

УДК 621.396.677

ПАРАМЕТРЫ КОЛЬЦЕВОЙ И МНОГОУГОЛЬНОЙ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ПРИ КОНФОРМНОМ И ФАЗОВОМ СКАНИРОВАНИЯХ

Д.В. МОСКАЛЕВ

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

Поступила в редакцию 29 ноября 2011

Исследуется влияние ширины диаграммы направленности (ДН) элементарного излучателя (ЭИ) на параметры ДН кольцевой, многоугольной и линейной антенных решеток (КАР, МАР и ЛАР) в широком диапазоне фазового сканирования. Приводится сравнение вышеуказанных антенных решеток по степени влияния фазового сканирования на их электрические характеристики. Анализируется влияние случайной ошибки фазового распределения в указанных типах решеток на их параметры. Показано, что при наличии таких ошибок МАР по своим электрическим параметрам не уступает КАР.

Ключевые слова: многоугольная антенная решетка, кольцевая антенная решетка, фазовое сканирование, случайная фазовая ошибка.

Введение

Использование кольцевых и цилиндрических антенных решеток позволяет преодолеть ряд трудностей при создании широкоугольных сканирующих антенн и обеспечивает радиотехническому устройству ряд преимуществ на уровне системы. В то же время, с конструктивной точки зрения, производство многоугольных и многогранных решеток практичнее, нежели кольцевых и цилиндрических.

Кольцевые и цилиндрические антенные решетки относятся к классу выпуклых антенн. Анализу таких антенн посвящено довольно большое число работ [например, 1–7]. Но, несмотря на наличие ряда публикаций по выпуклым антеннам и антенным решеткам, ряд вопросов, с которыми приходится иметь дело разработчику, особенно на этапе выбора типа антенной решетки и параметров ее основных элементов, рассмотрен недостаточно или не рассмотрен совсем. К числу таких вопросов относятся: влияние числа граней многогранной решетки с конформным и фазовым сканированием в целом в решетке и в активной области, используемой для формирования одного луча, на параметры диаграммы направленности. Сравнительный анализ кольцевых, многогранных и линейных решеток по степени влияния угла фазового сканирования и случайных фазовых ошибок возбуждения излучателей на параметры диаграммы направленности и ряд других вопросов. Далее часть таких вопросов исследуется путем численного моделирования КАР и МАР. Результаты сравниваются с линейной антенной решеткой. Исследования проведены для решеток из изотропно излучающих элементов, т.е. при численном моделировании не учитывается взаимодействие излучателей между собой в составе решетки.

Цель данной работы – сравнить КАР и МАР по параметрам ДН при фазовом сканировании, оценить влияние ширины ДН ЭИ на электрические характеристики КАР и МАР, исследовать влияние случайных ошибок фазового распределения возбуждения решеток на их ДН.

Программа численного моделирования

Для выполнения расчетов параметров МАР и КАР разработана программа моделирования. Программа позволяет рассчитывать ДН указанных типов решеток и ее параметры. ДН по полю вычисляется с помощью следующего выражения:

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^{n=M} ARn \cdot F_n(\theta) \cdot U_n \cdot \exp[i(Phi_n(\theta_m) - Phi_n(\theta) + Fe)], \quad (1)$$

где M – количество активных (возбуждаемых в режиме передачи) излучателей, ARn – нормированная амплитуда возбуждения n -го излучателя, $F_n(\theta)$ – нормированная ДН ЭИ, U_n – сигнал, подводимый к излучателю с номером n , i – мнимая единица. От каждого активного излучателя геометрическая длина пути до точки в дальней зоне различная. Разницу в фазовых набеггах для каждого излучателя учитывает коэффициент $Phi_n(\theta)$, θ – угол наблюдения, θ_m – направление главного максимума. Из (1) видно, что в направлении главного максимума колебания излучателей складываются синфазно. Случайная ошибка фазового распределения возбуждения излучателя Fe расположена в интервале $0 \leq Fe \leq Fe_{\max}$. Закон распределения вероятности величины Fe равномерный. При учете влияния Fe на ДН решеток, рассчитываются K случайных реализаций $F_n(\theta)$. Средняя ДН по мощности $F^2(\theta)$ рассчитывается в соответствии с (2). Исследуются параметры средней ДН $F^2(\theta)$.

$$F^2(\theta) = \frac{|F_1(\theta)|^2 + |F_2(\theta)|^2 + \dots + |F_K(\theta)|^2}{K}. \quad (2)$$

Анализ влияния ширины ДН ЭИ на параметры МАР, КАР и ЛАР

Далее будет использоваться понятие эквивалентной линейной решетки (ЭЛР). Под ЭЛР КАР (МАР) понимается фиктивная линейная решетка, размещенная на линии, которая параллельна фазовому фронту излучения МАР (КАР). Излучатели ЭЛР образованы проецированием излучателей КАР (МАР) на эту линию (рис. 1).

При исследовании влияния ширины ДН ЭИ на электрические характеристики различных типов решеток, их геометрические параметры варьировались в широком диапазоне, использовались различные амплитудные распределения возбуждения. В этой статье для иллюстрации основных свойств и закономерностей использовались решетки, геометрические параметры которых описаны ниже. Радиус МАР и КАР $R = 24\lambda$, где λ – длина волны в свободном пространстве. Длина ЭЛР МАР и КАР $Le = 33\lambda$. МАР состоит из $N = 16$ граней по 16 излучателей на каждой грани, активные – 4 грани. КАР состоит из 261 излучателя, 65 из которых – активные. Длина ЛАР $L = Le = 33\lambda$. Расстояние между излучателями во всех типах решеток $d = 0,55\lambda$. В решетке использовано спадающее к краям амплитудное распределение возбуждения излучателей типа

$$ARn = \Delta + (1 - \Delta) \cdot \left(\cos \left(\frac{p \cdot z_n}{Le} \right) \right)^p, \quad (3)$$

где z_n – координата проекции излучателя на ЭЛР, Le – длина эквивалентной линейной решетки, Δ – нормированная амплитуда возбуждения крайних излучателей в решетке. Далее результаты моделирования приведены для значений $p = 2$ $\Delta = 0,2$.

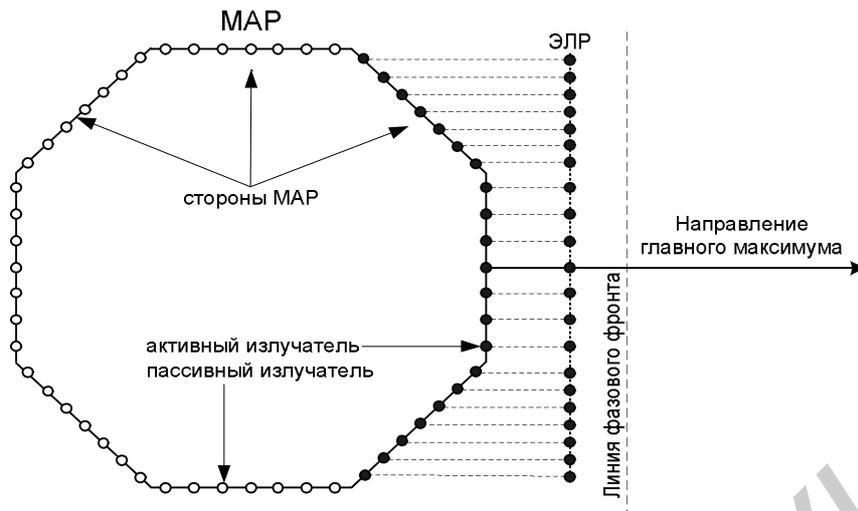


Рис. 1. Схема МАР

На рис. 2 приведены зависимости максимального уровня боковых лепестков F_{bm} и ширины главного лепестка ДН $2\Theta_{0.5}$ решетки в зависимости от ширины главного лепестка ДН одного излучателя $2\Theta_{0.5i}$ для МАР и КАР.

Из рис. 2 следует, что с увеличением $2\Theta_{0.5i}$ для КАР и МАР значение $2\Theta_{0.5}$ уменьшается. Уровень максимального бокового излучения F_{bm} в МАР с расширением ДН ЭИ падает, а в КАР растет. Эти два уровня стремятся к одному значению при увеличении $2\Theta_{0.5i}$, начиная с некоторого значения. При анализе зависимостей на рис. 2 необходимо иметь в виду следующие особенности, характерные для МАР и КАР.

1. При малых значениях $2\Theta_{0.5i}$ крайние излучатели МАР и КАР слабо влияют на формирование ДН из-за малости коэффициентов усиления в направлении излучения.

2. При больших значениях $2\Theta_{0.5i}$ излучатели, расположенные на крайних сторонах активной зоны, вносят ощутимый вклад в формирование ДН. Т.к. крайние стороны МАР располагаются под некоторым углом к линии расположения ЭЛР, то плотность излучателей на краях ЭЛР возрастает. Это приводит к эффекту возрастания амплитудного распределения на краях ЭЛР.

Учитывая эти две особенности, можно говорить, что при увеличении $2\Theta_{0.5i}$ крайние излучатели в МАР и КАР включаются постепенно в формирование ДН (F_{bm} и $2\Theta_{0.5}$ уменьшаются). После некоторого значения $2\Theta_{0.5i}$ начинает проявляться эффект возрастающего к краям АР. Известно, что при возрастании АР на краях решетки F_{bm} увеличивается, а $2\Theta_{0.5}$ падает, что и подтверждают рис. 2.

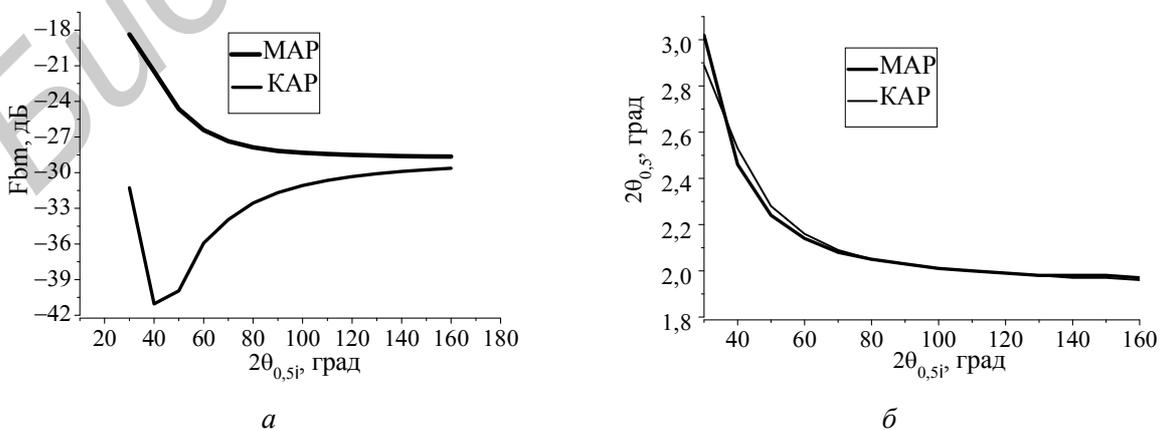


Рис.2. Зависимости F_{bm} (а) и $2\Theta_{0.5}$ (б) в МАР и КАР от $2\Theta_{0.5i}$

Зависимости на рис. 2 приводятся для случая, когда угол фазового сканирования $Fa = 0$. Представляет интерес сравнение параметров ДН различных типов антенных решеток в диапазоне фазового сканирования. На рис. 3–5 представлены зависимости F_{bm} и $2\Theta_{0,5}$ от величины угла фазового сканирования Fa для $2\Theta_{0,5i} = 60^\circ, 90^\circ$ и 120° для МАР, КАР и ЛАР соответственно.

Для всех типов решеток характерно то, что с увеличением угла сканирования Fa ширина главного луча увеличивается и растет уровень бокового излучения. Анализ зависимостей на рис. 5 показывает, что параметры ДН ЛАР при фазовом сканировании слабо зависят от величины $2\Theta_{0,5i}$. В МАР и КАР влияние $2\Theta_{0,5i}$ на ДН проявляется значительно сильнее (рис. 3, 4). При увеличении $2\Theta_{0,5i}$ главный лепесток ДН сужается, параметр F_{bm} минимален при некоторой оптимальной ширине $2\Theta_{0,5i}$. С увеличением $2\Theta_{0,5i}$ проявляется эффект возрастания амплитудного распределения к краям решетки и F_{bm} растет. Таким образом, при выборе ширины ДН ЭИ для решетки возникает необходимость компромисса между параметрами $2\Theta_{0,5}$ и F_{bm} .

Следует заметить, что в области малых Fa , где побочный дифракционный максимум еще не проявляется, при росте $2\Theta_{0,5i}$ увеличение F_{bm} незначительно и составляет несколько дБ. Поэтому в решетках с небольшим сектором фазового сканирования использование излучателей с широкой ДН целесообразно как в КАР, так и в МАР.

Выполнено сравнение МАР, КАР и ЛАР с одинаковой длиной ЭЛР по влиянию фазового сканирования на ДН. Исследование проводилось для кольцевых и многоугольных антенных решеток с различными радиусами и количеством активных сторон. Ширина ДН элементарного излучателя $2\Theta_{0,5i} = 90^\circ$. Для примера, на рис. 6 приводятся зависимости F_{bm} и $2\Theta_{0,5}$ от Fa для ранее описанных МАР, КАР и ЛАР. Исследование показало, что в области малых углов сканирования у всех типов решеток параметр $2\Theta_{0,5}$ практически одинаков. Однако при дальнейшем увеличении угла сканирования Fa главный лепесток ДН расширяется медленнее у МАР и КАР, если сравнивать с ЛАР.

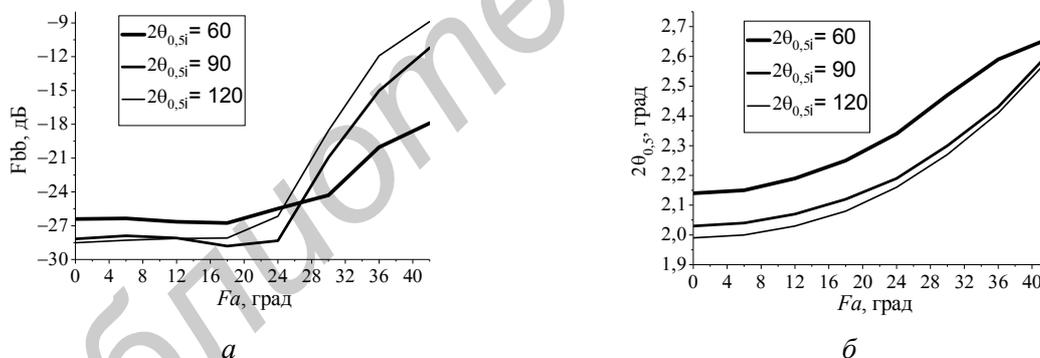


Рис. 3. Зависимости F_{bm} (а) и $2\Theta_{0,5}$ (б) от Fa для различных $2\Theta_{0,5i}$ в МАР

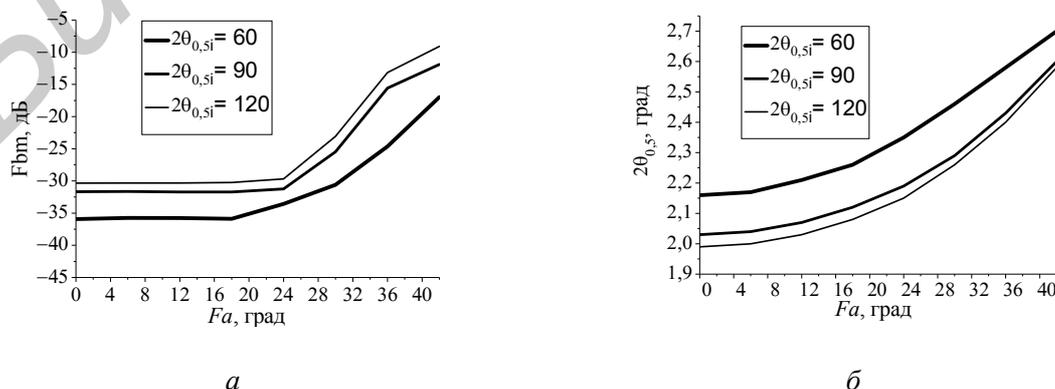


Рис. 4. Зависимости F_{bm} (а) и $2\Theta_{0,5}$ (б) от Fa для различных $2\Theta_{0,5i}$ в КАР

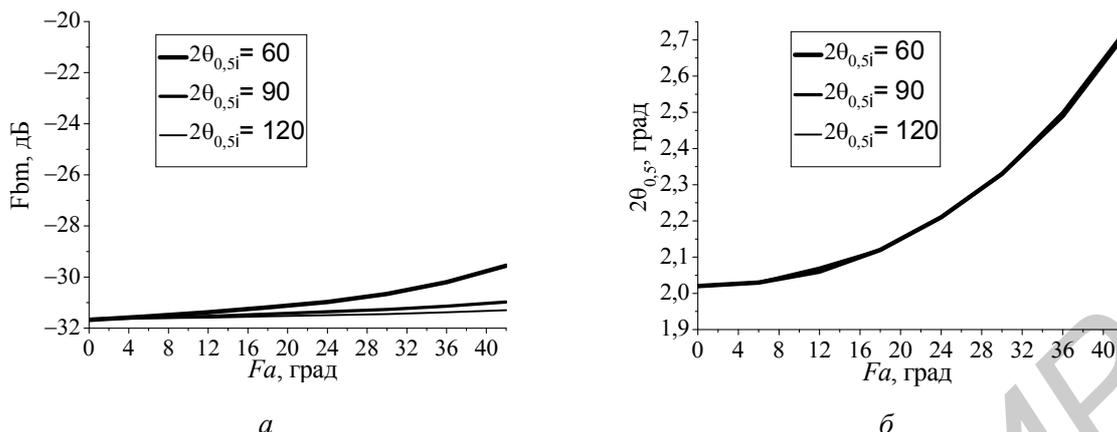


Рис. 5. Зависимости F_{bm} (а) и $2\Theta_{0,5}$ (б) от Fa для различных $2\Theta_{0,5i}$ в ЛАР

В приведенном диапазоне сканирования решеток ($0^\circ < Fa < 42^\circ$), максимальный уровень бокового излучения F_{bm} наименьший у линейной решетки, а наибольший у многоугольной решетки. В области малых углов сканирования параметры КАР очень близки к параметрам ЛАР (рис 7,б). Таким образом, по параметру F_{bm} КАР выигрывает у МАР.

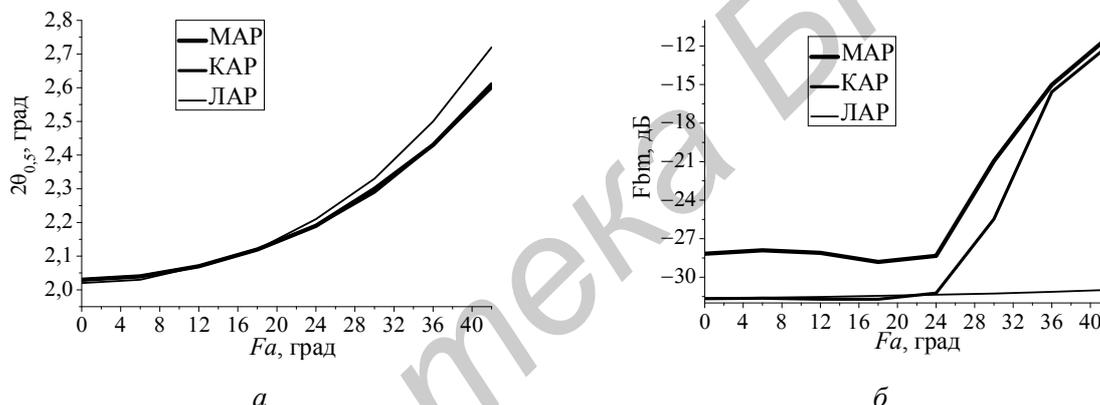


Рис. 6. Зависимость $2Q_{0,5}$ (а) и F_{bm} (б) от Fa для МАР, КАР и ЛАР

Анализ влияния случайных ошибок фазового распределения на ДН МАР, КАР и ЛАР

В радиотехнической системе существует множество факторов, которые влияют на фазовое распределение возбуждения излучающей поверхности антенны. Среди тех факторов, которые могут вносить нестабильность в фазовое распределение возбуждения, можно выделить следующие [6]:

- технологический разброс параметров излучателей при их производстве;
- нестабильность фазовых характеристик в приемных и передающих каналах из-за воздействия различных внутренних и внешних факторов;
- взаимное влияние излучателей;
- ошибки учета фазовых характеристик излучателей (например, из-за погрешностей измерения) при фазовой юстировке активных антенных решеток и другие факторы.

Численно исследовано влияние случайной ошибки фазового распределения F_e на ДН МАР, КАР и ЛАР. При оценке уровня бокового излучения используется такой параметр как максимальный боковой лепесток средней диаграммы направленности по мощности F_{bm} . На рис. 7 приведена зависимость F_{bm} от величины максимальной фазовой ошибки $F_{e\max}$ (при этом $F_{e\min} = 0$) в излучателях МАР, КАР и ЛАР.

Из рис. 7 следует, что с увеличением $F_{e\max}$ уровни F_{bm} во всех типах решеток сходятся к одному значению. Уже при значении $F_{e\max} = 40^\circ$ уровень F_{bm} у ЛАР и КАР отличается от уровня F_{bm} МАР меньше чем на 1 дБ. Это говорит о том, что наличие небольшой фа-

зовой ошибки сводит на нет преимущества кольцевой и линейной антенных решеток перед многоугольной решеткой по значению уровня бокового излучения. Предыдущее утверждение справедливо для различных углов фазового сканирования. На рис. 7,б приведены аналогичные зависимости для $Fa = 15^\circ$. Видно, что закономерность сохраняется. Исследование также показало, что величина $F_{e\max}$ практически не влияет на ширину ДН $2\Theta_{0,5}$ всех типов решеток.

Заключение

Для улучшения параметров в КАР и МАР целесообразно использовать ЭИ с широким главным лепестком ДН. При фазовом сканировании в небольшом секторе у всех типов решеток луч расширяется одинаково, но МАР уступает КАР и ЛАР по уровню бокового излучения. Исследование случайной ошибки фазового возбуждения показало, что при максимальной фазовой ошибке $F_{e\max} > 40^\circ$ уровень максимального бокового излучения в КАР, МАР и ЛАР практически выравнивается. Таким образом, можно утверждать, что многоугольная решетка с количеством сторон $N = 16$ практически не уступает по своим электрическим характеристикам кольцевой решетке. В то же время производство МАР практичнее производства КАР по технологическим и конструктивным причинам.

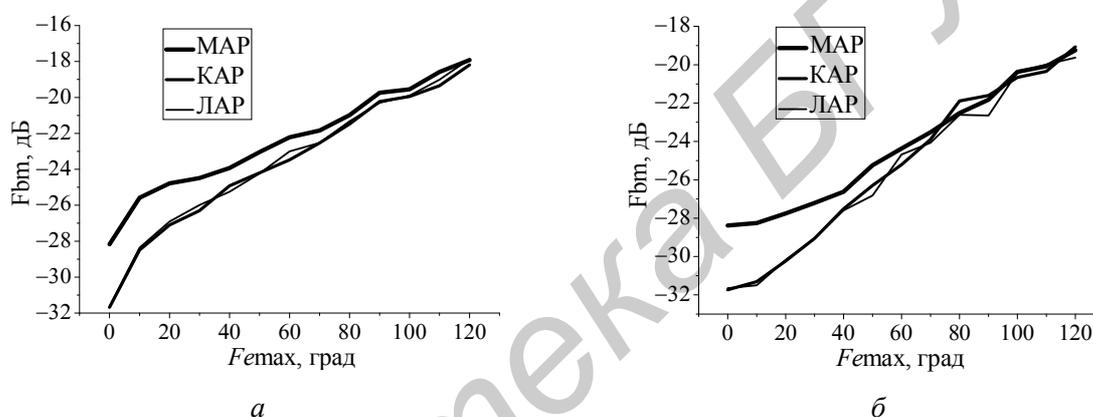


Рис. 7. Зависимость F_{bm} от $F_{e\max}$ для $Fa = 0^\circ$ (а) и $Fa = 15^\circ$ (б) для МАР, КАР и ЛАР

THE PARAMETERS OF RING AND MULTIFACETED ANTENNA ARRAYS DURING CONFORMAL AND PHASE SCANNING

D.V. MOSKALIOV

Abstract

The results of studying and phase scanning regularities in ring and multifaceted antenna arrays are presented. The influence of elementary radiator main lobe width to antenna patterns parameters of ring, multifaceted and linear antenna arrays in a wide range of phase scanning is analyzed. The comparison of phase scanning influence degree on the parameters of above-mentioned antenna arrays is given. The influence of phase distribution random error on the antenna arrays parameters is analyzed.

Литература

1. Воскресенский Д.И., Гудзенко А.И. // Изв. Вузов СССР. Радиоэлектроника. 1967. №2. С.127.
2. Головачев В.И., Кузьмин А.А. // Антенны. 1969. №5. С. 82–95.
3. Гринев А.Ю., Пономарев Л.И. // Радиоэлектроника. 1971. №12. С. 1444–1452.
4. Пономарев Л.И., Юспрайх И.С. // Антенны. 1972. №16. С. 53–66.
5. Воскресенский Д.И., Пономарев Л.И., Филлипов В.С. Выпуклые сканирующие антенны. М., 1978.
6. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. М., 1970.
7. Lars Josefsson, Patric Persson. IEEE Press Series on electromagnetic wave theory. 2006.