

УДК 621.396. 677

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЧАСТОТНО-НЕЗАВИСИМЫХ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Н. И. Бобков¹, Д. Д. Габриэльян², Ю. В. Иванов³

¹АО «ВНИИ «Градиент», г. Ростов-на-Дону, пр. Соколова, 96

²ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи», 344013,
г. Ростов-на-Дону, ул. Нансена, 130

³Ордена Трудового Красного Знамени ФГБОУВО «Московский технический
университет связи и информатики», 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8-а

Статья поступила в редакцию 6 февраля 2019 г.

Аннотация. Предложено амплитудно-фазовое распределение поля в раскрыве линейной антенной решетки, обеспечивающее формирование частотно-независимых характеристик излучения в широкой полосе частот. Для данного распределения получено представление диаграммы направленности в виде суммы парциальных диаграмм, соответствующих составляющим амплитудного распределения в раскрыве. Проанализированы основные закономерности формирования частотно-независимых диаграмм направленности. В частности, установлена зависимость максимально допустимого межэлементного расстояния антенной решетки от относительного перекрытия по частоте и ширины формируемых диаграмм направленности.

Ключевые слова: линейная антенная решетка, раскрыв, амплитудно-фазовое распределение, диаграмма направленности.

Abstract. An amplitude-phase distribution of the aperture field of a linear antenna array is proposed, which ensures the formation of frequency-independent radiation characteristics in a wide frequency band. Maintaining a constant width and shape of the radiation pattern in the frequency band is accomplished by introducing an additional frequency-dependent quadratic phase distribution, in which the decrease in the width of the radiation pattern with increasing frequency is compensated by an increase in the aperture's dephasing. For this distribution, a representation of the radiation pattern is obtained as the sum of partial diagrams corresponding to the

components of the aperture's amplitude distribution. The main regularities of the formation of frequency-independent radiation patterns are analyzed in the frequency band with an 8: 1 overlap. It has been established that when a wide radiation pattern formed by an antenna array with a small number of emitters, in the high-frequency region there are distortions of the shape of the main lobe as oscillations. This effect is due to the high rate of change in the phase distribution of the currents in the array's aperture, when the excitation phase difference adjacent emitters at the periphery of the array exceeds 180° .

The following regularities were revealed:

- the amplitude distribution of the currents in the aperture is frequency-independent;
- the frequency dependence of the change in the phase aperture's distribution of the array has a nearly linear character;
- the minimum number of array elements increases as the expansion of the working frequency band, and the formation of wider frequency-independent radiation patterns;
- the width of the frequency-independent radiation patterns, as in the case of the common-mode distribution, is determined by the inversely proportional dependence on the size of the aperture.

Keywords: linear antenna array, aperture, amplitude-phase distribution, radiation pattern.

В ряде областей применения апертурных антенн, а также антенных решеток, актуальной задачей является поддержание неизменных параметров диаграмм направленности (ДН) в широкой полосе частот [1]. Такие задачи требуют решения, например, при проектировании активных многолучевых антенных решеток (АР), функционирующих в широкой полосе частот [2], или при разработке многолучевых антенн для систем пеленгования и сопровождения объектов по направлению [3], в которых необходимо сохранять постоянным пересечение парциальных ДН на уровне минус 3..4 дБ. Согласно [1], методы построения частотно-независимых апертурных антенн (с постоянной шириной и формой главного лепестка, а также огибающей боковых лепестков) подразделяются на амплитудные, фазовые и амплитудно-фазовые. В

[1] также показано, что более предпочтительными при построении частотно-независимых АР являются фазовые методы, характеризующиеся частотно-зависимым фазовым распределением поля в раскрыве при неизменном от частоты амплитудном распределении.

Проектирование частотно-независимых АР включает в себя решение вопросов по трем ключевым направлениям: разработка излучателей, функционирующих в требуемой полосе частот, выбор амплитудно-фазового распределения (АФР), позволяющего обеспечить формирование практически неизменных ДН, и разработка фидерного тракта, обеспечивающего реализацию указанного АФР в требуемой полосе частот.

Характеристики широкополосных излучателей, так же как и вопросы построения фидерного тракта, достаточно подробно исследованы и нашли свое отражение, например, в работах [2,4-7]. Однако основные закономерности изменения АФР, обеспечивающего в полосе частот формирование ДН с неизменными заданными характеристиками, в настоящее время исследованы недостаточно.

Цель работы – изучить основные закономерности выбора параметров АФР для формирования частотно-независимых ДН АР фазовыми методами.

Как показано в [1,4] эффект стабилизации характеристик излучения линейного или прямоугольного раскрыва в широкой полосе частот может быть достигнут при выполнении следующих условий:

- в раскрыве должно быть сформировано независимое от частоты спадающее амплитудное распределение;

- должно быть введено соответствующее дополнительное частотно-зависимое четное (обычно квадратичное) фазовое распределение, при котором убывание ширины ДН с ростом частоты компенсируется возрастанием расфазировки раскрыва. Под расфазировкой раскрыва АР будем в дальнейшем понимать величину разности фаз между центральными и крайними излучателями, заполняющими раскрыв решетки.

Однако, как с теоретической, так и с практической точек зрения представляет интерес уточнение АФР, обеспечивающего частотную стабилизацию параметров ДН, что связано с возможностью представления формируемой ДН в аналитической форме. При этом для исследования основных закономерностей, связанных с выбором АФР, как правило, достаточно рассмотреть случай линейных АР.

Представим АФР линейной АР длиной L следующим образом

$$A(x_n, f) = \sum_{m=0}^{\infty} (B_m \cdot \xi_n^{2m}) \exp[-i \cdot \Delta\Phi(f) \cdot \xi_n^2], \quad (1)$$

де B_m - частотно-независимые коэффициенты разложения, определяющие амплитудное распределение в линейной АР; $\xi_n = x_n/L$; $x_n \in [-L/2, L/2]$ - координата n -го излучателя в линейной АР; $\Delta\Phi(f)$ - частотно-зависимый параметр, определяющий расфазировку излучателей в раскрыве АР.

С учетом представления АФР в виде (1) соотношение для ДН антенны имеет вид [8]

$$F(\theta) = \mu(\theta) \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^{\infty} (B_m \cdot \xi_n^{2m}) \exp\{-i[k(f) \cdot L \cdot \xi_n \cdot \sin \theta + \Delta\Phi(f) \cdot \xi_n^2]\}, \quad (2)$$

где $\mu(\theta)$ - ДН излучателя; $k(f)$ - волновое число.

При изменении порядка суммирования и выполнении ряда несложных преобразований выражение (2) может быть представлено в виде

$$F(\theta) = \mu(\theta) \cdot \exp\left[i\left(\frac{k(f) \cdot L \cdot \sin \theta}{4\sqrt{\Delta\Phi}}\right)^2\right] \cdot \sum_{m=0}^{\infty} B_m \sum_{p=0}^{2m} (-1)^p C_{2m}^p \cdot \left(\frac{k(f) \cdot L \cdot \sin \theta}{8\Delta\Phi(f)}\right)^{2m-p} \times \\ \times \sum_{n=1}^N \left(\xi_n + \frac{k(f) \cdot L \cdot \sin \theta}{8\Delta\Phi(f)}\right)^p \exp\left[4i \cdot \Delta\Phi(f) \cdot \left(\xi_n + \frac{k(f) \cdot L \cdot \sin \theta}{8\Delta\Phi(f)}\right)^2\right]. \quad (3)$$

Соотношение (3) позволяет представить ДН линейной АР в виде суммы парциальных ДН, каждая из которых соответствует амплитудному распределению, с показателем степени $2m$ и квадратичному фазовому распределению с параметром $\Delta\Phi(f)$. При этом для формирования частотно-независимой ДН необходимо выполнение условия:

$$\Delta\Phi(f) \approx k(f) \cdot L. \quad (4)$$

Выбор коэффициентов B_m определяется требованиями, предъявляемыми при формировании частотно-независимой ДН. К таким требованиям при заданной полосе частот могут, в частности, относиться:

- формирование ДН с постоянной шириной по уровню минус 3 дБ;
- формирование ДН с минимальным среднеквадратическим отклонением формы главного лепестка от заданной в пределах углового сектора по уровню минус 3 дБ или минус 10 дБ, а также ряд других требований.

На рисунках 1-4 для АР с различным числом элементов показаны ДН с постоянной шириной по уровню минус 3 дБ на частоте f_0 (сплошная линия), $2f_0$ (точечная линия), $3f_0$ (штриховая линия) и $4f_0$ (штрих-пунктирная линия), рассчитанные с использованием выражения (3). Межэлементное расстояние в раскрыве АР выбрано равным $0,15\lambda_0$.

Амплитудное распределение для всех рассматриваемых АР определяется коэффициентами $B_0 = 1$, $B_1 = -\pi^2/2$, $B_2 = \pi^2/24$, частотная зависимость $\Delta\Phi(f)$ имеет вид $\Delta\Phi(f) = \left[(0,9 + 0,85 \cdot \Delta\hat{f}) \cdot \pi \right]^{0,95}$, где $\Delta\hat{f} = f/f_0 - 1$. На всех рисунках на поле с индексом «а» приведены ДН во всем угловом секторе для линейной АР, на поле с индексом «б» выделена область главного лепестка.

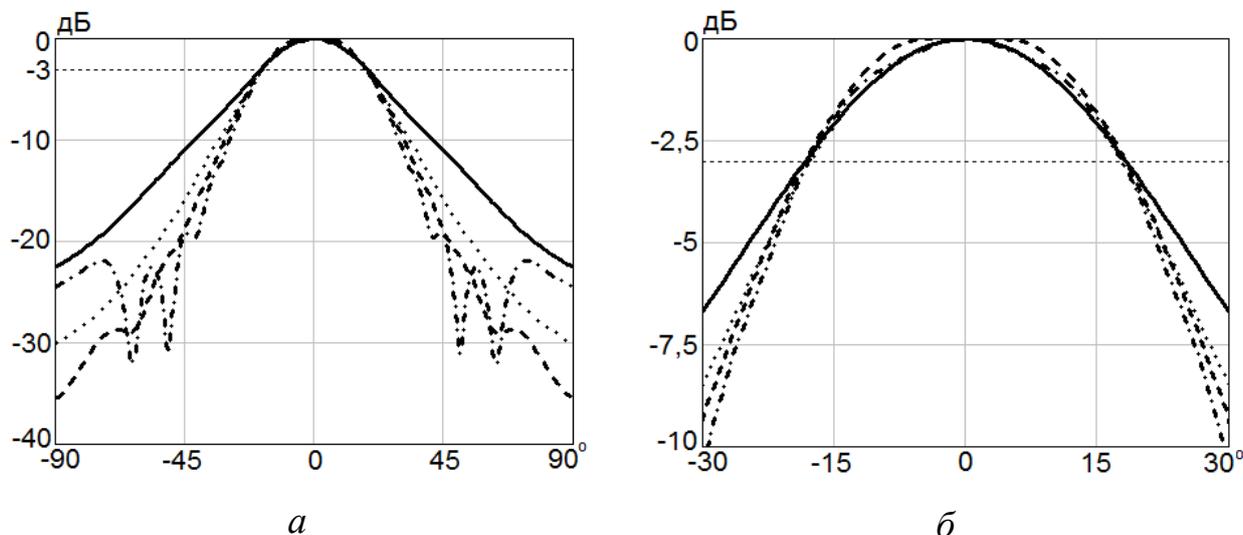


Рисунок 1. ДН 15-элементной АР в полосе частот 4:1

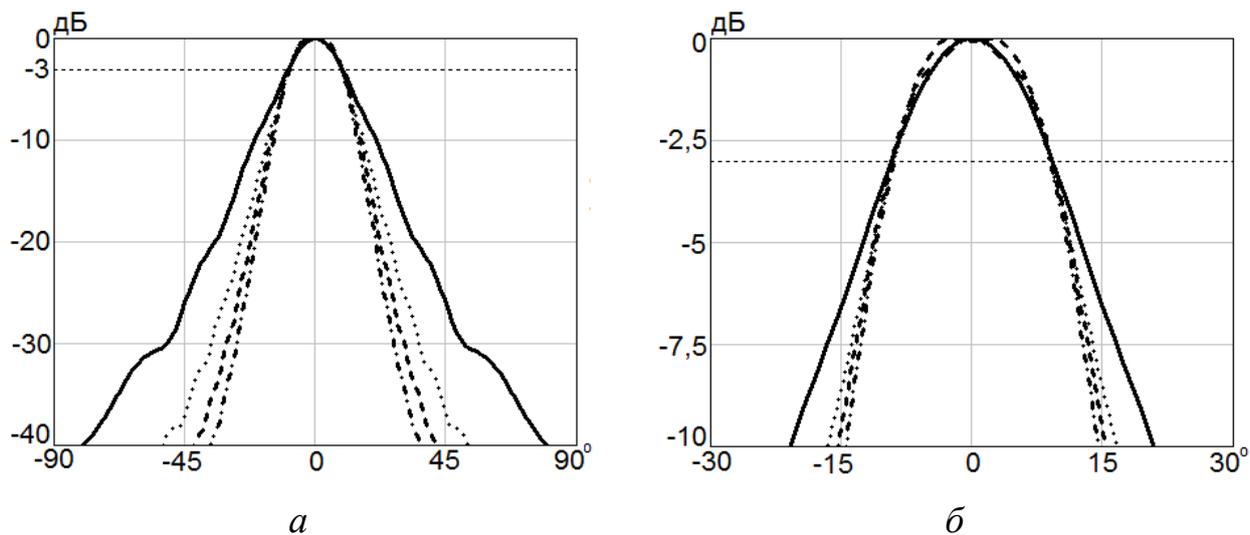


Рисунок 2. ДН 30-элементной АР в полосе частот 4:1

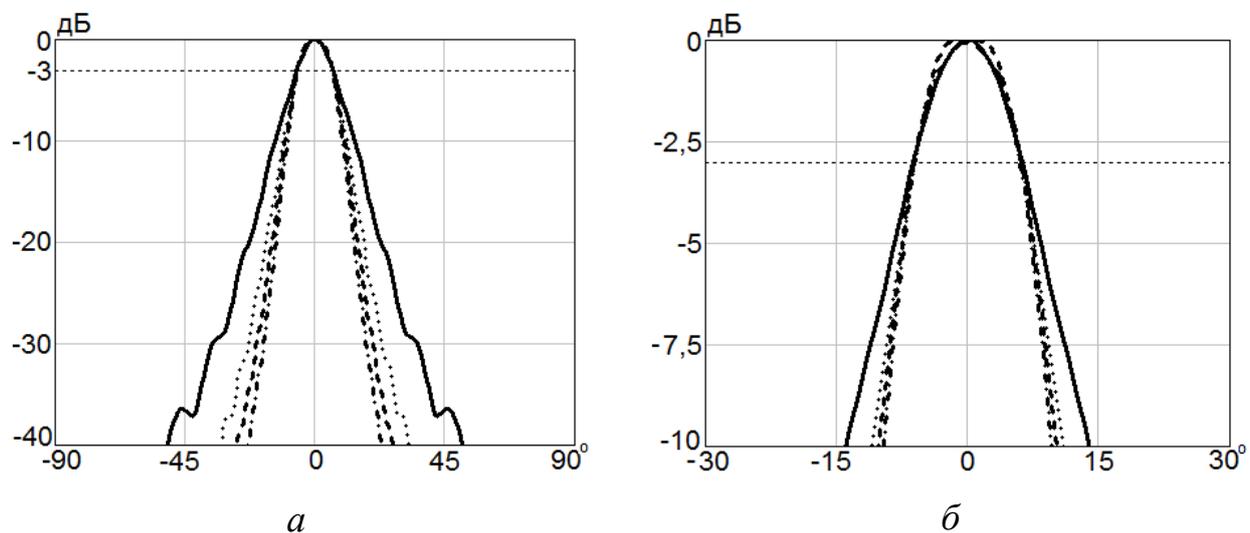


Рисунок 3. ДН 45-элементной АР в полосе частот 4:1

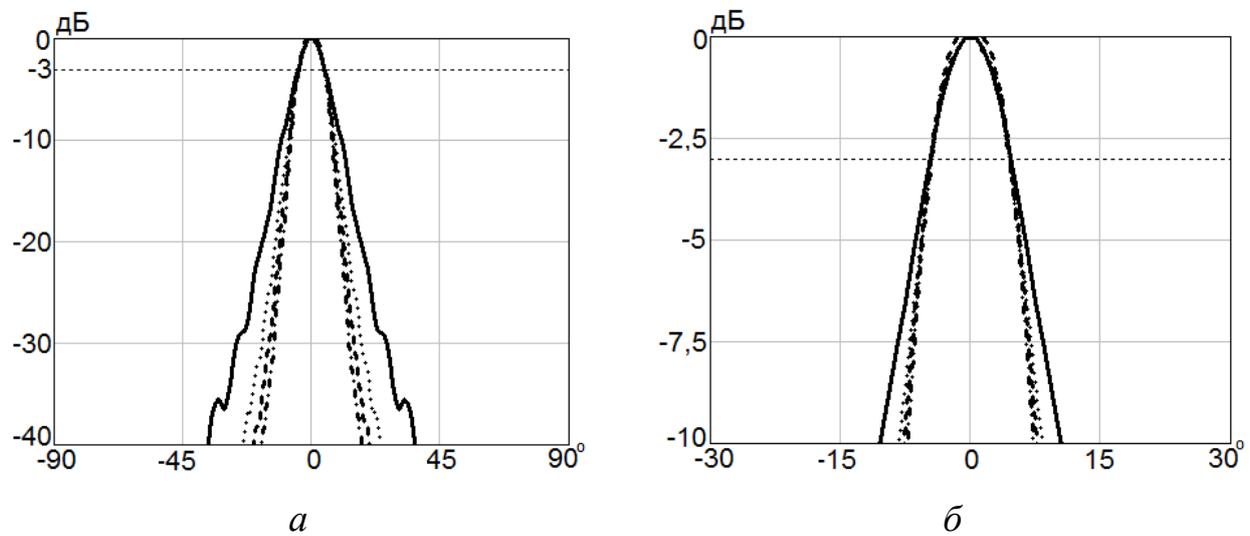


Рисунок 4. ДН 60-элементной АР в полосе частот 4:1

Ширина ДН по уровню минус 3 дБ для рассматриваемых АР соответственно составляет $36,5^\circ$, $18,3^\circ$, $12,2^\circ$ и $9,1^\circ$, что, как и в случае синфазного распределения, определяется обратно пропорциональной зависимостью от размеров раскрыва.

Однако полоса частот, в которой может быть сформирована частотно-независимая ДН, зависит от ширины луча и ограничена величиной межэлементного расстояния в раскрыве АР. Последнее иллюстрируется результатами формирования ДН с расчетными значениями ширины $57,4^\circ$, $28,9^\circ$, $19,2^\circ$ и $14,4^\circ$ в полосе частот с относительным перекрытием 8:1. Межэлементное расстояние в этом случае выбрано равным $0,075\lambda_0$ (что составляет $0,6\lambda$ для верхней частоты $8f_0$), амплитудное распределение определяется теми же параметрами, что и в предыдущем случае, расфазировка возрастает с частотой согласно выражению $\Delta\Phi(f) = (0,85 \cdot \Delta\hat{f} \cdot \pi)^{0,835}$. Результаты исследований для частот f_0 (сплошная линия), $4,5f_0$ (точечная линия) и $8f_0$ (штриховая линия) представлены на рисунках 5-8.

Так, приведенная на рисунке 5 ДН для частоты $8f_0$ имеет изрезанный главный лепесток, в котором нарушается монотонное снижение уровня ДН при удалении от главного максимума. Это связано с большой скоростью изменения фазы распределения токов в раскрыве АР, когда разность фаз возбуждения смежных излучателей на периферии решетки превышает 180° . Для подтверждения этого в таблице 1 приведены значения фаз возбуждения излучателей 15-элементной решетки для некоторых частот от $4,5f_0$ до $8f_0$. При более плотном заполнении раскрыва излучателями, а также в случае формирования более узких лучей с возрастанием числа излучателей и размеров раскрыва (рисунки 6-8), область формирования неискаженных ДН расширяется вверх и эффект искажения формы главного лепестка проявляется на более высоких частотах за пределами полосы с перекрытием 8:1.

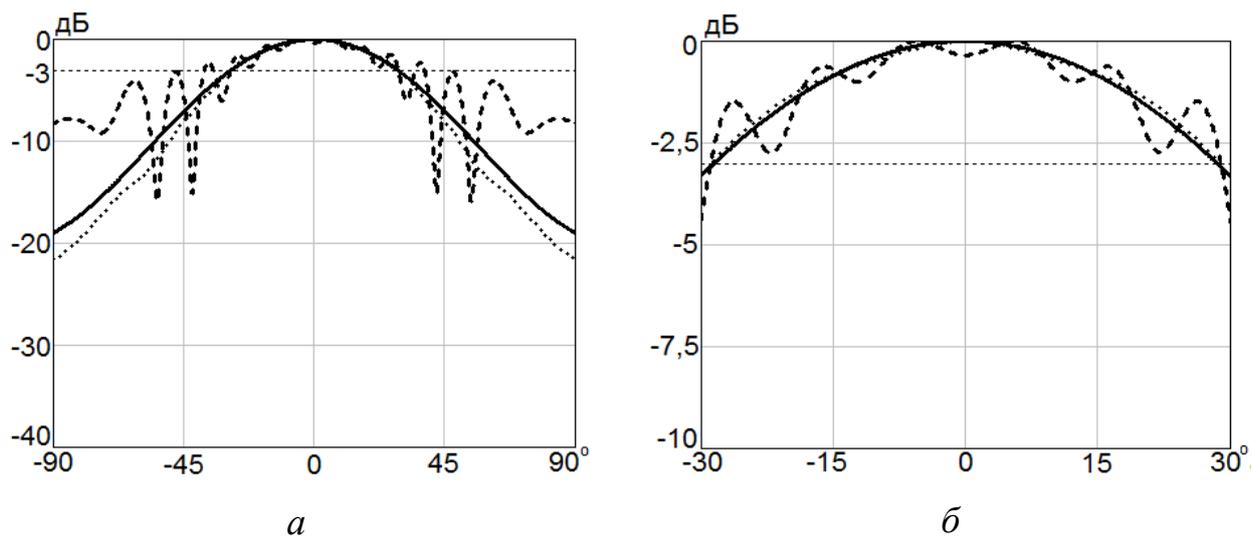


Рисунок 5. ДН 15-элементной АР в полосе частот 8:1

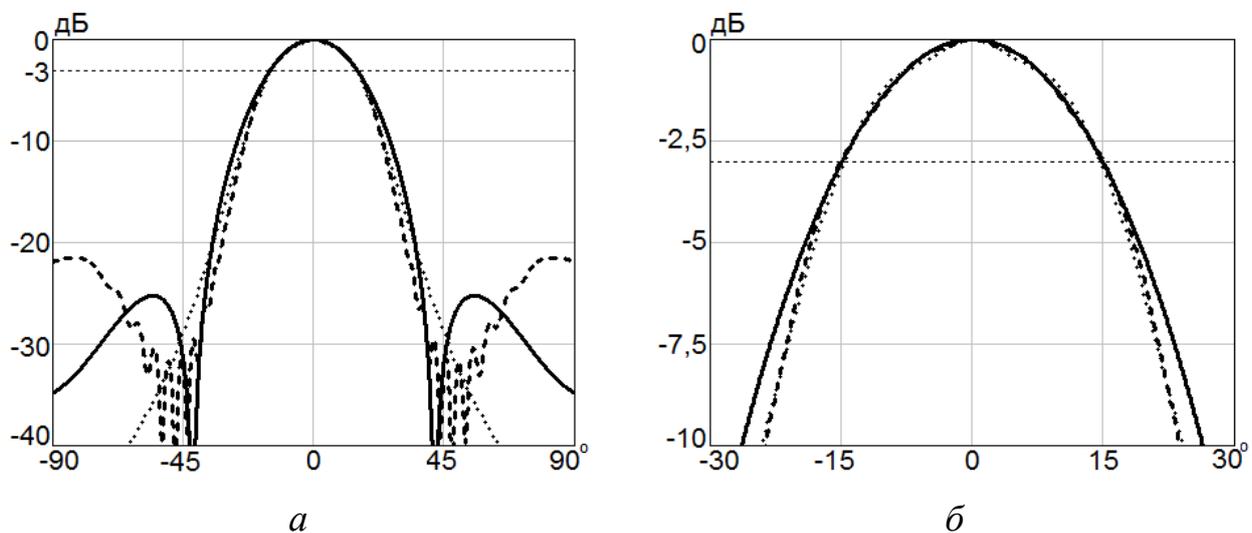


Рисунок 6. ДН 30-элементной АР в полосе частот 8:1

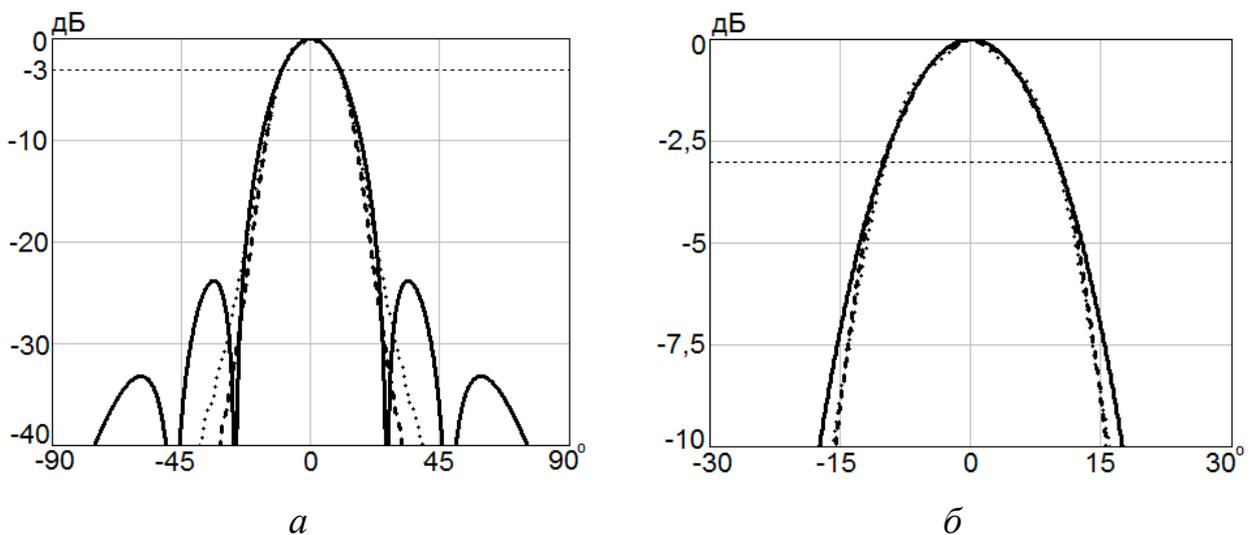


Рисунок 7. ДН 45-элементной АР в полосе частот 8:1

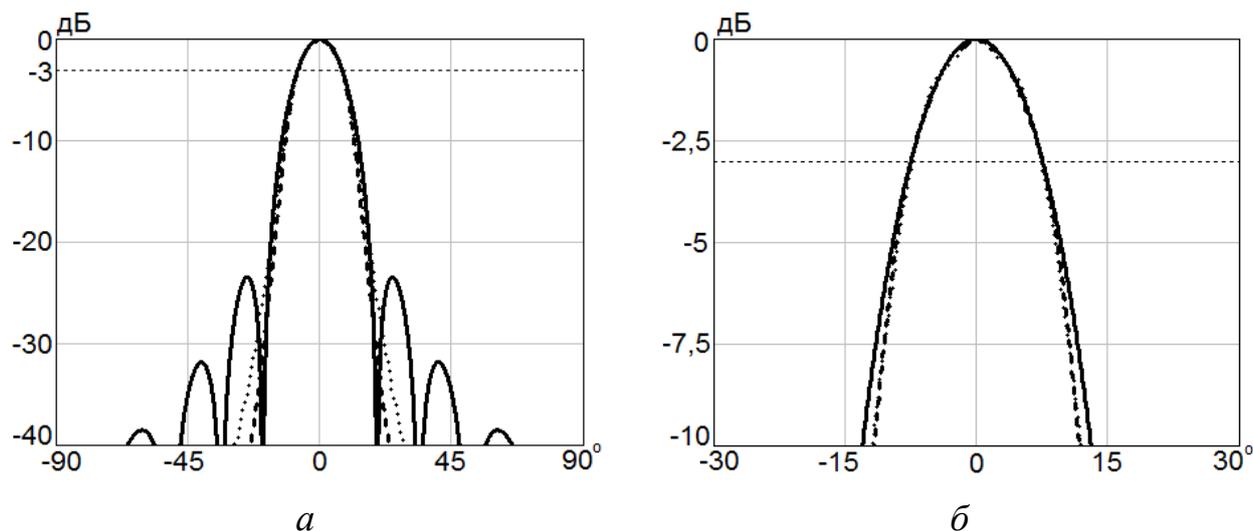


Рисунок 8. ДН 60-элементной AP в полосе частот 8:1

Таблица 1. Фазы возбуждения излучателей 15-элементной AP

Частота	Фазы возбуждения излучателей №№, градус							
	1; 15	2; 14	3; 13	4; 12	5; 11	6; 10	7; 9	8
$4,5f_0$	540	396,7	275,5	176,3	99,2	44	11	0
$5,5f_0$	660	484,9	336,7	215,5	121,2	53,8	13,5	0
$6,5f_0$	780	573	398	254,7	143,3	63,7	15,9	0
$8f_0$	960	705,3	489,8	313,5	176,3	78,4	19,6	0

На рисунке 9 приведены расчетные кривые допустимого межэлементного расстояния в зависимости от величины относительного перекрытия по частоте при формировании неискаженных частотно-независимых ДН с шириной 60° (кривая 1), 50° (кривая 2), 40° (кривая 3), 30° (кривая 4) и 20° (кривая 5). Критерием формирования неискаженных ДН является отсутствие участков с нулевой или отрицательной крутизной на скатах главного лепестка в пределах от максимума ДН до относительного уровня минус 10 дБ. Межэлементное расстояние на рисунке 9 выражено в длинах волн λ_0 .

Как следует из рисунка 9, чем более узкие частотно-независимые ДН необходимо сформировать, тем большее межэлементное расстояние может быть допущено и чем шире требуемая полоса рабочих частот, тем меньшее необходимо выбирать межэлементное расстояние, более плотно заполняя

раскрыв АР излучателями. На рисунке 9 показаны также две пунктирные кривые 6 и 7, устанавливающие ограничение на межэлементное расстояние по критерию превышения дифракционных боковых лепестков относительного уровня минус 20 дБ в видимой области углов. Кривая 7 рассчитана для режима формирования луча по нормали к раскрыву, а кривая 6 - для режима сканирования в секторе углов $\pm 45^\circ$. С учетом этих ограничений следует, что при построении частотно-независимых АР, формирующих один луч шириной более 30° по нормали к раскрыву, более актуальным является выбор межэлементного расстояния в соответствии с критерием формирования неискаженных ДН. Наглядное подтверждение этому следует из сравнения диаграмм, приведенных на рисунке 5 с рисунками 6-8. В то же время для АР, сканирующих в секторе $\pm 45^\circ$ этот критерий актуален только в случае формирования частотно-независимых ДН шириной более 50° , а при формировании сканирующих ДН шириной менее 50° , что наиболее часто встречается на практике, выбирать межэлементное расстояние необходимо исходя из условия низкого уровня дифракционного бокового излучения.

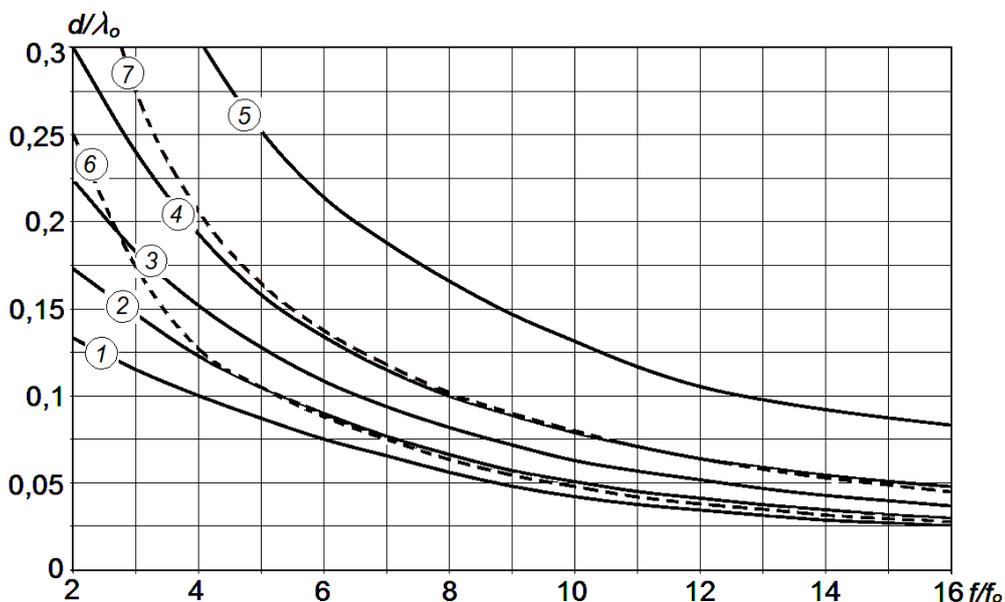


Рисунок 9. Зависимость допустимого межэлементного расстояния от величины относительного перекрытия по частоте при формировании частотно-независимых ДН с шириной 60° (1), 50° (2), 40° (3), 30° (4) и 20° (5)

Таким образом, можно отметить, что при формировании частотно-независимых ДН фазовыми методами справедливы следующие закономерности:

- амплитудное распределение токов в раскрыве является частотно-независимым;
- частотная зависимость изменения фазового распределения в раскрыве АР имеет характер, близкий к линейному;
- минимальное число элементов АР возрастает как при расширении полосы рабочих частот, так и при формировании более широких частотно-независимых ДН;
- ширина частотно-независимых ДН как и в случае синфазного распределения, определяется обратно пропорциональной зависимостью от размеров раскрыва.

Выявленные закономерности позволяют сократить время разработки АР с частотно-независимыми характеристиками излучения.

Литература

1. Бобков Н.И., Габриэльян Д.Д., Ивакина С.С., Пархоменко Н.Г. Построение апертурных антенн с частотно-независимыми характеристиками излучения. Радиотехника. 2016. № 1. С. 42-49.
2. U.S. Patent 8466848. Beam shaping for wide band array antennas. Guy D., Pirolo B. 18 June 2013.
3. Патент РФ № 2099836. Широкополосная четырехлучевая зеркальная антенна (варианты). Бобков Н.И., Бочарников А.А., Кашубин Б.Т., Логвиненко Е.Л., Савеленко А.А., Стуров А.Г., Яшин Н.Н. Бюллетень изобретений № 35, 20.12.1997. МПК H01Q 19/17.
4. Горин А.М., Радченко Н.А. Сканирующая антенная решётка со стабильной диаграммой направленности в широком диапазоне частот. Вопросы специальной радиоэлектроники (научно-технический сборник). ОВР, вып. 1, Москва-Таганрог, 2014, с. 77-80.

5. Гринев А.Ю., Багно Д.В., Синани А.И., Мосейчук Г.Ф. Расширение полосы рабочих частот многофункциональных фазированных антенных решеток. Материалы IV Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» - ИРЭ РАН, 29 ноября – 3 декабря 2010 г., с. 631-635.
6. Лось В.Ф., Шаманов А.Н. Сверхширокополосные излучатели для антенных решеток. Антенны, 2004, вып. 8-9 (87-88), с. 80-87.
7. Holter H., Chio T.-H., Shaubert D. H. Experimental results of 144-element dual-polarized endfire tapered-slot phased arrays. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 48, No. 11, 2000, pp. 1707-1718.
8. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны. Под ред. Д.И. Воскресенского. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.

Для цитирования:

Н. И. Бобков, Д. Д. Габриэлян, Ю. В. Иванов. Амплитудно-фазовое распределение для формирования частотно-независимых диаграмм направленности линейных антенных решеток. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb19/15/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.2.15