня максимального бокового лепестка в решетках с разными формами раскрыва. В решетке с эллиптической формой раскрыва задавались параметры амплитудного распределения  $\Delta$  и  $P$ . Для обеспечения таких же параметров ДН в решетке с прямоугольной формой раскрыва подбирались новые значения  $\Delta$  и  $P$  и число излучателей в строке и в столбце. В решетке с восьмиугольной формой раскрыва использовались те же значения  $\Delta$  и  $P$ , что и в решетке с эллиптическим раскрывом, но подбирались значения числа излучателей  $N$  и  $N_b$ . При выполнении условия равенства параметров ДН определялся показатель  $K_e$  и КНД. При указанных условиях КНД почти одинаков в решетках с разными формами раскрыва.

Для иллюстрации закономерностей на рис.3 показаны зависимости от числа излучателей  $M$  энергетического показателя ( $K_e$ ) и коэффициента направленного действия ( $D$ ) для случая, когда в решетках с эллиптическим и восьмиугольным раскрывом амплитудное распределение равномерное ( $A_{mn} = 1$  или  $\Delta = 1$ ). В решетке с прямоугольным раскрывом амплитудное

распределение комбинированное, спадающее к краям с параметром  $P=1$ . Параметр  $\Delta$  в зависимости от числа излучателей в строке  $M$  меняется от 0,7 до 0,58. Это обеспечивало равенство уровня максимального бокового лепестка  $F_{bm}$  в решетках с разной формой раскрыва (уровень  $F_{bm}$  отличался на доли децибела в решетках с разной формой раскрыва). Обозначение кривых на рисунках: 1 – эллиптический раскрыв, 2 – прямоугольный раскрыв, 3 – восьмиугольный раскрыв.

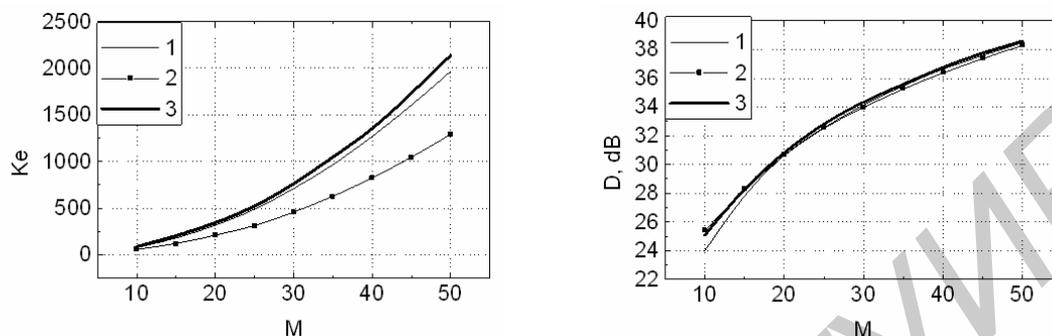


Рис. 3. Зависимость параметров решетки от числа излучателей в строке и формы раскрыва

Из рис. 3 следует, что КНД всех решеток примерно одинаков, но решетка с прямоугольным раскрывом проигрывает по энергетическому показателю. Решетка с прямоугольным раскрывом проигрывает также и по числу излучателей, что иллюстрируется рис. 4,а, на котором показана зависимость числа излучателей в решетке  $N_r$  от числа  $M$  излучателей в строке. Обозначение кривых на рисунке такое же, как на рис. 3. Решетка с восьмиугольным раскрывом по рассмотренным критериям имеет преимущества перед решетками с прямоугольной и эллиптической формами раскрыва.

Аналогичные закономерности имеют место в решетках с рассмотренными формами раскрыва и при других параметрах амплитудного распределения. На рис.4б показаны зависимости энергетического показателя  $K_e$  для решеток с разной формой раскрыва в зависимости от уровня максимального бокового лепестка  $F_{bm}$ . В качестве примера зависимости показаны для решеток с  $M=50$ . Обозначение кривых на рисунке такое же, как на рис.3.

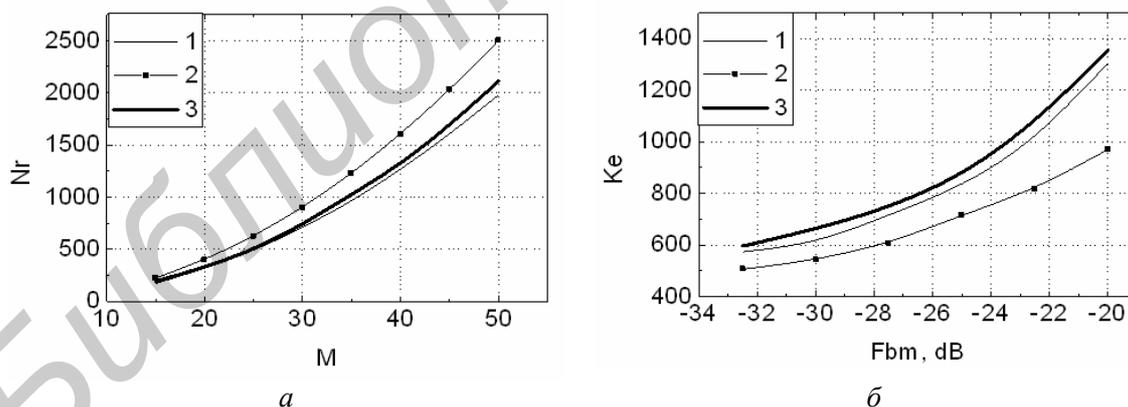


Рис. 4. Зависимость числа излучателей в решетке от  $M$  (а); зависимость коэффициента  $K_e$  от уровня боковых лепестков (б)

Решетка с восьмиугольным раскрывом имеет небольшое преимущество и по значению КНД. В то же время решетка с восьмиугольным раскрывом по сравнению с решеткой с эллиптическим раскрывом имеет и недостаток. Усечение прямоугольного раскрыва до восьмиугольного имеет смысл только в том случае, когда выполняется условие

$$N_b \leq \frac{\sqrt{2}}{4} M \text{ или } N_b \leq \frac{\sqrt{2}}{4} N, \quad (6)$$

где  $N_b$  – число излучателей на усеченной части на кромке раскрыва вдоль оси  $X(Y)$ . На рис. 5 для пояснения этого показаны три восьмиугольных раскрыва при  $N=M=32$ . Это связано с тем, что с увеличением  $N_b$  уменьшается уровень боковых лепестков в главных плоскостях  $XZ$  ( $\varphi=0$ ) и  $YZ$  ( $\varphi=90^\circ$ ) и возрастает в диагональной плоскости ( $\varphi=45^\circ$ ). При условии  $N_b = \frac{\sqrt{2}}{4}M$  уровень боковых лепестков в главных и диагональных плоскостях становится одинаковым. При этом все стороны восьмиугольника становятся одинаковыми. При  $N_b > \frac{\sqrt{2}}{4}M$  уровень боковых лепестков в диагональных плоскостях становится больше, чем в главных плоскостях. Рис. 6 иллюстрирует сказанное. На нем показаны формы решеток и соответствующие им ДН. На графиках ДН в диагональной плоскости ( $\varphi=45^\circ$ ) показаны серым цветом, в плоскости  $XZ$  – черным цветом. Как видно, при  $N_b=0,5M$  (рис. 7,б) плоскость  $XZ$  становится диагональной, и боковые лепестки в этой плоскости становятся минимальными.

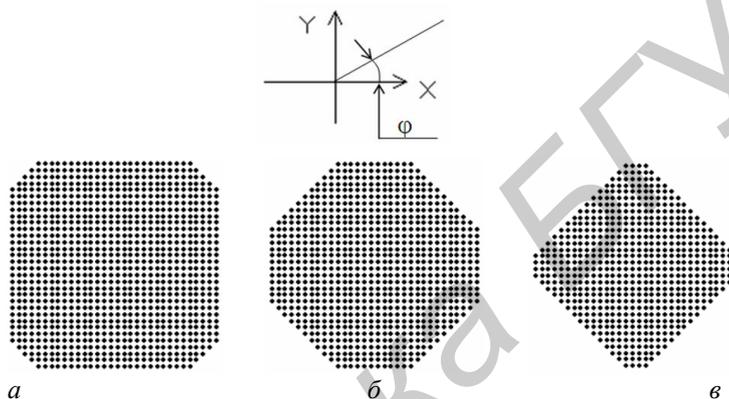


Рис. 5. Восьмиугольные решетки с разным числом излучателей на усеченной части:

$$a - N_b < \frac{\sqrt{2}}{4}M; \quad б - N_b = \frac{\sqrt{2}}{4}M; \quad в - N_b > \frac{\sqrt{2}}{4}M$$

При усечении углов решетки на величину  $N_b = \frac{\sqrt{2}}{4}M$  раскрыв становится восьмиугольным с равными сторонами. В этом случае в плоскостях  $\varphi=0$  и  $\varphi=45^\circ$  боковые лепестки в множителе системы решетки одинаковые. В диаграмме направленности различие будет за счет отсутствия осевой симметрии ДН одного излучателя (рис. 2). На рис. 7 показан этот случай: на рис. 7,а показан раскрыв решетки, на рис. 7,б – ДН решетки.

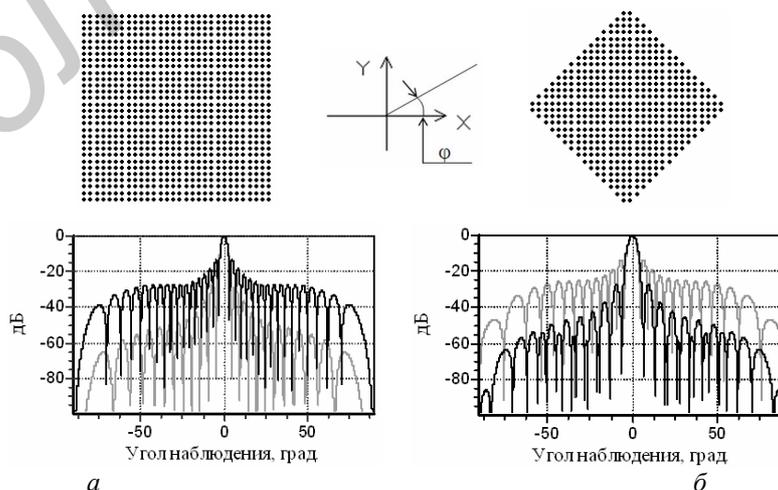


Рис. 6. ДН решетки с  $N=M=32$  и равномерным амплитудным распределением:

$$a - N_b=0; \quad б - N_b=16$$

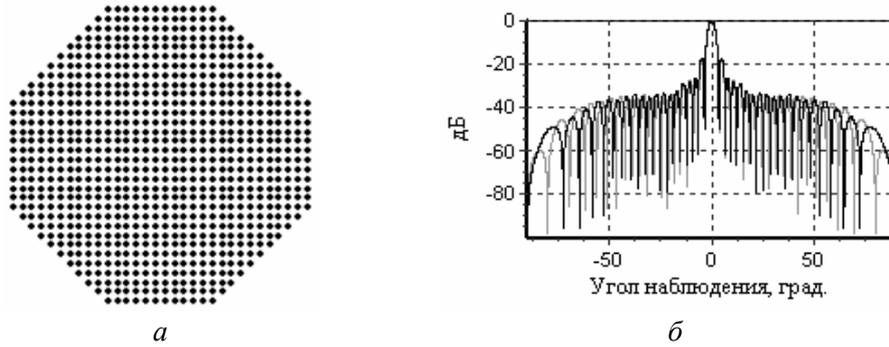


Рис. 7. Антенная решетка с  $N_b = \frac{\sqrt{2}}{4}M$  и равномерным амплитудным распределением:  
 а – раскрыв решетки; б – ДН решетки

Усечение углов решетки на величину  $N_b = \frac{\sqrt{2}}{4}M$  приводит к уменьшению уровня боковых лепестков в главных плоскостях. Например, при равномерном исходном амплитудном распределении возбуждения излучателей и  $N=M$  (раскрыв квадратный) уровень боковых лепестков уменьшается с  $-13,2$  дБ до  $-18,9$  дБ. В решетке с круглой формой раскрыва уровень боковых лепестков составляет  $-17,3$  дБ. В этом случае восьмиугольная решетка имеет преимущества перед решеткой с круглой апертурой. Если раскрыв прямоугольный ( $N \neq M$ ) преимущество решетки с восьмиугольной формой раскрыва теряется по сравнению с решеткой с эллиптической формой раскрыва. Так, при  $N=0,5M$  в решетке с  $N_b=0,5N$  (решетка шестиугольная – рис. 8) боковые лепестки снижаются только до значения  $-16,5$  дБ при равномерном АР. При таком же АР в решетке с  $N=0,5M$  и эллиптической формой раскрыва (рис.8) уровень боковых лепестков составляет по-прежнему  $-17,2$  дБ. При соотношении  $M/N=0,25$  и  $N_b=0,5N$  в решетке с шестиугольным раскрывом при равномерном АР уровень  $F_{bm}$  снижается всего на  $0,6$  дБ по сравнению с прямоугольным раскрывом, а в решетке с эллиптическим раскрывом – на  $3,5$  дБ. Примерно такие же закономерности наблюдаются и при других амплитудных распределениях.

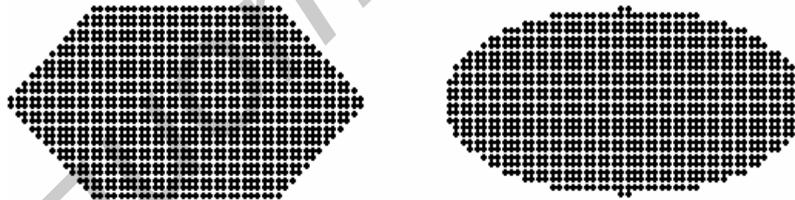


Рис. 8. Решетки с шестиугольной и эллиптической формами раскрыва

### Заключение

Рассмотрен энергетический показатель эффективности активной антенной решетки при ограничении на максимальную мощность излучения одного приемо-передающего модуля – коэффициент  $K_e$ , равный отношению полной мощности излучения решетки к максимальной мощности излучения одного приемо-передающего модуля. Коэффициент  $K_e$  характеризует степень использования потенциальной мощности активной решетки. Исследовано влияние на  $K_e$  формы раскрыва, амплитудного распределения возбуждения излучателей решетки, числа излучателей. Показано, что по этому показателю решетка с прямоугольной формой раскрыва уступает решеткам с эллиптической и восьмиугольной формами раскрыва. При равенстве числа излучателей вдоль главных сторон (или диаметров) раскрыва решетка с восьмиугольным раскрывом имеет преимущества перед решеткой с круглым раскрывом. Однако это преимущество исчезает при увеличении отношения числа излучателей вдоль главных сторон (или диаметров) раскрыва, т.е. с увеличением отношения ширины главного лепестка в главных плоскостях.

# COMPARATIVE ANALYSIS OF FLAT PHASED ARRAY ANTENNAS WITH VARIOUS APERTURE FORMS ON ENERGY CRITERION

O.A. YURTSEV, A.P. YUBKO, D.V. MOSKALIOV, N.M. NAUMOVICH

## Abstract

Active antenna array antennas with rectangle, elliptical and octagonal aperture forms are compared on radiation power criterion, if maximum power of each element is limited. Comparison conditions: maximum radiation power of each transmitter-receiver module (TRM) and main radiation pattern parameters are equal for all investigated array antennas.

## Список литературы

1. *Гостюхин В.Л., Трусов В.Н., Гостюхин А.В.* // Антенны. 2009. №3. С. 10.
2. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ. М., 1988.
3. *Ямайкин В.Е.* Антенные устройства. Мн., 1965.
4. *Митра Р.* Вычислительные методы в электродинамике. М., 1977.

Библиотека БГУИР