

УДК: 621.396.67

ОТДЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПОСТРОЕНИЯ  
ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК

SOME ASPECTS OF OPTIMIZATION OF PHASED ARRAY CONSTRUCTION

*В.А. Сафаралеев, А.Н. Наговицына, канд. техн. наук А.В. Наговицын*

*V.A. Safaraleev, A.V. Nagovitsyna, PhD A.V. Nagovitsyn*

*ВКА им. А.Ф. Можайского*

В статье приводятся результаты исследования зависимости параметров диаграммы направленности фазированных антенных решёток от их размеров и способа построения. Проведенный анализ исследуемых зависимостей показывает, что за счёт более рационального размещения антенных элементов количество последних, а, следовательно, габаритно-весовые характеристики и потребляемую мощность можно существенно уменьшить, без изменения заданных энергетических параметров антенны. Также в работе рассмотрена возможность перераспределения энергии боковых лепестков за счёт применения геометрии решётки, отличной от квадратной. Данная характеристика позволяет учитывать особенности радиоэлектронной обстановки для снижения уровня помех (или нежелательного излучения).

**Ключевые слова:** фазированная антенная решётка, диаграмма направленности, плотность потока мощности, излучатели.

The article presents the results of a study of the dependence of the radiation pattern parameters of phased antenna arrays on their size and construction method. The analysis of the studied dependencies shows that due to a more rational placement of antenna elements, the number of the latter, and, consequently, the overall weight characteristics and power consumption can be significantly reduced without changing the specified energy parameters of the antenna. The paper also considers the possibility of redistributing the energy of the side lobes by using a lattice geometry other than the square one. This characteristic allows you to take into account the features of the radio-electronic environment to reduce the level of interference (or unwanted radiation).

**Keywords:** phased array antenna, radiation pattern, power flux density, emitters.

Фазированные антенные решётки (ФАР) широко применяются в технике благодаря ряду особенностей. В отличие от зеркальных антенн (ЗА) они формируют более узкую диаграмму направленности (ДН), позволяют без механического перемещения каких-либо частей антенной системы менять направление главного лепестка ДН, а также формировать нули ДН в заданных направлениях (адаптивные ФАР). Кроме того,

в ФАР, работающих на приём, легко сформировать несколько главных лепестков, причём реализация указанной возможности значительно упрощается, если в антенне применяется цифровая обработка сигналов (так называемые цифровые антенные решётки) [1, 2, 9, 10].

Важным конструктивным отличием ЗА от ФАР следует считать то, что первые имеют один излучатель и систему отражателей, а вто-

рые представляют собой определенную систему слабонаправленных излучателей. Следовательно, в ЗА реализация систем питания, управления и передачи ВЧ (СВЧ) сигналов значительно проще, чем ФАР. Каждый антенный элемент обладает определёнными массой и габаритами. Последнее особенно важно, так как высокая плотность излучателей накладывает жёсткие требования на размеры антенн.

Кроме того, геометрические искажения в равной степени снижают параметры антенн, хотя обеспечить требуемую форму отражателя сложнее, чем обеспечить фиксированное положение отдельных точек (излучателей) [3].

Цель работы: провести анализ влияния отдельных характеристик ФАР на параметры её диаграммы направленности и определить возможные пути оптимизации ФАР.

Исследования параметров ДН проводились для двух типов решёток: исследование параметров ДН линейной решётки (в плоскости) и исследование формы ДН плоской решётки (в пространстве).

### Исследования зависимости параметров диаграммы направленности линейной периодической ФАР от геометрических параметров

Из теории ФАР известно, что нормированная диаграмма направленности линейной периодической ФАР определяется ДН отдельного излучателя и множителем решётки и описывается формулой [1, 3, 11]

$$F_{\text{ФАР}}(\theta) = F_{\text{изл}}(\theta) \cdot \frac{\sin\left(\pi N \frac{d}{\lambda} \sin\theta\right)}{N \sin\left(\pi \frac{d}{\lambda} \sin\theta\right)}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{изл}}(\theta)$  — ДН отдельного излучателя;

$N$  — число излучателей;

$d$  — шаг решётки;

$\lambda$  — длина волны.

Для плоских прямоугольных решёток формула (1) описывает ДН в каждой плоскости, параллельной оси решётки.

Примеры ДН при различных значениях  $D$  (размера ФАР) и  $N$  (числа элементов) приведены на рис. 1.

В результате исследования параметров ДН линейной решётки рассмотрены следующие зависимости:

– зависимость количества дополнительных максимумов от шага ФАР;

– зависимость ширины главного лепестка ДН  $\theta_{0,7}$  от шага решётки;

– зависимость уровней и суммарной мощности боковых лепестков от числа элементов ФАР и размеров решётки;

– влияние направленных свойств элементов ФАР на предельные значения параметров решётки.

1. Если шаг излучателей больше или равен  $\lambda$ , в ДН образуются дополнительные максимумы с отклонением от оси на угол [3],

$$\beta = \arcsin\left(\frac{M}{\frac{d}{\lambda}}\right), \quad (2)$$

где  $M$  — номер максимума ( $M=0$  для главного максимума). Количество дополнительных максимумов равно целой части от значения  $\frac{d}{\lambda}$ . При-

меры ДН ФАР размером  $23,5\lambda$ , имеющие дополнительные максимумы, показаны на рис. 2. Для графика «F12» (12 излучателей) отношение  $\frac{d}{\lambda} = 2,14$ , что соответствует двум дополнительным максимумам ( $\beta = 27,8^\circ$  и  $69,2^\circ$ ).

Для графика «F16» отношение  $\frac{d}{\lambda} = 1,57$ , что соответствует одному дополнительному максимуму ( $\beta = 39,6^\circ$ ).

Отношение  $\frac{d}{\lambda}$  для графика «F25» равно 0,98.

Это значение меньше 1, поэтому максимума нет, но в то же время оно близко к 1 и значение ДН при  $\theta = \pm 0,5\pi$  равно 0,61, что превышает другие боковые лепестки в несколько раз.

Для того, чтобы уровень любых боковых лепестков не превышал некоторого определённого уровня (в данном исследовании выбран уровень первого — наибольшего бокового лепестка), величина  $\frac{d}{\lambda}$  не должна превышать определённого значения, обозначим это значение  $\eta = \left(\frac{d}{\lambda}\right)_{\text{макс}}$ ,

которое, в общем случае, зависит только от числа излучателей (приёмников). Указанная зависи-

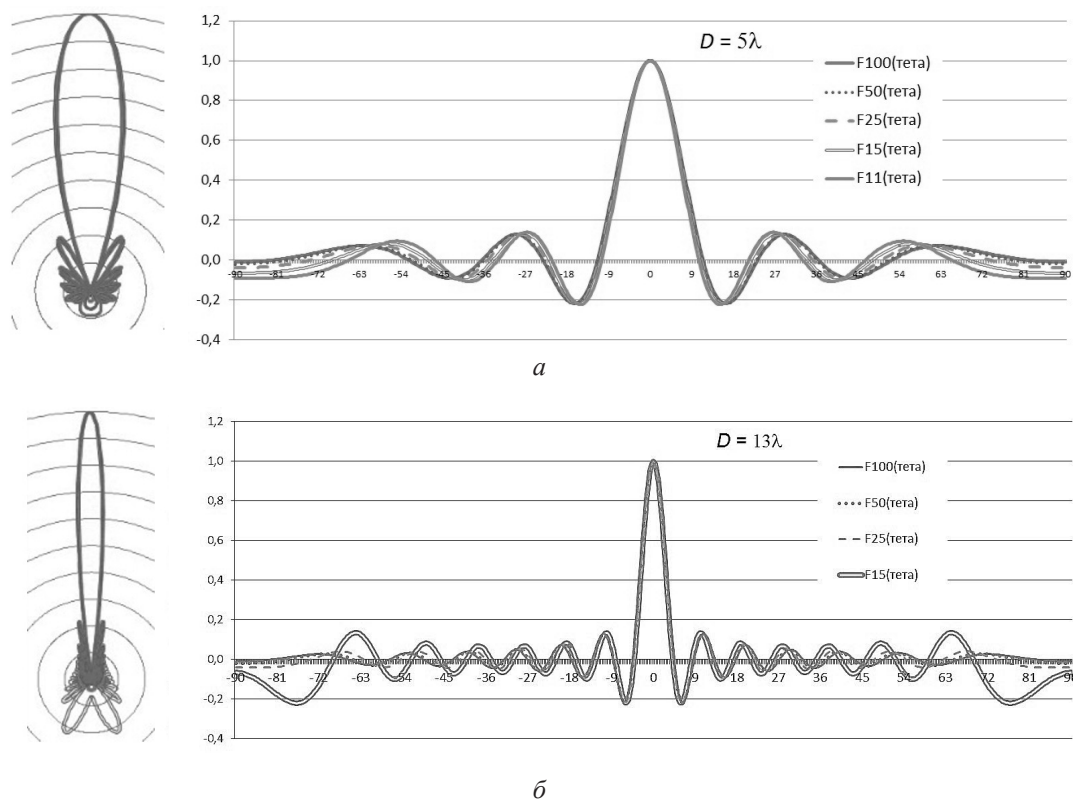


Рис. 1. Диаграммы направленности ФАР для разного числа ненаправленных излучателей (11, 15, 25, 50 и 100) при размере решётки  $5\lambda$  (а) и  $13\lambda$  (б)

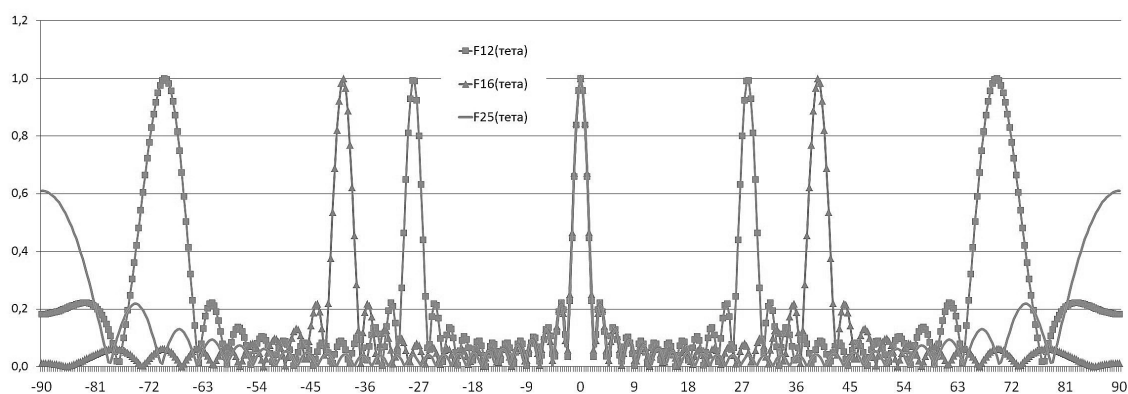


Рис. 2. Диаграммы направленности ФАР для разного числа ненаправленных излучателей (12, 16 и 25) при размере решётки  $23,5\lambda$

мость представлена на рис. 3. Тренд рассчитанных значений можно интерполировать эмпирическими формулами:

$$\eta = 1 - \frac{0,925}{0,0033n^2 + 1,05n + 0,5} \approx 1 - \frac{1}{1+n},$$

где  $n$  — число элементов ФАР. Отклонение от тренда для значений, полученных по прибли-

жённому равенству, составляет не более 1,5%. На практике при  $n > 20$  значение  $\eta$  можно считать равным 0,95. Обычно на практике применяется значение  $\eta = 0,5$ .

Данный параметр позволяет определить минимально необходимое число элементов, при котором уровни всех боковых лепестков (включая дополнительные максимумы) не превышают уровня первых боковых лепестков:

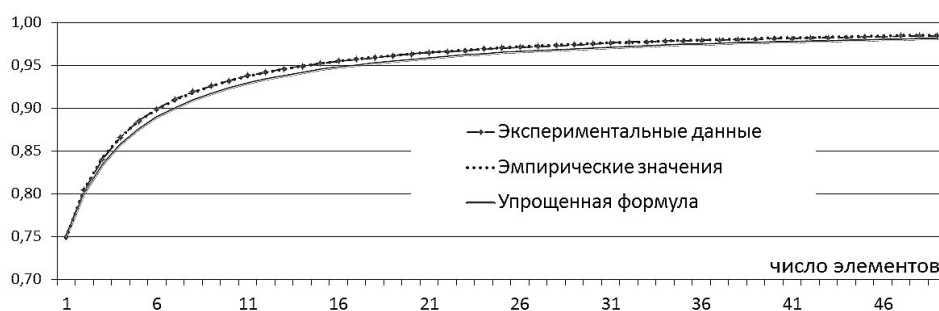


Рис. 3. Значение  $\eta = \left(\frac{d}{\lambda}\right)_{\max}$  в зависимости от числа элементов

$$N_{\min} \geq \frac{D}{\eta} + 1. \quad (3)$$

2. Общеизвестна формула, определяющая ширину главного лепестка ДН ФАР через отношение  $\lambda$  к  $D$  [3, 12, 13]:

$$\theta_{0,7} \approx 0,89 \frac{\lambda}{D} [\text{рад}] \approx 51^\circ \frac{\lambda}{D} [\text{градусов}], \quad (4)$$

где  $\theta_{0,7}$  — ширина ДН по уровню 0,707;  $\lambda$  — длина волны;  $D$  — размер решётки.

Указанное в (4) значение коэффициента пропорциональности (0,89) получено при некоторых допущениях и упрощениях, так как уравнение  $F_{\text{ФАР}}(\theta) = X$  не имеет аналитического решения. Обозначим этот коэффициент —  $k_\theta$ . Решение уравнения (1) численными методами показало, что указанный коэффициент  $k_\theta$  при определённых условиях может меняться. Зависимость коэффициента  $k_\theta$  от числа элементов при разных значениях  $D$  представлена на рис. 4.

Как видно из представленного графика, величина этого коэффициента в большинстве практических ситуаций ( $n \geq 100$ ;  $D \geq 2\lambda$ ) не зависит от числа элементов и составляет 0,886. Однако при уменьшении числа элементов менее 100 отмечается уменьшение значения этого коэффициента. Последнее позволяет пропорционально уменьшить размер ФАР. Размер ФАР менее одной длины волны, при котором значение  $k_\theta$  увеличивается, на практике не встречается.

Уровень каждого из боковых лепестков не зависит от размера решётки и незначительно зависит от количества элементов ФАР ( $n$ ) и составляет:

$$\begin{aligned} - 0,225^{(n>11)} &\leq A_{1\text{б.л.}} \leq 0,33^{(n=3)}; \\ - 0,135^{(n>13)} &\leq A_{2\text{б.л.}} \leq 0,20^{(n=5)}; \\ - 0,100^{(n>15)} &\leq A_{3\text{б.л.}} \leq 0,14^{(n=7)}; \\ - 0,065^{(n>17)} &\leq A_{4\text{б.л.}} \leq 0,08^{(n=9)}. \end{aligned}$$

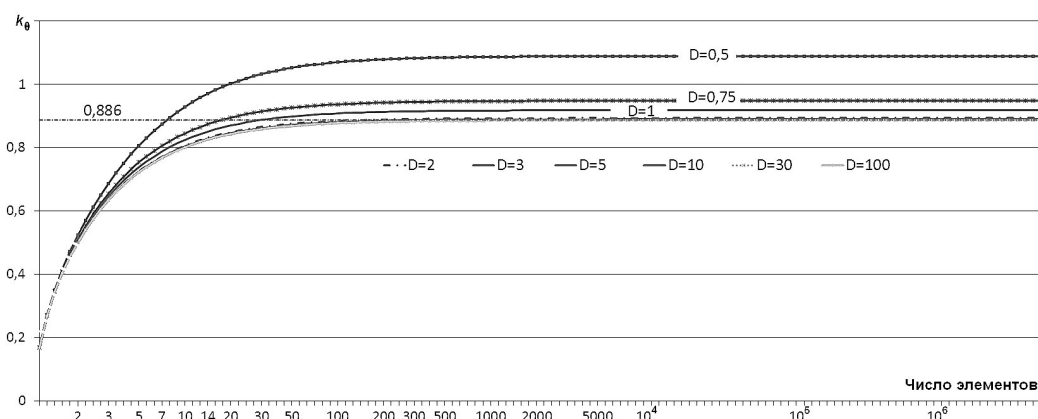


Рис. 4. Зависимость коэффициента пропорциональности  $k_\theta$  от числа элементов ФАР

Графики зависимостей этих величин от числа элементов представлены на рис. 5.

Таким образом, можно считать, что при  $n > 10$  уровни боковых лепестков постоянны и составляют 0,22 для первого бокового лепестка и не превышают значения 0,13 для всех остальных.

Кроме значений уровней боковых лепестков ДН на практике имеет большое значение суммарная мощность, излучаемая (принимаемая) во всех направлениях за пределами главного лепестка ( $\pm \theta_{0,7}$ ). Эта характеристика будет рассмотрена во второй части статьи.

Рассмотрим возможность уменьшения числа излучателей ( $N$ ). Так как размер решётки определяется заданным значением ширины ДН, то уменьшить число элементов можно только за счёт увеличения расстояния между ними — шага решётки. С одной стороны, такое снижение чис-

ла элементов прямо сказывается на снижении коэффициента усиления ФАР в направлении главного максимума. С другой стороны — увеличение шага приводит к появлению локальных максимумов. Указанное снижение коэффициента усиления можно компенсировать за счёт увеличения коэффициента усиления излучателей в соответствии с (1) [4, 5].

Компенсировать «лишние» локальные максимумы можно за счёт применения излучателей с направленными свойствами, если это допускается требуемой величиной сектора обзора сканирования. Например, на рис. 6 представлены случаи применения излучателей с  $\theta_{0,7} = 40^\circ$ . Согласно выражению (3) в решётке  $D = 23 \lambda$  нужно использовать не менее 24 излучателей. Такая же ФАР с 17 элементами имеет дополнительный максимум при  $\theta = 45^\circ$  (с 21 элементом — при

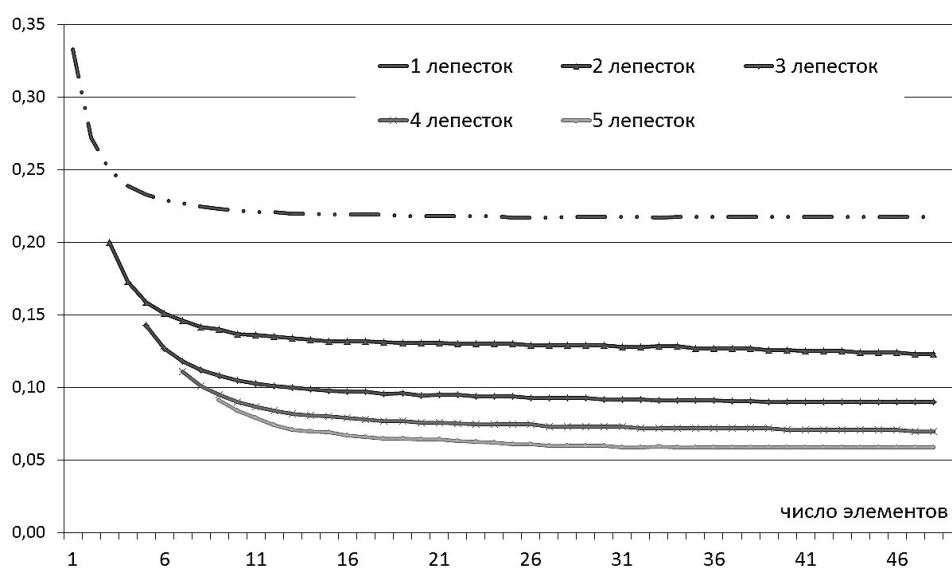


Рис. 5. Уровни боковых лепестков ДН антенной решётки в зависимости от числа элементов

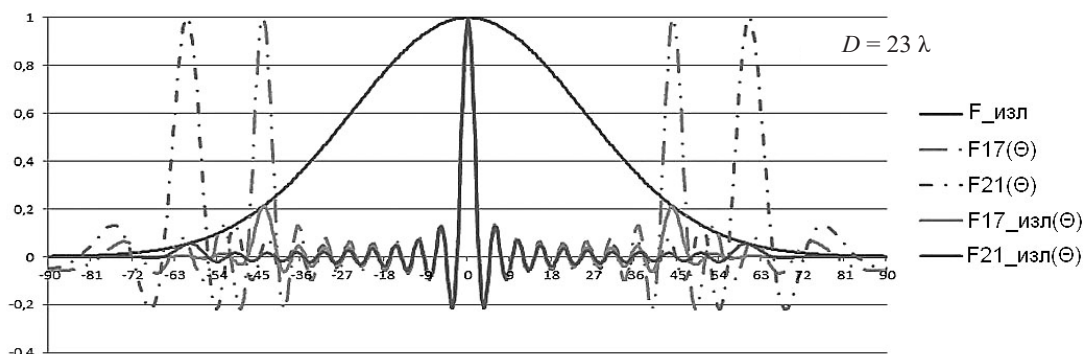


Рис. 6. Диаграммы направленности ФАР для направленных микрофонов при размере решётки  $23 \lambda$  и количестве излучателей 17 и 21

$\theta=62^\circ$ ). Однако применение излучателей с ДН, отличной от круговой, снижает его значение до уровня 0,21, которое не превышает уровня первого бокового лепестка [5].

Обозначим через  $k_{\text{НМ}}$  уменьшение требуемого числа элементов относительно рассчитанного по (3). Тогда формула (3) примет вид:

$$N_{\text{min}} \geq k_{\text{НМ}} \left( \frac{D}{\lambda} + 1 \right). \quad (5)$$

В рассмотренном примере значение  $k_{\text{НМ}}$  составит  $17/24 \approx 0,708$ .

Таким образом, применение направленных излучателей можно охарактеризовать следующими свойствами:

- ограничивает размер сектора наблюдения углом, равным ширине ДН излучателя;
- позволяет увеличивать шаг решётки больше значения  $\eta$  и, соответственно, уменьшать число элементов в решётке.

Первое свойство не приводит к каким-либо дополнительным ограничениям, так как на практике сектор сканирования пространства не превышает  $\pm 30^\circ$ . При больших углах сканирования применение направленных излучателей не актуально.

Второе свойство имеет двойное действие: с одной стороны — уменьшение числа излучателей приведёт к снижению суммарной излучаемой мощности; с другой стороны — увеличение расстояния между излучателями позволит использовать антенны с большей апертурой и, следовательно, с коэффициентом усиления больше единицы. В частности, для рупорных антенн коэффициент направленного действия (КНД) прямопропорционален площади раскрытия. В итоге результирующее значение КНД решётки останется на заданном уровне, а потребляемая мощность и масса уменьшатся [6].

### Исследования зависимости параметров диаграммы направленности плоской периодической ФАР от геометрических параметров и способа построения

В результате исследования параметров ДН плоской решётки рассмотрены следующие характеристики:

- распределение амплитуды боковых лепестков в пространстве;
- распределение мощности излучаемого поля в пространстве;
- зависимость распределения плотности потока мощности в пространстве от типа и параметров решётки;
- влияние направленных свойств излучателей на распределение плотности потока мощности в пространстве.

Амплитудная диаграмма направленности произвольной (в данной работе рассматриваются плоские: квадратная и гексагональная) ФАР также определяется диаграммой направленности отдельного излучателя и множителем решётки. Но в отличие от случая с линейной периодической структурой множитель плоской решётки, в общем случае, не может быть представлен аналитическим выражением. Поэтому для всех вариантов решёток ДН рассчитывается по формуле:

$$F_{\text{ФАР}}(\theta, \varphi) = F_{\text{изл}}(\theta, \varphi) \cdot \left| \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} A_i e^{j\Psi_i(\theta, \varphi)} \right|,$$

где  $F_{\text{изл}}(\theta, \varphi)$  — ДН отдельного излучателя;  $N$  — число излучателей;  $A_i e^{j\Psi_i(\theta, \varphi)}$  — комплексная амплитуда сигнала от  $i$ -го излучателя;  $\Psi_i(\theta, \varphi)$  — фаза  $i$ -го сигнала определяется по формуле:

$$\Psi_i(\theta, \varphi) = \frac{d_i}{\lambda},$$

где  $d_i$  — расстояние от  $i$ -го излучателя до условной плоскости, перпендикулярной направлению, заданному углами  $\theta$  и  $\varphi$ . Как и в случае с выбором опорного излучателя, алгоритм расчёта множителя решётки инвариантен к выбору положения условной плоскости, так как при изменении опорного излучателя и (или) положения условной плоскости все расстояния  $d_i$  изменяются на одинаковую величину.

Для нахождения  $d_i$  необходимо знать координаты излучателя  $x_i$ ,  $y_i$  и  $z_i$  (в системе координат, связанной с антенной решёткой) и направление. Если направление задано углами (азимута  $\varphi$  и угла места  $\theta$ ), то применяется формула:

$$d_i = \sin \theta \cos \varphi \cdot x_i + \sin \theta \sin \varphi \cdot y_i + \cos \theta \cdot z_i.$$

Если для задания направления используются координаты точек (центр антенны и точки наведения), то применяется формула

$$d_i = \frac{Ax_i + By_i + Cz_i}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}},$$

где коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  равны разностям соответствующих координат заданных точек [7].

Данный алгоритм реализован в программе расчёта ДН ФАР с произвольной структурой, разработанной на кафедре. Указанное ПО выполняет расчёт амплитудной и энергетической ДН и визуализацию результатов: отображает как вертикальные сечения (привычный вид ДН) для произвольного азимутального угла, так и горизонтальные сечения на предустановленных уровнях.

В результате расчётного эксперимента получены следующие данные.

Для квадратных решёток характерна сильная неравномерность в уровне боковых лепестков по азимуту. На рис. 7 представлены сечения ДН в плоскости, параллельной, а на рис. 8 — в плоскости, перпендикулярной плоскости решётки.

Из рисунков видно, что значительные по величине боковые лепестки расположены вдоль осей решётки. Общая мощность излучения, приходящаяся на сектор вне зоны главного максимума ( $\pm\theta_{0,7}$ ) не зависит от числа элементов и незначительно увеличивается с увеличением шага решётки вследствие роста дальних боковых лепестков. Её значение составляет от 55% (при  $d < 0,5\lambda$ ) и более. Средний уровень боковых лепестков с увеличением размеров решётки (и соответственно — сужением главного лепестка) уменьшается.

Указанную неравномерность боковых лепестков можно использовать, если известно направление на источник помех (или на РЭС, взаимодействия с которой нежелательно). Пово-

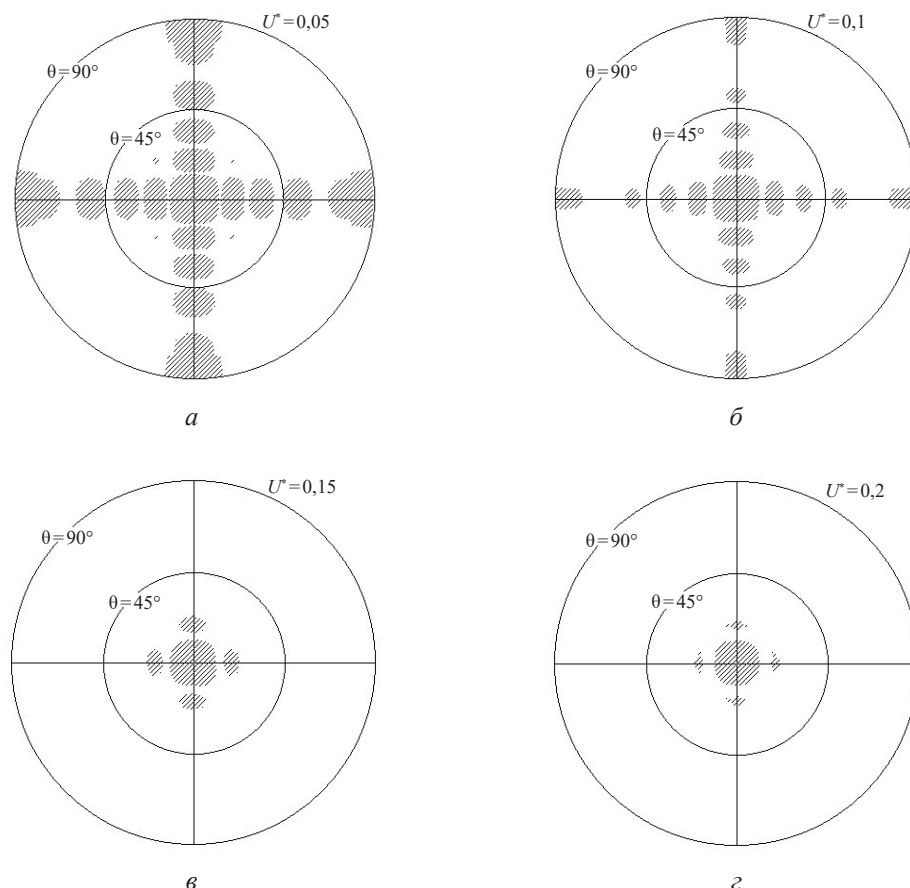


Рис. 7. Диаграмма направленности квадратной ФАР  $9 \times 9$  в виде сечений на уровнях  $U^*$ : 0,05 (а), 0,1 (б), 0,15 (в) и 0,2 (г)

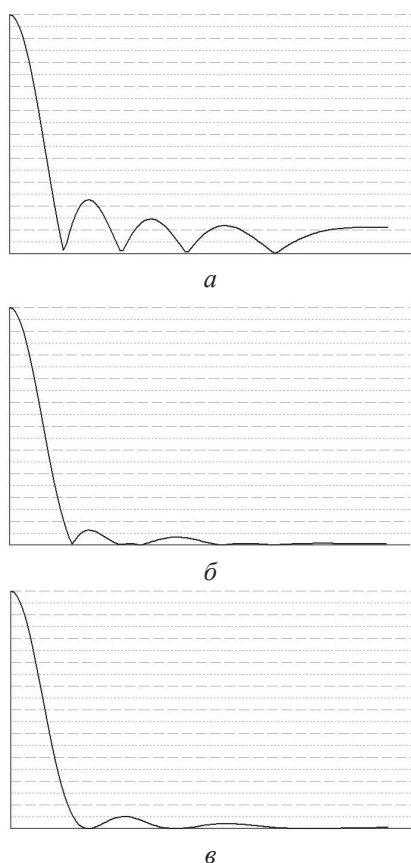


Рис. 8. Диаграмма направленности ФАР 9×9: сечения по углам 0° (а), 30° (б) и 45° (в)

ротом антенны вокруг оси можно направить на указанное направление сектор с низким уровнем боковых лепестков.

В ходе эксперимента был проведён подобный анализ ФАР, построенных по иной геометрии, в частности — на основе шестигранников (рис. 9). Сечения её ДН приведены на рис.10 а, б, в. Из рисунка видно, что ДН имеет равномерную структуру по всем азимутам. А анализ вертикального сечения, приведённого на рис.10, г, показывает, что боковые лепестки нигде не превосходят уровень 0,15. Боковые лепестки с четвёртого и далее не превосходят уровень 0,05. Однако, как будет показано, суммарный и средний уровни мощности во всех боковых лепестках равны соответствующим параметрам для квадратных решёток.

На рис. 11 показаны данные расчётного эксперимента по определению ширины ДН ФАР в зависимости от числа элементов для квадратной и гексагональной структур. Ширина ДН определяется геометрическими размерами решётки и не зависит от её формы.

Кроме амплитудных значений ДН указанная программа рассчитывает плотность потока мощности и суммарную мощность излучения в заданных пространственных секторах.

Расчёт мощности электромагнитной волны, приходящейся на заданный пространственный сектор, проводится суммированием мощностей в каждом элементарном секторе пространства.

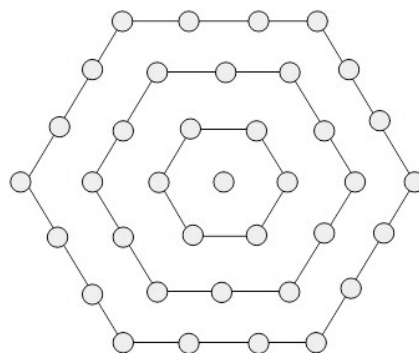


Рис. 9. ФАР с гексагональной структурой

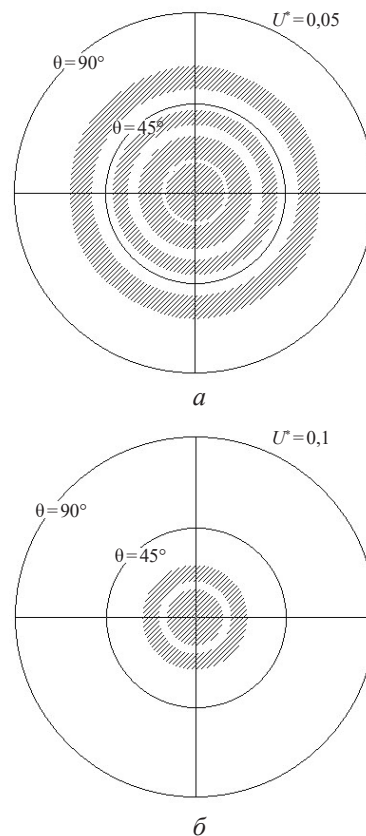
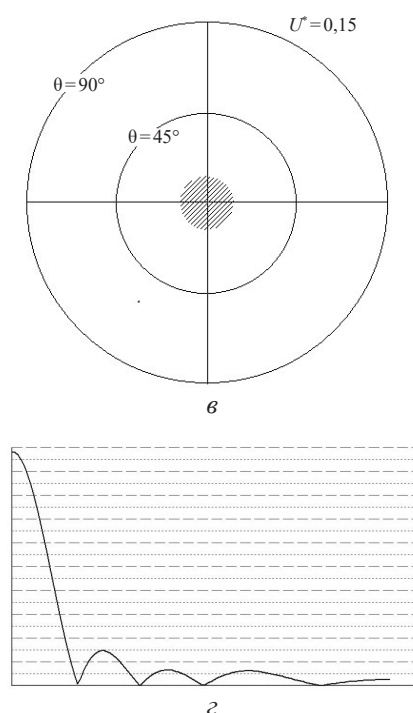


Рис. 10. Диаграмма направленности гексагональной ФАР с 4-мя рядами в виде сечений на уровнях  $U^*$ : 0,05 (а), 0,1 (б) и 0,15 (в) и её вертикальный профиль (г)





Продолжение рис. 10. Диаграмма направленности гексагональной ФАР с 4-мя рядами в виде сечений на уровнях  $U^*$ : 0,05 (а), 0,1 (б) и 0,15 (в) и её вертикальный профиль (г)

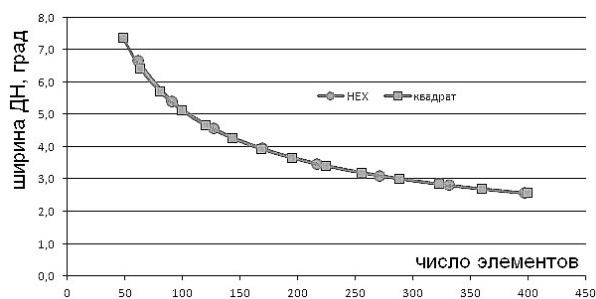


Рис. 11. Зависимость ширины ДН от числа элементов для ФАР с разной структурой

Величина плотности потока мощности определяется исходя из рассчитанного значения амплитудной ДН по формуле

$$E_{\theta,\varphi} = \frac{U^2}{120\pi} \cdot$$

Суммирование ведётся с учётом величины пространственного угла, в котором получено значение ДН. Пространственный угол  $\gamma$  в используемой системе координат (азимут, угол места) определяется как

$$\sin \gamma = \sin(\Delta\varphi) \sin(\Delta\theta) \sin \theta,$$

где  $\Delta\varphi$ ,  $\Delta\theta$  — шаг по азимуту и углу места соответственно;  $\theta$  — угол места.

Тогда суммарная мощность определяется как

$$E_{\text{сумм}} = \sum_{\varphi} \sum_{\theta} E_{\theta,\varphi} \sin(\gamma).$$

Далее в статье используются следующие обозначения зон ДН: «главный» — сектор пространства в пределах установленной ширины ДН  $\theta_{0,7}$ ; «нулевой» — основной максимум за пределами главного; «первый» — первый боковой максимум; «2+» — второй и последующие лепестки ДН.

В ходе реализации программного эксперимента был проведён анализ следующих зависимостей:

- энергии главного и боковых лепестков в зависимости от геометрии построения;
- энергии основного и боковых лепестков в зависимости от направленных свойств излучателя.

В результате первого исследования получены следующие данные (рис. 12). Мощность в пределах пространственного сектора, соответствующего углу  $\theta_{0,7}$  не зависит от числа элементов и составляет 47% для гексагональных ФАР и 42 ÷ 43% для квадратных. Соответственно, для последних большая часть мощности в дальних боковых лепестках.

В ходе второго исследования была проведена проверка возможности подавления боковых лепестков и, особенно, локальных максимумов, возникающих при увеличении шага решётки более длины волны (рис. 6) путём применения слабонаправленных излучателей.

В качестве слабонаправленных излучателей были рассмотрены рупорные антенны (РА) и спиральные антенны (СПА), как разновидность антенн бегущей волны.

Диаграммам направленности РА описываются формулами:

$$F_H(\theta) = \frac{\cos(\theta) + \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a_p}\right)^2} \cdot \cos\left(\frac{\pi a_p}{\lambda} \sin(\theta)\right)}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a_p}\right)^2} \cdot \cos\left(\frac{\pi a_p}{\lambda} \sin(\theta)\right)};$$

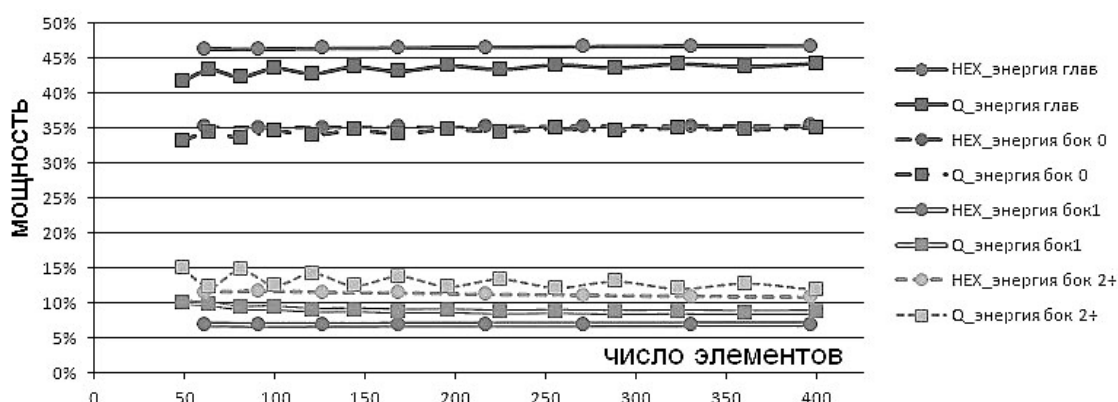


Рис. 12. Мощность, излучаемая в главном, нулевом, первом и последующих боковых лепестках для ФАР с квадратной и гексагональной структурами

$$F_E(\theta) = \frac{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a_p}\right)^2} \cos(\theta) \sin\left(\frac{\pi b_p}{\lambda} \sin(\theta)\right)}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a_p}\right)^2} \frac{\pi b_p}{\lambda} \sin(\theta)}$$

Отличие ДН в *E*- и *H*-плоскостях объясняется разным<sup>1</sup> (равномерным и косинусоидальным) распределением напряжённости поля в раскрыве. При этом ширина ДН по нулевому уровню в *E*-плоскости определяется соотношением  $\sin \theta = \lambda/b_p$ . С учетом того, что размер  $b_p$  меньше или равен шагу решётки, а также (2) — угол нуля ДН излучателя может совпадать с углом локального максимума решётки, что приведёт к его компенсации. Но в *H*-плоскости соответствующее соотношение имеет вид  $\sin(\theta) = 2\lambda/a_p$ . Следовательно, ширина ДН по нулевому уровню в этой плоскости будет значительно больше и локальный максимум не будет компенсирован. Следовательно, рупорные антенны не подходят для использования в ФАР с шагом, большим  $0,5\lambda$ .

Спиральные антенны при длине витка, измеримой с длиной волны (диаметр спирали  $\approx 1/3 \lambda$ ), имеют ДН, вытянутую вдоль оси. При этом ширина ДН по нулевому уровню определяется количеством и шагом витков. Следовательно, можно подобрать параметры спиральных

излучателей так, чтобы локальные максимумы были компенсированы. Примеры диаграммообразования (множитель решётки, ДН излучателя и результирующая диаграмма направленности) показаны на рис. 13. На рис. 13, *a* показан случай ДН ФАР без локальных максимумов, а на рис. 13, *б* — с локальным максимумом.

Из рисунка видно ослабление боковых лепестков, начиная со второго, в несколько раз и, соответственно, компенсация локального максимума до уровня второго бокового лепестка. Уменьшение ширины ДН спиральной антенны для снижения уровня первого бокового лепестка, с одной стороны, имеет смысл только для ФАР, имеющих единственное рабочее направление главного максимума (без сканирования). А с другой стороны — ограничено по техническим причинам: требуется большая длина спирали, а из практики известно, что витки после одиннадцатого практически не излучают и не влияют на ДН. Шаг спирали также нельзя увеличивать более половины длины волны. В противном случае спираль вырождается в линейный вибратор, а её ДН — в тор, не имеющий излучения вдоль оси.

На рис. 14 в виде нормированной гистограммы с накоплением показан уровень излучения (в процентах) для главного, нулевого, первого и последующих лепестков ДН ФАР. На рис. 14, *a–в* представлены данные для ФАР с шагом  $0,5\lambda$ ,  $0,85\lambda$ , и  $1,12\lambda$  соответственно. На каждом из рисунков показаны распределения излучаемой энергии для СПА с различным числом

<sup>1</sup> Является принципиальной особенностью рупорных (и волноводных) излучателей.

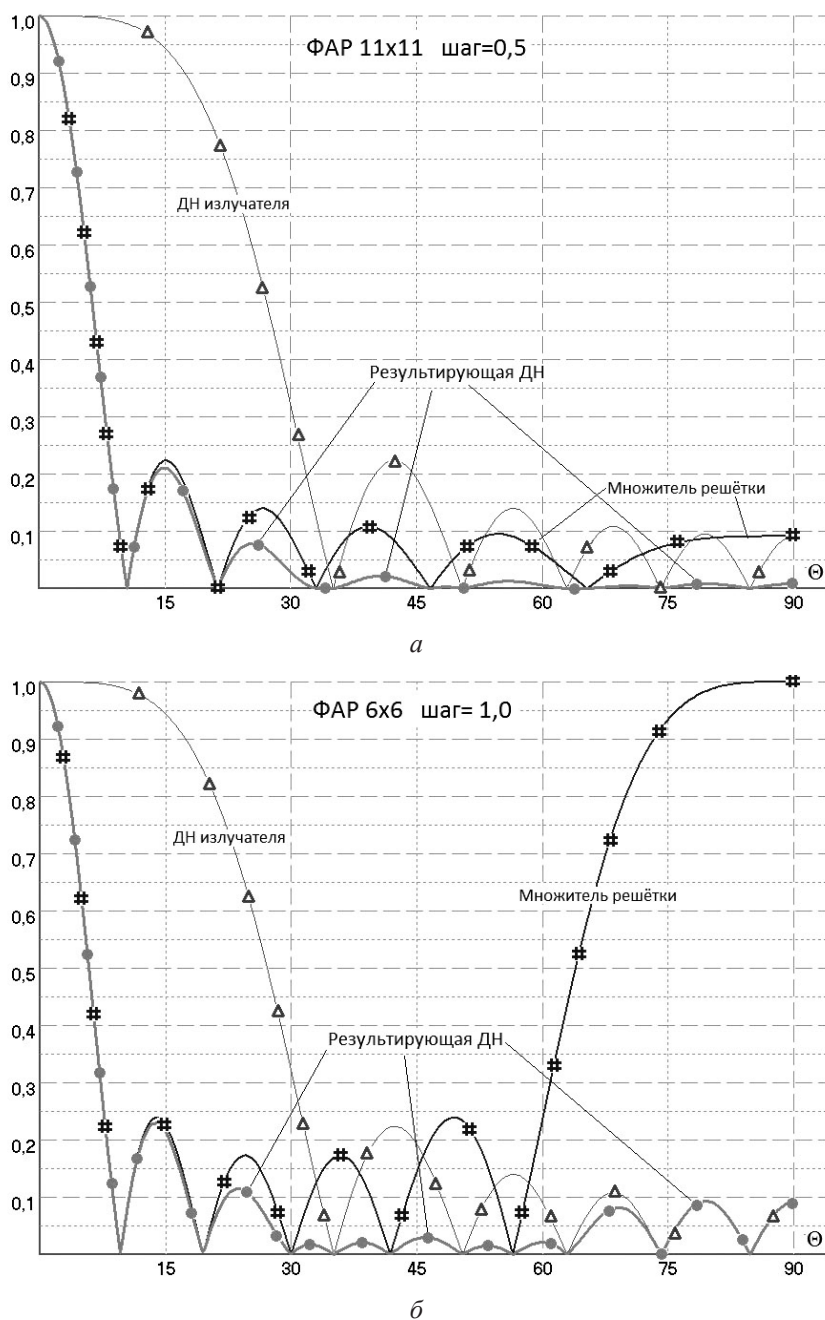


Рис. 13. Диаграмма направленности ФАР с шагом  $0,5\lambda$  (а) и равной по размеру ФАР с шагом  $1,0\lambda$  (б) при применении СпА в качестве слабонаправленного излучателя

элементов ( $N=4, 8$  и  $11$ ) и различным шагом ( $S=0,2\lambda, 0,3\lambda, 0,4\lambda$  и  $0,5\lambda$ ).

Из анализа данных на рис.14 а, б, в видно, что для ФАР с шагом  $0,5\lambda$  любая спираль снижает уровень дальних (2+) боковых лепестков и, соответственно, незначительно повышает мощность в главном секторе. В случае увеличения шага решётки увеличивается уровень дальних боковых лепестков (рис. 14 б, в) и возникает ло-

кальный максимум (рис. 14 в). При этом видно, что эффективность компенсации у коротких спиралей — низкая, а шаг спирали влияет незначительно.

На рис. 14 г представлена сводная гистограмма для ФАР размером  $5 \times 5$  длин волн и состоящей из  $11^2=121$  ( $N=N_0$ ),  $10^2=100$  ( $N=0,83N_0$ ),  $9^2=81$  ( $N=0,67N_0$ ),  $8^2=64$  ( $N=0,53N_0$ ),  $7^2=49$  ( $N=0,4N_0$ ),  $6^2=36$  ( $N=0,3N_0$ ) и  $5^2=25$  ( $N=0,21N_0$ ) излучате-

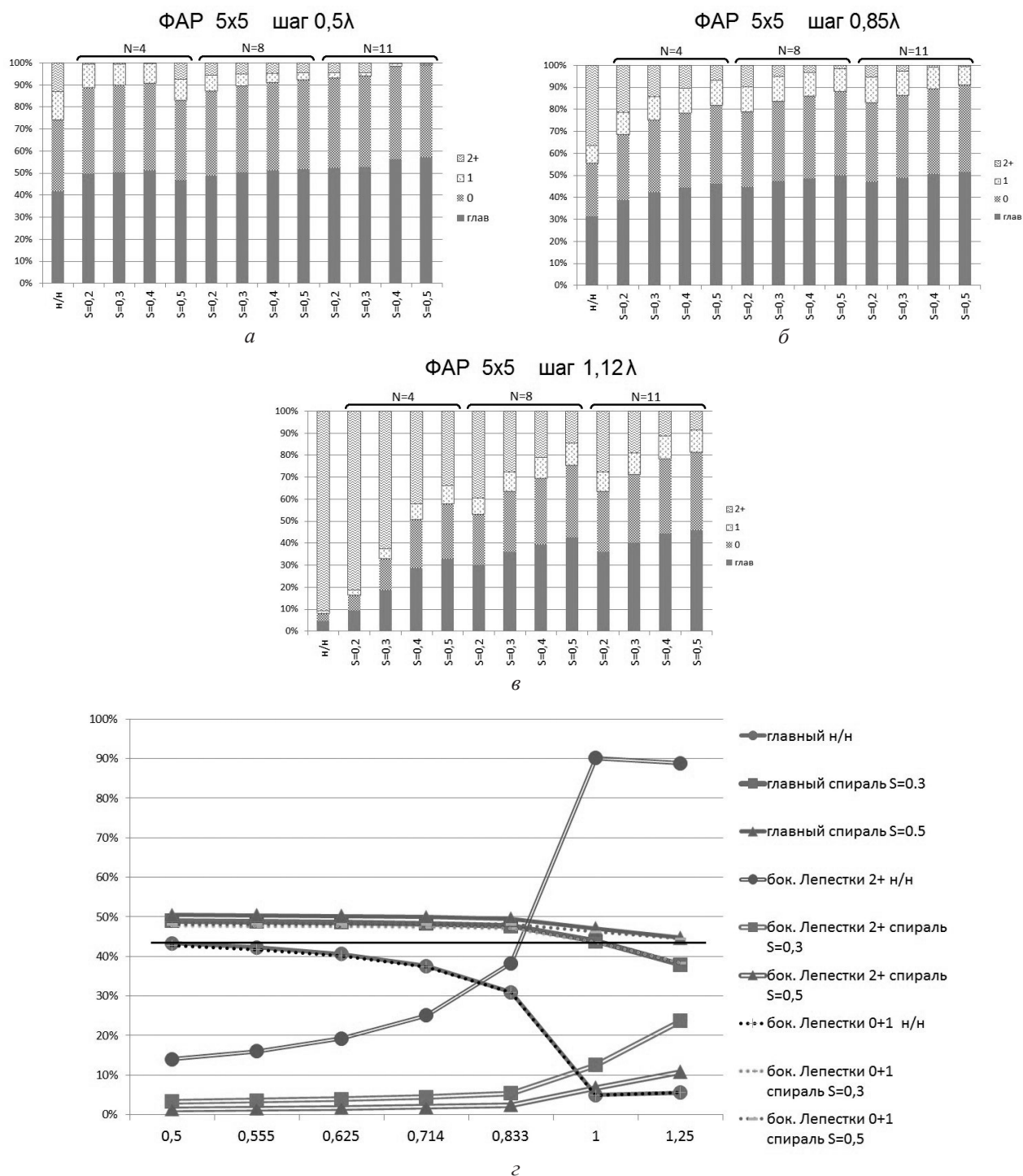


Рис. 14. Распределение энергии излучения ФАР по областям (главная, нулевая, первый боковой лепесток и все последующие боковые лепестки) для ФАР с разным шагом и различными параметрами излучателя — спиральной антенны (числа витков  $N$  и шага  $S$ ), и сводная гистограмма (г) таких распределений

лей. В качестве излучателей рассматриваются: ненаправленный излучатель, спиральная антенна с 11 витками и шагом  $0,3\lambda$  и  $0,5\lambda$ . Уменьшение числа элементов при постоянном размере приводит к увеличению шага решётки и, как следствие,

к росту уровней дальних боковых лепестков вплоть до возникновения локального максимума. В случае ненаправленного излучателя мощность, приходящаяся на главный сектор, уменьшается сначала незначительно, а после шага  $0,833\lambda$  па-

дает более чем на порядок (за счёт появления локального максимума). Применение спиральных антенн позволяет ограничить мощность в дальних боковых лепестках до приемлемого уровня и тем самым сохранить мощность в главном секторе. Из анализа данных на рис. 14 *з* видно, что при привычной компоновке ( $d=0,5\lambda$ ) применение СПА повышает ( $\sim$  на 10%) мощность в главном секторе и при применении СПА с 11 витками и шагом  $0,5\lambda$ , даже для ФАР с шагом  $1,25\lambda$ , значение мощности в главном секторе остаётся не ниже исходной (антенная решётка ненаправленных излучателей с шагом  $0,5\lambda$ ).

Таким образом, из данных рис. 14 *з* видно, что снижение общего числа излучателей в  $\sim 5$  раз и применение спиральных излучателей позволяет сохранить относительный уровень энергии, приходящейся на главный сектор. Для сохранения абсолютного уровня излучаемой энергии необходимо, чтобы КНД (коэффициент направленного действия) излучателя был не ниже значения относительного уменьшения числа излучателей  $\frac{N}{N_0}$  (в рассматриваемом примере — 5).

КНД спиральных антенн можно оценить по формуле [8]:

$$\text{КНД} \approx 7,5 \left( \frac{2\pi}{\lambda} r \frac{1}{\cos \alpha} \right)^2 \frac{L}{\lambda},$$

где  $r$  — радиус спирали;  $\alpha$  — угол намотки;  $L$  — длина спирали.

Так как  $L$  чаще всего находится в диапазоне  $2 \div 5\lambda$ , а значение в скобках больше единицы, то требование КНД  $> \frac{N}{N_0}$  выполняется.

### Заключение

В данной статье показана возможность снижения массогабаритных характеристик ФАР вследствие уменьшения числа приёмо-передающих модулей. Последнее достигается за счёт увеличения расстояния между излучателями, а возникающие при этом локальные максимумы компенсируются применением слабонаправленных излучателей типа антенн бегущей волны (рассмотрена спиральная антенна). Также в работе рассмотрена возможность перераспределения энергии боковых лепестков за счёт применения гео-

метрии решётки, отличной от квадратной. Данная характеристика позволяет учитывать особенности радиоэлектронной обстановки для снижения уровня помех (или нежелательного излучения).

### Литература

1. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: Учебник для вузов / Г.А. Ерохин, О.В. Чернышев, Н.Д. Козырев, В.Г. Кочержевский; Под ред. Г.А. Ерохина. 2-е изд. — М.: Горячая линия – Телеком. 2004. 491 с.
2. Лавров А.С., Резников Г.Б. Антенно-фидерные устройства. Учебное пособие для вузов. — М.: «Сов. радио». 1974. 368 с.
3. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. пособие для вузов / В.С. Филиппов, Л.И. Пономарев, Ю.А. Гринев и др.; Под ред. Д.И. Воскресенского. 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Радио и связь. 1994. 592 с.
4. Теоретические основы оценки возможностей средств радиоэлектронного наблюдения: учеб. пособие / А.В. Паршуткин, В.В. Вознюк и др.; под ред. А.В. Паршуткина. — СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2014. 168 с.
5. Паршуткин А.В., Левин Д.В., Галандзовский А.В. Имитационная модель обработки радиолокационной информации в сети радиолокационных станций в условиях сигналоподобных помех // Информационно-управляющие системы. 2019. № 6 (103). С. 22–31.
6. Наговицын А.В. Технологические основы создания крупногабаритных трансформируемых антенн для радиотехнических комплексов орбитального базирования / В.В. Вознюк, А.Н. Наговицына. — М.: Вестник Российского нового университета. 1/2019. С. 55–61.
7. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. — М.: «Век», «Большая Медведица». 1997. 864 с.
8. Антенно-фидерные устройства: учебн. пособие для вузов связи. — М.: «Связь». 1977. 440 с.
9. Воскресенский Д.И. (ред.) Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. Учебное пособие для вузов. 4-е издание, переработанное и дополненное. — Москва: Радиотехника. 2012. 744 с.: ил. — ISBN 978-5-88070-311-1.

10. Вендик О.Г. Фазированная антенная решетка — глаза радиотехнической системы // Соросовский образовательный журнал. № 2. 1997. С. 116–118.

11. Автоматизированное проектирование антенн и устройств СВЧ / Д.И. Воскресенский, С.Д. Кременецкий, А.Ю. Гринев, Ю.В. Котов. — М.: Радио и связь. 1988. 240 с.

12. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электронным движением луча. (Введение в теорию). — М.: Сайнс-пресс. 2002. 302 с.

13. Иванов В.Н., Линдваль В.Р. Проектирование антенных систем с учетом электромагнитной безопасности // Электронное приборостроение. Научно-практический сборник. Выпуск 1 (42). — Казань: ЗАО «Новое знание». 2005. С. 53–62.

### References

1. Antenna-feeder devices and radio wave propagation: Textbook for universities / G.A. Erokhin, O.V. Chernyshev, N.D. Kozyrev, V.G. Kocherzhevsky. 2nd ed. — M.: Hotline – Telecom. 2004. 491 p.

2. Lavrov A.S. Reznikov G.B. Antenna-feeder devices. Textbook for universities. — M., «Sov. radio». 1974. 368 p.

3. Antennas and microwave devices. Design of phased array antennas: Textbook. Manual for schools / V.S. Filippov, L.I. Ponomarev, Y.A. Grinev, etc.; Under the editorship D.I. Voskresensky. 2nd ed. — M.: Radio and communications. 1994. 592 p.

4. Theoretical foundations for evaluating the capabilities of electronic surveillance tools: textbook.manual / A.V. Parshutin, V.V. Voznyuk, etc.; Under the editorship of A.V. Parshutin. — St. Petersburg: A.F. Mozhaisky VKA. 2014. 168 p.

5. Parshutin A.V., Levin D.V., Galandzovskiy A.V. Simulation model of radar information processing in a network of radar stations in conditions of signal-like interference // Information and control systems. 2019. № 6 (103). P. 22–31.

6. Nagovitsyn A.V. Technological basis for the creation of the transformable antennas for radio systems orbital deployment / V.V. Voznyuk, A.N. Nagovitsyna. — M.: Bulletin of the Russian new University. 1/2019. P. 55–61.

7. Reference book on higher mathematics / M.J. Profitable. — M.: «Century», «The Big Dipper». 1997. 864 p.

8. Antenna-feeder devices. Training. Manual for higher education institutions of communications. — M.: «Svyaz». 1977. 440 p.

9. Voskresensky D.I. (ed.) Microwave devices and antennas. Design of phased antenna arrays. Textbook for universities. 4th edition, revised and enlarged. — Moscow: Radiotekhnika. 2012. 744 p.: ill. — ISBN 978-5-88070-311-1.

10. Vendik O.G. A phased array antenna is the eyes of a radio engineering system. // Soros Educational Journal. № 2. 1997. P. 116–118.

11. Computer-aided design of antennas and microwave devices / D.I. Voskresensky, S.D. Kremenetsky, A.Yu. Grinev, Yu.V. Kотов. — M.: Radio and communication. 1988. 240 p.

12. Vendick O.G., Parnes M.D. Antennas with electronic beam movement. (Introduction to theory). — M.: Sains-press. 2002. 302 p.

13. Ivanov V.N., Lindval V.R. Design of antenna systems taking into account electromagnetic safety // Electronic Instrument Engineering. Scientific and practical collection. Issue 1 (42). — Kazan: CJSC «New Knowledge». 2005. P. 53–62.