

УДК 621.396.677

## ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ОШИБОК ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОГРАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Д.В. МОСКАЛЕВ

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

Поступила в редакцию 14 ноября 2011

Рассматривается влияние случайных ошибок различного типа на диаграмму направленности и коэффициент направленного действия многогранной антенной решетки. Исследуется поведение таких параметров, как среднее значение максимального коэффициента направленного действия, среднее значение максимального бокового лепестка и величина флуктуаций главного максимума при наличии случайных ошибок. Многогранные антенные решетки с различным радиусом сравниваются между собой и с плоской антенной решеткой.

*Ключевые слова:* антенная решетка, случайная ошибка.

### Введение

Исследованию влияния случайных ошибок на параметры антенных решеток посвящен ряд работ, например [1–4]. В настоящей статье, в отличие от известных работ, анализ влияния случайных ошибок производится численно без наложения каких-либо ограничений на число излучателей и величину ошибки. Необходимо отметить, что в известных работах статистический анализ, в основном, касался плоских антенных решеток с прямоугольным и круглым раскрывом и кольцевых антенных решеток. Статистический анализ многогранной антенной решетки (МАР) произведен не был. Среди случайных ошибок можно выделить следующие:

- 1) случайные ошибки в положении излучателей в раскрыве МАР;
- 2) случайные ошибки по амплитуде в каналах обработки сигнала – в приемопередающих модулях (приемо-передающий модуль – ППМ – это излучатель-преобразователь-усилитель);
- 3) случайные ошибки по фазе в ППМ.

Влияние этих факторов на характеристики МАР рассматривается ниже.

### Математическая модель МАР

Для выполнения расчетов параметров МАР разработана программа моделирования. Программа позволяет рассчитывать диаграмму направленности (ДН) и ее параметры для МАР. ДН вычисляется с помощью следующего выражения:

$$\dot{U}(\theta) = \sum_{n=1}^{n=M} AR_n \cdot F_n(\theta) \cdot \exp[j(Phi_n(\theta_m) - Phi_n(\theta))], \quad (1)$$

где  $M$  – количество активных (возбуждаемых в режиме передачи) излучателей,  $AR_n$  – нормированная амплитуда возбуждения  $n$ -го излучателя,  $F_n(\theta)$  – нормированная ДН  $n$ -го элементарного излучателя,  $j$  – мнимая единица. От каждого активного излучателя геометрическая длина пути до точки в дальней зоне различная. Эту разницу в фазовых набегах для каждого излучате-

ля учитывает коэффициент  $Phi_n(\theta) = Rn(\theta)/\lambda \cdot 2\pi$ , где  $Rn(\theta)$  – расстояние от  $n$ -го излучателя до точки в дальней зоне,  $\lambda$  – длина волны,  $\theta$  – угол наблюдения,  $\theta_m$  – направление главного максимума. Из (1) следует, что в направлении главного максимума колебания излучателей складываются синфазно.

Фазовое распределение возбуждения излучателей выбиралось, исходя из условия фокусировки луча в заданном направлении. Сетка расположения излучателей – прямоугольная. В качестве излучателя использовался гипотетический излучатель с задаваемой шириной главного лепестка ДН.

Коэффициент направленного действия (КНД) решетки (далее обозначается символом  $D$ ) определялся с помощью известного выражения [5]:

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

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

В решетке используется спадающее к краям амплитудное распределение (АР) возбуждения излучателей типа

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

где  $z_n$  – координата проекции излучателя на ЭЛР,  $Le$  – длина эквивалентной линейной решетки,  $\Delta$  – нормированная амплитуда возбуждения крайних излучателей в решетке.

### Влияние случайных ошибок в положении излучателей на ДН МАР

Моделирование многогранной антенной решетки проводилось при различных радиусах и различном количестве активных граней, участвующих в формировании ДН решетки. При этом общим параметром для всех решеток являлась длина эквивалентной линейной решетки, равная  $25\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве. Вдоль каждой грани располагаются столбцы излучателей, расстояние между столбцами  $d$  удовлетворяет условию единственности главного максимума диаграммы направленности при сканировании в секторе углов  $-40^\circ \dots 40^\circ$ . Поэтому ширина главного лепестка ДН одного излучателя при моделировании выбрана равной  $2\theta_{0,5} = 80^\circ$ . В качестве примера основные закономерности влияния случайных ошибок в положении излучателей на характеристики МАР далее рассмотрены для МАР с четырьмя активными гранями. Радиус МАР составляет  $18\lambda$ . Эта МАР в тексте условно называется МАР1. Для выяснения влияния радиуса МАР на чувствительность к случайным ошибкам приведены также результаты для МАР2, у которой активными являются 2 грани, радиус МАР2 составляет  $35\lambda$ . МАР1 и МАР2 имеют одинаковую длину эквивалентной линейной антенной решетки и сравниваются между собой и с плоской антенной решеткой (ПАР). Приведенные ниже примеры соответствуют частоте 9400 МГц. На этой частоте была спроектирована реальная МАР.

На рис. 1 показаны ДН решетки при отсутствии ошибок для двух амплитудных распределений, параметры которых равны  $\Delta = 1, p = 1$  (равномерное АР) и  $\Delta = 0,3; p = 1$ . Эти ДН можно использовать для сравнения с другими ДН, рассчитанными при наличии случайных ошибок какого-либо типа. Рис. 1,а соответствуют параметрам ДН: величина максимального бокового лепестка  $F_{bm} = -13,85$  дБ, значение КНД = 36,6 дБ. ДН на рис. 1,б имеет параметры:  $F_{bm} = -21,49$  дБ,  $D = 36,45$  дБ.

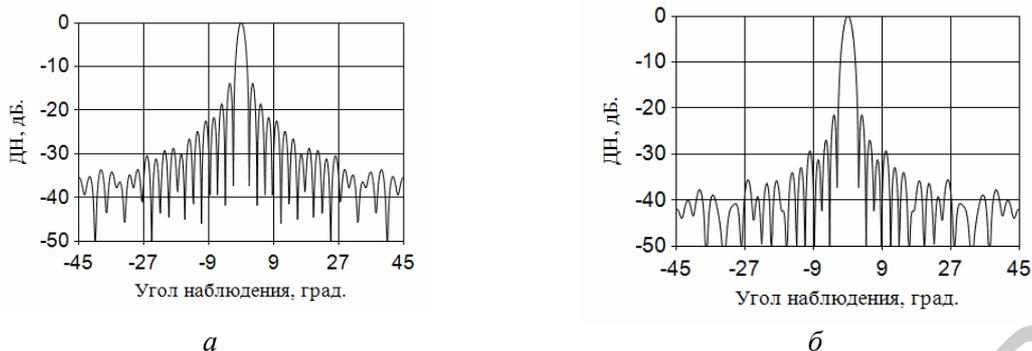


Рис. 1. ДН решетки при отсутствии случайных ошибок:  $a - \Delta = 1, p = 1$ ;  $b - \Delta = 0,3, p = 1$

Случайные ошибки положения излучателей вычислялись по заданным максимальным ошибкам положения излучателей вдоль трех координатных осей  $DR_x, DR_y, DR_z$ . На рис. 2 приведены случайные реализации ДН для случая  $DR' = 0,2$ . Параметр  $DR' = DR / \lambda$ , где  $DR$  задавалось одинаковым по всем осям  $DR = DR_x = DR_y = DR_z$ . Сравнение ДН на рис. 2 с ДН на рис. 1 говорит о том, что главный лепесток изменился мало, но увеличился уровень бокового излучения во всем диапазоне углов, что привело к уменьшению КНД.

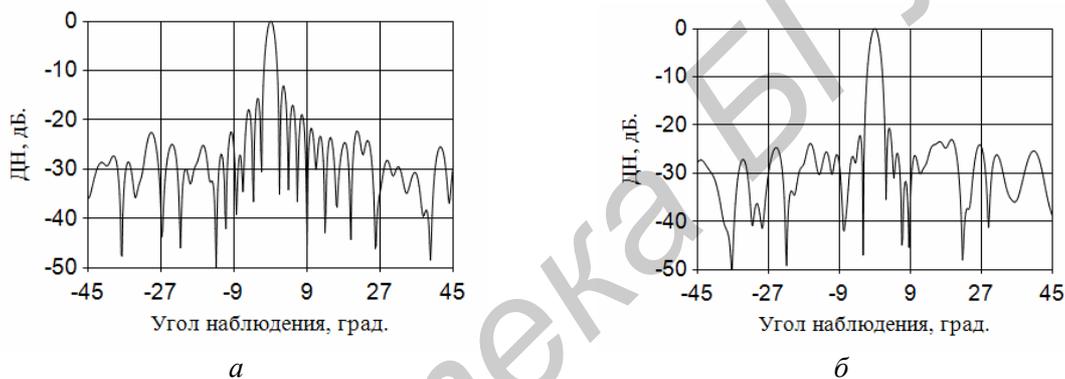


Рис. 2. ДН решетки при  $DR' = 0,2$ :  $a - \Delta = 1, p = 1$ ;  $b - \Delta = 0,3, p = 1$

На рис. 3 приведены средние диаграммы направленности. Усреднение произведено по 100 реализациям. Как отмечено в [1], при статистической оценке максимального КНД надо различать максимальное значение среднего КНД и среднее значение максимального КНД. При вычислении эти значения определялись так: первый параметр определялся по средней ДН, второй определялся усреднением после нахождения максимального КНД для каждой реализации. Второе значение далее обозначается символом  $D'$ . Аналогичное обозначение использовано для среднего значения максимального УБЛ –  $F'_{bm}$ . На рис. 4,  $a$  и  $b$  приведены зависимости  $dD'$  и  $dF'_{bm}$  от  $DR'$ , где  $dD'$  и  $dF'_{bm}$  – зависимости ухудшения параметров  $D'$  и  $F'_{bm}$  соответственно. Результаты приведены для амплитудного распределения с параметрами  $\Delta = 0,3, p = 1$ .

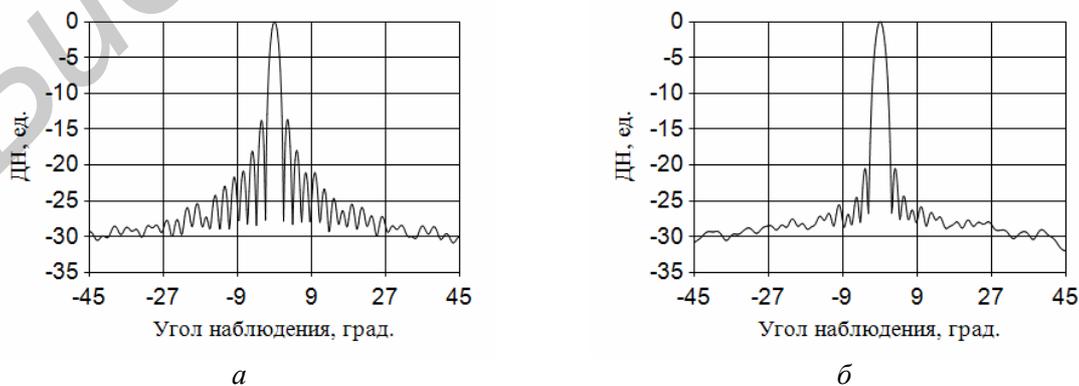


Рис. 3. Средние ДН решетки при  $DR' = 0,2$ :  $a - \Delta = 1, p = 1, F'_{bm} = -13,64, \text{КНД} = 33,33$ ;  $b - \Delta = 0,3, p = 1, F'_{bm} = -20,49, \text{КНД} = 33,19$

Анализ рис.4 показывает, что с увеличением случайной ошибки положения излучателей  $DR'$  ухудшаются параметры КНД и  $F_{bm}$ . С ростом  $DR'$  КНД и  $F_{bm}$  у МАР с разным радиусом и у ПАР ухудшаются в одинаковой степени. Следует отметить, что если КНД ухудшается в одинаковой степени для всех амплитудных распределений, то ухудшение уровня бокового лепестка зависит от амплитудного распределения. Чем меньший УБЛ обеспечивает амплитудное распределение, тем чувствительней УБЛ к величине случайной ошибки положения излучателей.

При наличии случайной ошибки положения излучателей направление главного максимума испытывает флуктуации. Величина флуктуаций далее описывается параметром  $dQm$  – среднеквадратичным отклонением главного максимума от исходного положения. Было проведено исследование зависимости  $dQm$  от величины случайной ошибки положения излучателей  $DR'$ . Результаты исследования приведены на рис. 4,в, анализ зависимостей на котором показывает, что среднеквадратичное отклонение главного максимума увеличивается с ростом  $DR'$  и оно приблизительно одинаково для МАР с различными радиусами и для ПАР.

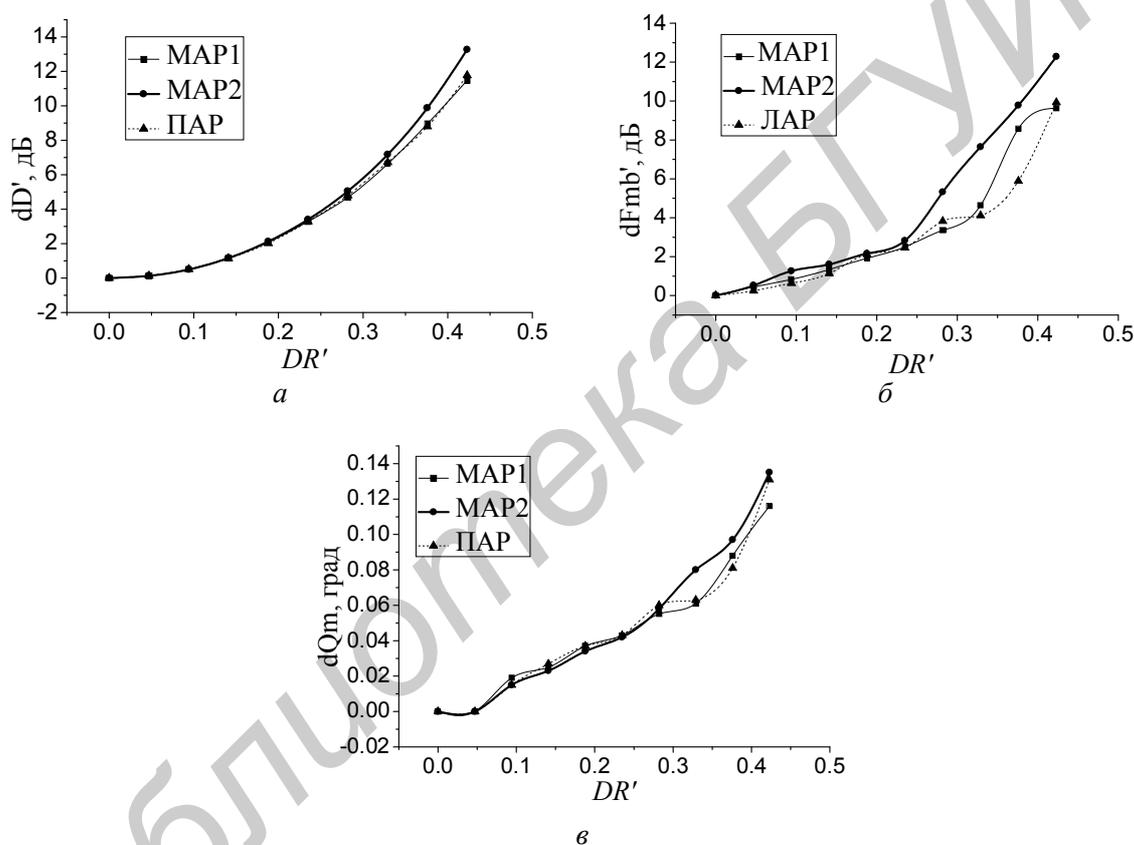


Рис. 4. Зависимости  $dD'$ ,  $dF_{bm}'$  и  $dQm$  от  $DR'$  ( $\Delta = 0,3$ ,  $p = 1$ ): а –  $dD'$ ; б –  $dF_{bm}'$ ; в –  $dQm$

### Влияние случайных ошибок возбуждения по амплитуде на ДН МАР

Ошибки возбуждения излучателей по амплитуде возникают по нескольким причинам. Среди них:

- конструктивные причины (ошибки изготовления излучателей), приводящие к различию в согласовании излучателей с линией передачи;
- различия в амплитудно-частотных характеристиках усилителей ППМ из-за разброса номиналов элементов схем усилителей и других причин.

Амплитуда возбуждения излучателя в решетке с номером « $n$ » далее определяется формулой:  $An = An_0 \pm AnEr$ , где  $An_0$  – точное значение амплитуды возбуждения излучателя с нужным амплитудным распределением;  $AnEr$  – случайное значение амплитуды в излучателе с номером « $n$ », расположенное случайным образом в интервале  $0 < AnEr < Anm$ , где  $Anm$  максимальное значение ошибки возбуждения – параметр, задаваемый в программе.

На рис. 5 показаны случайные реализации ДН для значений  $Anm = 50\%$  и  $Anm = 100\%$ . В решетке используется спадающее к краям амплитудное распределение с параметрами  $\Delta=0,3$ ,  $p = 1$ . Сравнение рис. 5 с рис. 1,а показывает, что наличие случайной ошибки возбуждения по амплитуде приводит к некоторому росту дальних боковых лепестков, максимальный боковой лепесток остается на том же уровне. Поэтому имеет смысл говорить об увеличении средне-квадратичного уровня бокового излучения. При наличии ошибки возбуждения  $Anm = 100\%$  КНД решетки уменьшается на 1,23 дБ, в основном, за счет возрастания дальних боковых лепестков. Следует также отметить, что наличие ошибок возбуждения по амплитуде не приводит к флуктуациям главного максимума. Исследование показало, что чувствительность МАР с различными радиусами и ПАР к случайным ошибкам возбуждения по амплитуде одинакова.

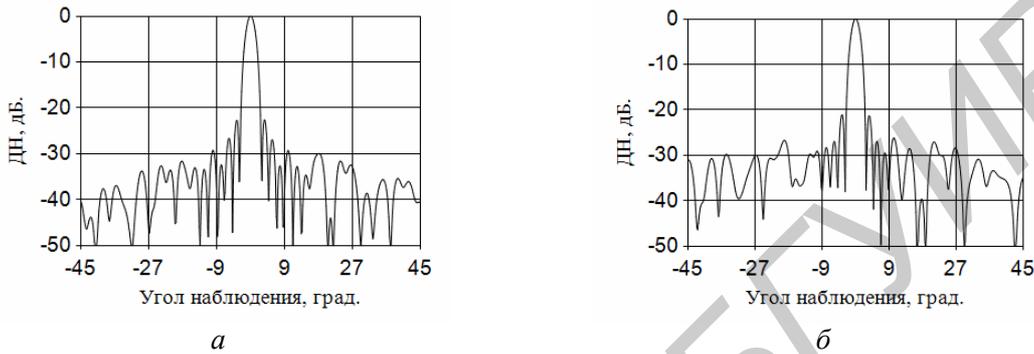


Рис. 5. Реализации ДН при наличии ошибки возбуждения по амплитуде:  
а –  $Anm = 50\%$ , б –  $Anm = 100\%$

### Влияние случайных ошибок возбуждения по фазе на ДН МАР

Причины появления случайных ошибок возбуждения излучателей по фазе те же, что рассмотренные в предыдущем пункте. Кроме того, на эту фазовую ошибку влияют погрешности в длине фидерных линий, соединяющих излучатели со входами ППМ.

С учетом случайной ошибки возбуждения излучателей по фазе фаза возбуждения излучателя с номером « $n$ » определится выражением  $F_n = F_{no} \pm F_n Er$ , где  $F_{no}$  – детерминированное значение фазы возбуждения излучателя,  $F_n Er$  – случайная ошибка, расположенная в интервале  $0 < F_n Er < F_{nm}$ ;  $F_{nm}$  – максимальная ошибка возбуждения излучателей по фазе, задаваемая в программе.

Случайные реализации ДН для  $F_{nm} = 90^\circ$  для двух амплитудных распределений:  $\Delta = 1$ ,  $p = 1$  и  $\Delta = 0,3$ ,  $p = 1$  показаны на рис. 6. Из рисунка следует, что реализации характеризуется существенным ростом боковых лепестков во всем диапазоне углов.

На рис. 7 показаны средние ДН для величины случайной ошибки возбуждения по фазе  $F_{nm} = 90^\circ$ . Усреднение произведено по 100 реализациям. Диаграммы характеризуются высоким уровнем бокового излучения. Диаграммы на рис. 6 практически аналогичны диаграммам на рис. 3, откуда можно сделать вывод о том, что ошибка по положению излучателей аналогична фазовой ошибке. Это легко объясняется теоретически. Действительно, ошибка в положении излучателя обеспечивает дополнительный фазовый набег в точке измерения сигнала.

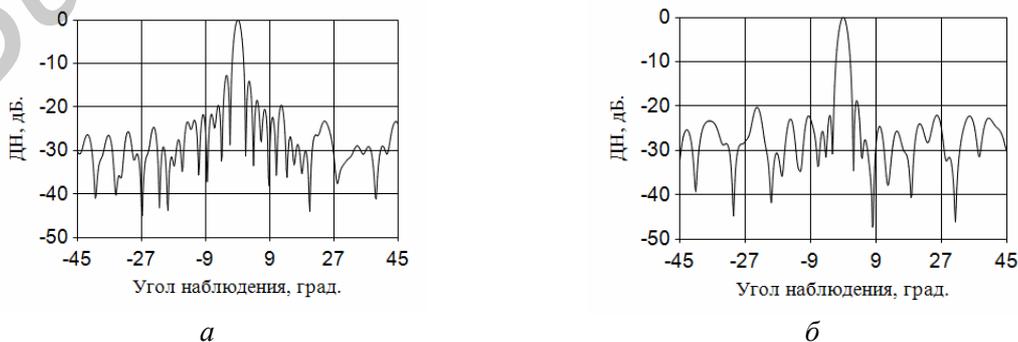


Рис. 6. Реализации ДН при наличии ошибки возбуждения по фазе  $F_{nm} = 90^\circ$ :  
а –  $\Delta = 1$ ,  $p = 1$ , б –  $\Delta = 0,3$ ,  $p = 1$

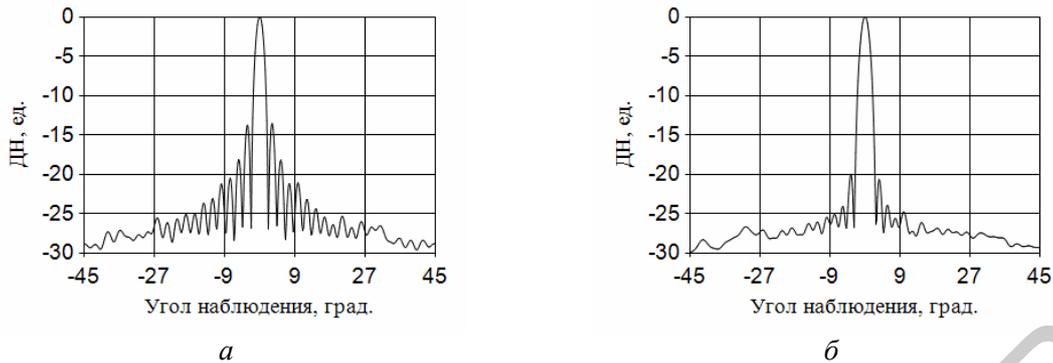


Рис. 7. Средние ДН при наличии ошибки возбуждения по фазе  $Fnm = 90^\circ$ :  $a - \Delta = 1, p = 1, F_{bm} = -13,43$ дБ, КНД = 32,67дБ;  $b - \Delta = 0,3, p = 1, F_{bm} = -20$ дБ, КНД = 32,53дБ

Для фазовой ошибки были проведены исследования ухудшения среднего значения максимального КНД и среднего значения максимального УБЛ при росте  $Fnm$ . Результаты этих исследований для амплитудного распределения  $\Delta = 0,3, p = 1$  приведены на рис. 8. Следует отметить, что как и для ошибки положения, ДН с низким исходным значением уровня боковых лепестков (УБЛ) обладают наибольшей чувствительностью к случайной ошибке возбуждения по фазе. Ошибка возбуждения по фазе значительно сильнее влияет на ДН, чем ошибка возбуждения по амплитуде. Значения КНД, УБЛ, и величина флуктуаций главного максимума вследствие роста ошибки возбуждения по фазе ухудшаются почти в одинаковой степени для МАР с различным радиусом и в ПАР.

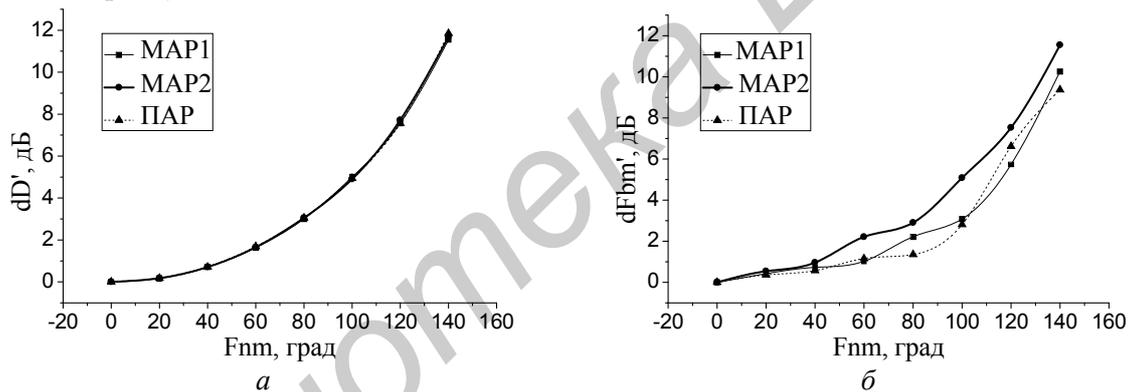


Рис. 8. Зависимости:  $a - dD'$  от  $Fnm$ ,  $b - dF_{bm}'$  от  $Fnm$

### Заключение

Исследовано влияние различного типа случайных ошибок на параметры ДН многогранных антенных решеток. Все типы ошибок приводят к ухудшению параметров ДН и снижению КНД многоугольных антенных решеток. Ошибки возбуждения по фазе значительно сильнее увеличивают уровень бокового излучения и уменьшают КНД по сравнению с ошибками возбуждения по амплитуде. Ошибки возбуждения по амплитуде не приводят к флуктуациям главного максимума и росту максимального бокового лепестка. По характеру влияния на ДН ошибки положения идентичны фазовым ошибкам возбуждения. При всех видах случайных ошибок ухудшения среднего значения максимального КНД, среднего значения максимального УБЛ, а также величины флуктуаций главного максимума, количественно почти одинаковы для МАР с различным радиусом и для ПАР.

# THE INFLUENCE OF RADIATOR EXCITATION AND POSITION RANDOM ERRORS ON CHARACTERISTICS OF MULTIFACETED ANTENNA ARRAY

D.V. MOSKALIOV

## Abstract

The influence of different types of random errors on radiation pattern and directivity of multifaceted antenna array is considered. The behavior of such parameters as average maximum directivity, average maximum side lobe level and main lobe fluctuation value in the presence of random errors is investigated. Multifaceted antenna arrays with different radius are compared each other and with planar array.

## Список литературы

1. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. М., 1970.
2. Шифрин Я.С., Корниенко Л.Г. Антенны. 2000. Вып. 1 (44), С. 3–26.
3. Шифрин Я.С., Корниенко Л.Г. Радиотехника. 1978. Вып. 45. С. 87–98.
4. Шифрин Я.С., Корниенко Л.Г. Радиотехника. Харьков. 1974. Вып. 30. С. 75–84.
5. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М., 1988.

Библиотека БГУМР