

К 100-ЛЕТИЮ  
Б.В. СЕСТРОРЕЦКОГО

УДК 621.396.67

УМЕНЬШЕНИЕ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ, НАПРАВЛЕННЫХ  
НА ПОДСТИЛАЮЩУЮ ПОВЕРХНОСТЬ, ДЛЯ ФАЗИРОВАННЫХ  
АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С УПРАВЛЕНИЕМ ТОЛЬКО ФАЗОЙ

© 2023 г. Ю. В. Кривошеев<sup>a, b, c, \*</sup>, А. В. Хайхан<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup> Публичное акционерное общество “Радиофизика”,

ул. Героев Панфиловцев, 10, Москва, 125363 Российская Федерация

<sup>b</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Институтский пер., 9, Долгопрудный Московской обл., 141701 Российская Федерация

<sup>c</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Волоколамское шос., 4, Москва, 125993 Российская Федерация

\*E-mail: krivosheev-yury@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.02.2023 г.

После доработки 20.02.2023 г.

Принята к публикации 21.05.2023 г.

Рассмотрено применение метода фазового синтеза для снижения нижних боковых лепестков (БЛ) диаграммы направленности (ДН) фазированных антенных решеток (ФАР). Выведены зависимости изменения параметров ДН от уровня нижних БЛ и определены предельные возможности данного метода по снижению БЛ. Также рассмотрен случай, когда уменьшаются не все нижние БЛ, а только начиная с некоторого произвольного БЛ. Показано, что в этом случае можно добиться более низкого уровня БЛ и меньшей деградации других параметров ДН.

DOI: 10.31857/S0033849423080089, EDN: UQGXC0

ВВЕДЕНИЕ

Метод фазового синтеза позволяет управлять формой диаграммы направленности (ДН) фазированных антенных решеток (ФАР). Метод позволяет создавать контурные ДН с постоянным или переменным профилем и уменьшать боковые лепестки (БЛ) [1–4]. В частности, метод может использоваться для уменьшения БЛ ФАР без расширения главного лепестка [5–9]. Эта задача актуальна для активных передающих ФАР, так как для таких антенн стремятся использовать равномерное амплитудное распределение, что не позволяет снижать БЛ с помощью управления амплитудой. Боковые лепестки могут снижаться как во всем пространстве [5, 6], так и только в нижней части относительно главного лепестка [7–9]. Последнее может потребоваться, например, для уменьшения отражения от подстилающей поверхности в радиолокаторах.

Возможности фазового синтеза для снижения БЛ во всем пространстве ограничены, и, кроме того, при использовании данного метода значительно снижается коэффициент усиления (КУ) решетки. Так, при снижении БЛ на 5 дБ, КУ снижается примерно на 1 дБ для типичной прямоугольной решетки. При снижении только нижних БЛ можно добиться значительно большего уменьшения

их уровня. В данном случае также происходит некоторое снижение КУ, увеличение БЛ, находящихся выше главного лепестка, и возрастает ширина главного лепестка. Данным методом можно добиться снижения нижних БЛ на 20...30 дБ при падении КУ на 1 дБ. Указанные особенности известны из работ [5, 7].

В данной работе проводится моделирование метода снижения нижних БЛ за счет фазового синтеза для нескольких вариантов геометрии решетки. На основе проведенных расчетов были исследованы предельные возможности метода, построены графики снижения КУ, возрастания верхних БЛ и увеличения ширины луча в зависимости от уровня нижних БЛ, а также найдены зависимости минимального уровня нижних БЛ от количества излучателей в линейной антенной решетке. Эти зависимости могут использоваться для быстрой оценки достижимых параметров при проектировании ФАР.

Также в работе показано, что с помощью фазового синтеза можно уменьшать нижние БЛ ФАР, начиная не только с первого, но и с некоторого произвольного БЛ, и рассмотрено, как влияет снижение нижних БЛ на параметры ДН ФАР.

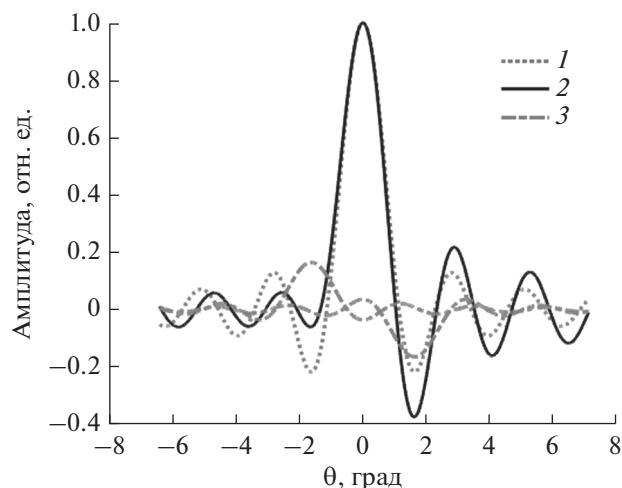


Рис. 1. Исходная (1) и суммарная (2) диаграммы направленности ФАР, а также парциальные лучи (3).

## 1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Метод снижения нижних БЛ с помощью фазового синтеза может быть пояснен на основе метода парциальных диаграмм [10]. Данное представление позволяет дать физическую интерпретацию основным свойствам метода. Согласно методу парциальных ДН для уменьшения бокового излучения в некотором направлении необходимо сформировать парциальный луч в этом направлении. Однако это требует управления как фазой, так и амплитудой возбуждения излучателей. Если при использовании метода парциальных ДН перейти к равномерному амплитудному распределению, не меняя фазового распределения, то возникнет второй парциальный луч в симметричном направлении, фаза которого отличается на  $180^\circ$  относительно исходно-

го [7, 11, 12]. Первый парциальный луч приводит к уменьшению БЛ, а второй парциальный луч, наоборот, приводит к увеличению БЛ в соответствующем направлении. При необходимости уменьшить ДН в некоторой области следует использовать несколько парциальных лучей. Для каждого из них также возникает парный луч в симметричном направлении и в противофазе, приводящий к возрастанию БЛ в данных направлениях.

В качестве примера рассмотрим линейную ФАР из 30 элементов с шагом  $\lambda/2$ , у которой снижаются четыре первых БЛ слева. В этом случае формируется четыре пары парциальных лучей. Полученная ДН в единицах амплитуды приведена на рис. 1. Там же показана исходная ДН до снижения БЛ и пара парциальных лучей, соответствующих первому БЛ. Видно, что парциальный луч слева снижает БЛ, а соответствующий ему парциальный луч справа, возникающий из-за отсутствия управления амплитудой, увеличивает БЛ. На рис. 2 представлена ДН в децибелах, на которой также видно снижение БЛ слева и увеличение БЛ справа. На рис. 3 показано полученное фазовое распределение. Оно имеет вид нечетной функции (схожей с синусоидой) с небольшими осцилляциями. В апертуру решетки укладывается чуть больше одного периода синусоиды. Эта синусоида соответствует парциальному лучу для уменьшения первого БЛ: первый БЛ имеет максимальную амплитуду, и поэтому ему соответствует наибольший парциальный луч. Более частые осцилляции соответствуют остальным парциальным лучам.

В методе парциальных диаграмм применительно к задаче снижения нижних БЛ с помощью фазового синтеза используется ряд приближений. Более качественные результаты могут быть получены при расчете ДН с помощью множителя решетки

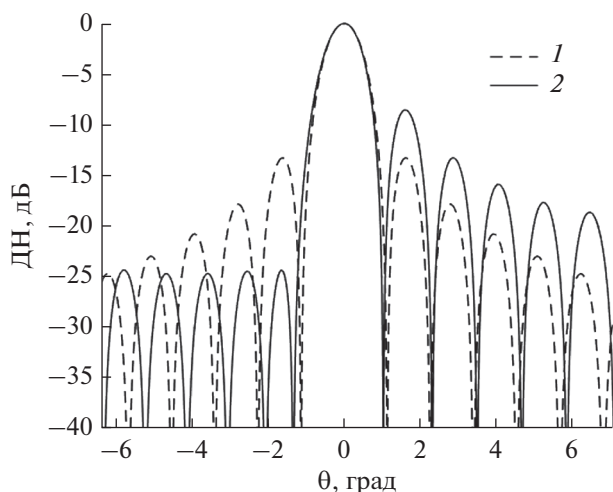


Рис. 2. Исходная диаграмма направленности решетки (1) и с уменьшенными нижними БЛ (2).

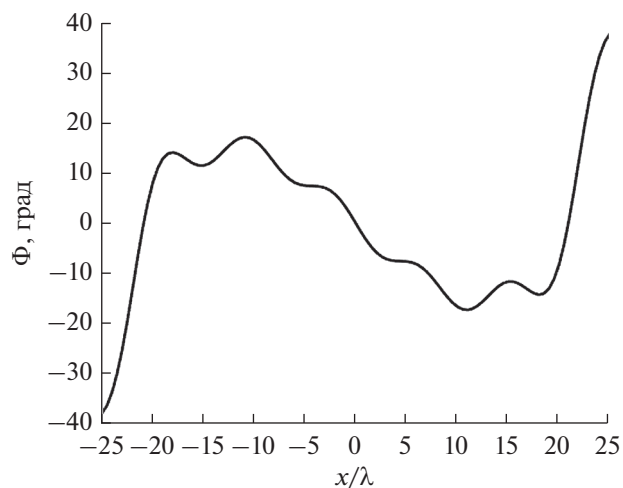
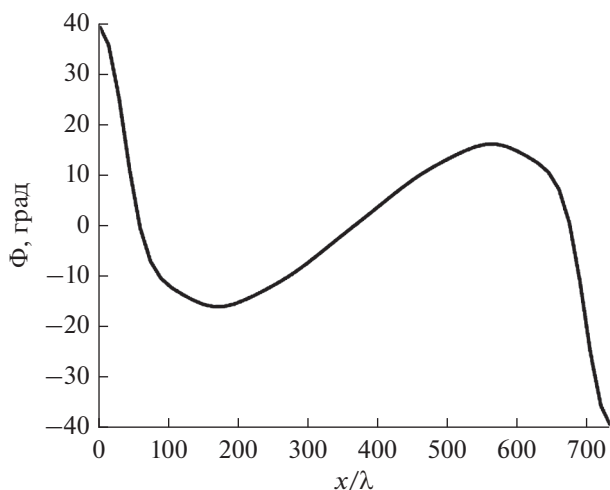
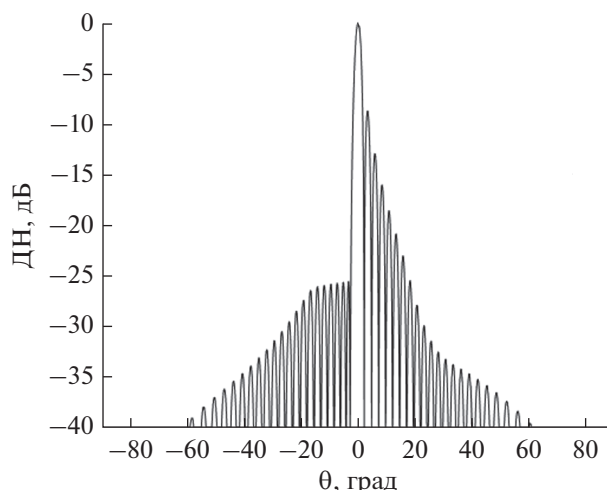


Рис. 3. Фазовое распределение, полученное методом парциальных диаграмм:  $x$  – координата элемента,  $\lambda$  – длина волны.



**Рис. 4.** Фазовое распределение, обеспечивающее УБЛ в направлении подстилающей поверхности ниже  $-25.5$  дБ:  $x$  — координата элемента,  $\lambda$  — длина волны.



**Рис. 5.** Угломерное сечение ДН линейной ФАР с УБЛ в направлении подстилающей поверхности ниже  $-25.5$  дБ.

и численной оптимизации фаз возбуждения излучателей. При проведении численной оптимизации могут применяться различные целевые функции и методы оптимизации. В данной работе использовалась минимаксная целевая функция [4]

$$h(\mathbf{p}) = G_p(0, 0) - w \max_{(u,v) \in \Omega} G_p(u, v), \quad (1)$$

где  $\mathbf{p}$  — фазы возбуждения излучателей,  $w$  — вес минимизации УБЛ,  $\Omega$  — область точек минимизации БЛ (выбирается дискретный набор точек с таким шагом, чтобы на каждый лепесток ДН приходилось по несколько точек),  $G_p(u, v)$  — ДН решетки, рассчитанная с использованием множителя решетки.

Тогда задачу оптимизации можно сформулировать так

$$h(\mathbf{p}) \rightarrow \max. \quad (2)$$

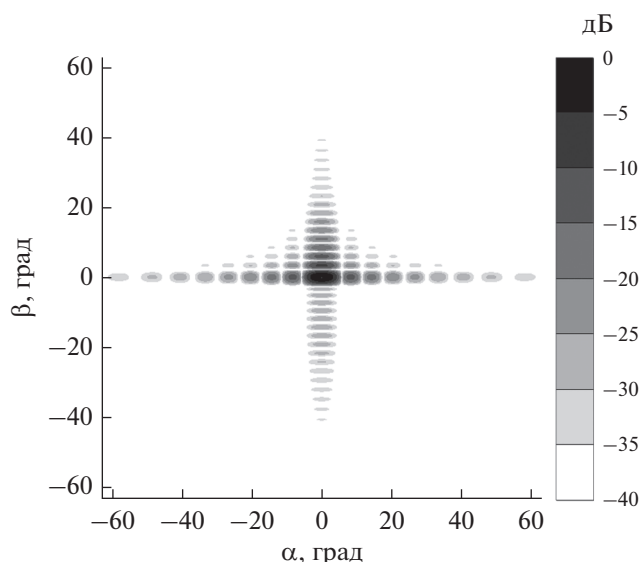
Целевую функцию можно также модифицировать таким образом, чтобы УБЛ уменьшались до какого-то заданного уровня БЛ [4]. Оптимизацию проводили градиентным методом.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

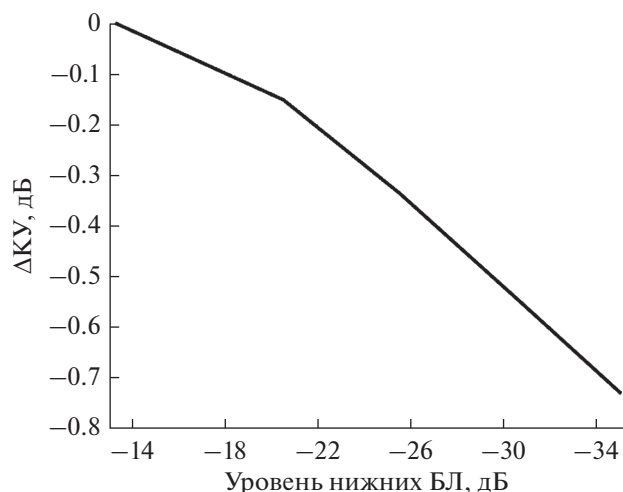
Рассмотрим задачу подавления УБЛ в направлении подстилающей поверхности на примере линейной ФАР из 50 элементов с шагом  $\lambda/2$ . Будем уменьшать нижние БЛ ФАР с помощью описанного выше метода до уровня  $-25.5$  дБ. Амплитудное распределение равномерное. В качестве диаграммы элемента используется идеальная ДН  $F^2(\theta, \varphi) = \cos \theta$ . Полученное в результате оптимизации фазовое распределение показано на рис. 4, ДН — на рис. 5. По сравнению с синфазным распределением КУ снижается на  $0.34$  дБ, верхние

БЛ возрастают до уровня  $-8.7$  дБ, луч расширяется на  $2\%$ .

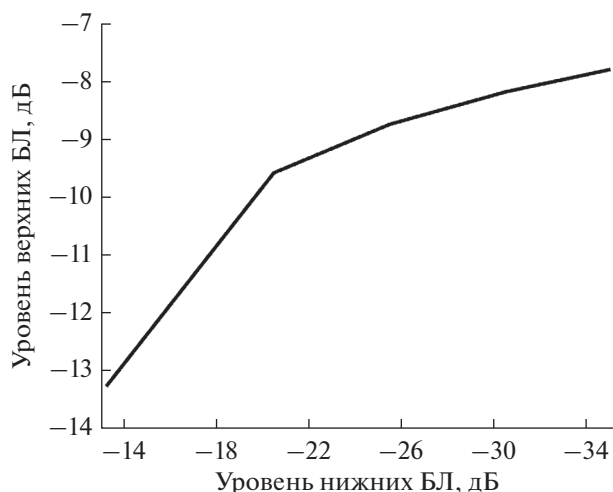
Отметим, что для двумерной решетки прямоугольной формы с прямоугольной или треугольной сеткой задача также сводится к определению фаз одномерной решетки. Для примера на рис. 6 приведена картограмма ДН решетки из  $20 \times 50$  элементов с шагом  $\lambda/2$  и квадратной сеткой, в координатах азимут ( $\alpha$ ) — угол места ( $\beta$ ). Распределение фазы вдоль столбцов такое же, как распределение фазы для рассмотренной выше линейной решетки. Сечение ДН в вертикальной плоскости совпа-



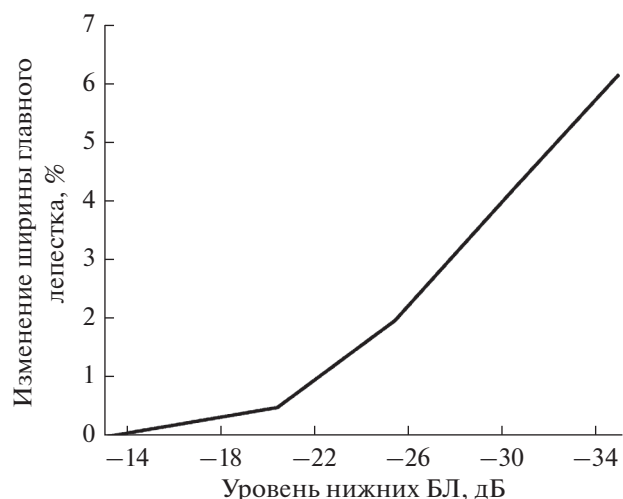
**Рис. 6.** Картограмма ДН прямоугольной ФАР с УБЛ в направлении подстилающей поверхности ниже  $-25.5$  дБ.



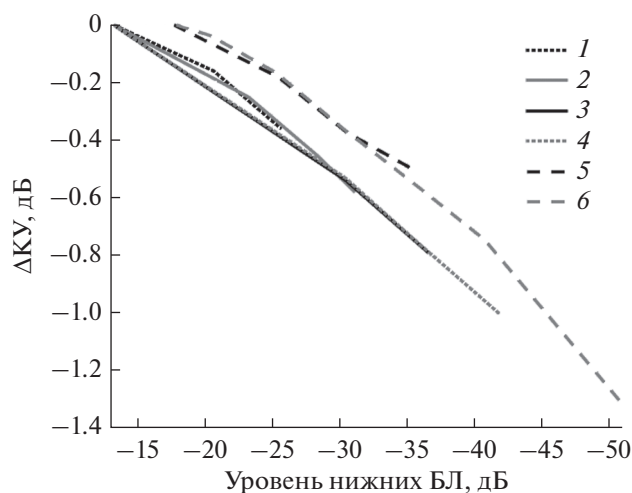
**Рис. 7.** График изменения КУ линейной ФАР из 50 излучателей по сравнению с синфазным распределением.



**Рис. 8.** Зависимость уровня верхних БЛ линейной ФАР из 50 излучателей от уровня нижних БЛ.



**Рис. 9.** Зависимость увеличения ширины главного лепестка ДН линейной ФАР из 50 излучателей по сравнению с синфазной ФАР, от уровня нижних БЛ.



**Рис. 10.** Зависимость снижения КУ ФАР по сравнению с синфазной ФАР от уровня нижних БЛ, для линейных ФАР с разным количеством излучателей: 15 (1), 30 (2), 60 (3), 120 (4), и круглых ФАР с диаметром  $10\lambda$  (5) и  $20\lambda$  (6).

дает с сечением ДН линейной решетки из 50 элементов. При оптимизации фаз всех элементов двумерной решетки результат получается таким же – фаза вдоль каждого из столбцов совпадает с фазой линейной решетки.

Изучим зависимости изменения параметров ДН от уровня нижних БЛ, решая задачу оптимизации для различных значений целевого уровня нижних БЛ с использованием указанной выше линейной решетки. Графики изменения КУ, верхних БЛ и расширения луча в зависимости от уровня нижних БЛ приведены на рис. 7–9. Видно, что, например, при падении КУ на 0.7 дБ, уровень нижних БЛ снижен на 21 дБ по сравнению с синфазным лучом.

На рис. 10 дано сравнение падения КУ для следующих решеток: линейная из 15, 30, 60 и 120 излучателей и круглая решетка с квадратной сеткой диаметром  $10\lambda$  и  $20\lambda$ . Шаг решеток составляет  $\lambda/2$ . Для решетки круглой формы задача не сводится к двумерной, поэтому оптимизируются фазы всех излучателей, а областью минимизации БЛ  $\Omega$  является двумерная область в координатах  $u-v$ , расположенная ниже главного лепестка. Видно, что для линейных решеток зависимости отличаются мало. Это означает, что зависимости на рис. 7–10 являются универсальными и могут использоваться независимо от количества элементов в решетке, для линейных решеток и решеток прямоугольной формы. Так, например, при паде-

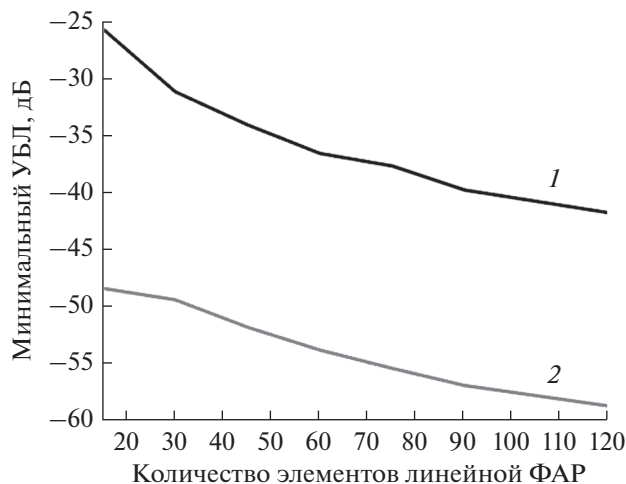


Рис. 11. Зависимость предельно достижимого уровня нижних БЛ ДН ФАР с шагом  $\lambda/2$  (1) и  $\lambda/4$  (2) от количества излучателей.

нии КУ на 1 дБ уровень нижних БЛ снижается на 29 дБ по сравнению с синфазным лучом. Для решетки круглой формы результат отличается, так как уровень БЛ антенны круглой формы ниже, чем у антенны прямоугольной формы. Однако падение уровня нижних БЛ относительно синфазной решетки при одинаковом падении КУ примерно такое же, как у линейной решетки.

Также из рис. 10 видно, что количество элементов решетки ограничивает возможность подавления БЛ, не позволяя уменьшать их уровень ниже определенного значения. Соответствующая зависимость предельно достижимого уровня нижних БЛ от количества излучателей в линейной антенной решетке приведена на рис. 11. Однако достичь более низкого УБЛ в нижней области можно не только увеличением количества элементов, но и уменьшением шага антенной решетки. Так, на рис. 11 видно, что, в отличие от антенной решетки с шагом  $\lambda/2$ , для решетки с шагом  $\lambda/4$  доступно большее падение уровня нижних БЛ относительно синфазной решетки. В частности, это означает, что в прямоугольной решетке с треугольной сеткой можно добиться более низкого уровня нижних БЛ, чем в прямоугольной решетке с квадратной сеткой, так как при соответствующей ориентации сетки решетка с треугольной сеткой эквивалентна линейной решетке с шагом вдвое меньше. Данный эффект объясняется тем, что при равном количестве элементов решетка с меньшим шагом имеет меньшее количество БЛ в видимой области углов, что упрощает задачу оптимизации.

Если не требуется уменьшения всех нижних БЛ (например, когда несколько нижних БЛ не попадают на подстилающую поверхность), то можно не снижать первые БЛ и тогда добиться более

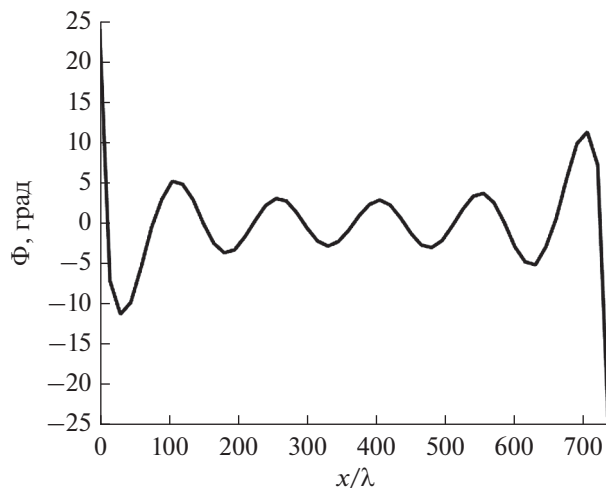


Рис. 12. Фазовое распределение, обеспечивающее УБЛ, начиная с пятого нижнего БЛ, менее  $-35$  дБ:  $x$  – координата элемента,  $\lambda$  – длина волны.

низкого уровня снижаемых БЛ. В качестве примера вернемся к линейной решетке из 50 элементов. Будем минимизировать БЛ начиная с пятого нижнего БЛ до уровня  $-35$  дБ. Результаты оптимизации приведены на рис. 12 и 13. Снижение КУ составило 0.05 дБ. При снижении всех нижних БЛ до такого же уровня, падение КУ составило бы 0.5 дБ.

Отметим, что ДН с уменьшенным уровнем нижних БЛ можно отклонять в произвольное направление внутри сектора сканирования [4]. Для отклонения луча используется линейное фазовое распределение вдоль апертуры решетки (как при обычном сканировании), к которому добавляется фазовая подставка в виде полученного в результате оптимизации распределения. В качестве при-

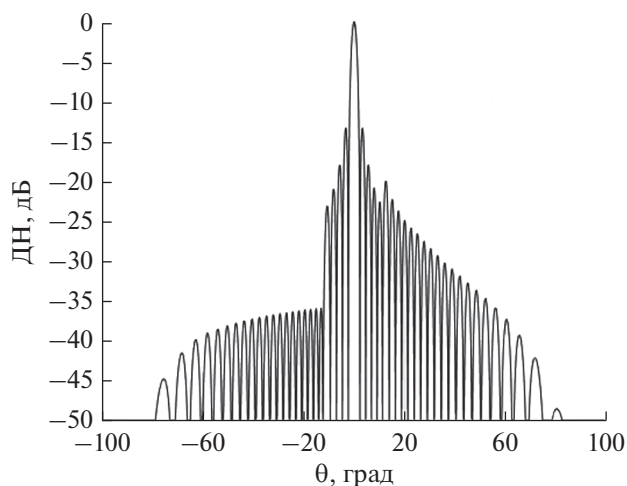
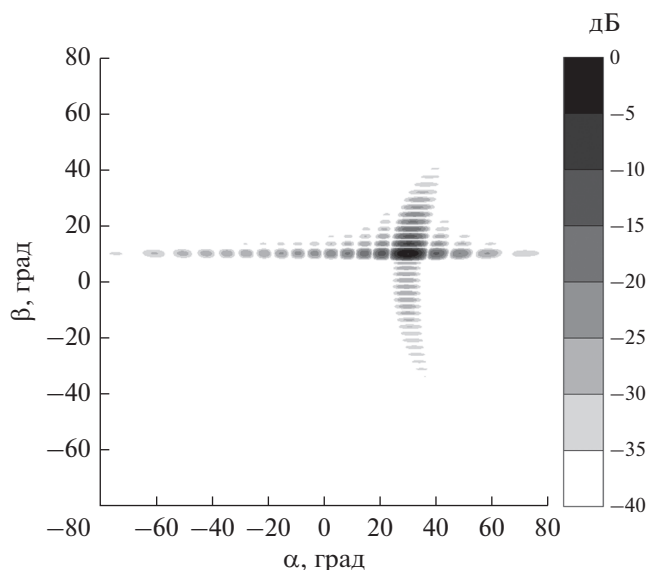


Рис. 13. Угломерное сечение ДН линейной ФАР с УБЛ, начиная с 5-го нижнего БЛ, менее  $-35$  дБ.



**Рис. 14.** Картограмма ДН прямоугольной ФАР с УБЛ в направлении подстилающей поверхности ниже  $-25.5$  дБ, отклоненной в положение  $30^\circ$  по азимуту,  $10^\circ$  по углу места.

мера рассмотрим отклонение ДН, показанной на рис. 6, в положение  $30^\circ$  по азимуту,  $10^\circ$  по углу места. Картограмма ДН приведена на рис. 14. Уровень нижних БЛ при сканировании практически не изменился.

Для оценки требуемой точности управления фазой при формировании ДН с уменьшенными нижними БЛ можно использовать стандартные оценки влияния ошибок фазы на ДН ФАР [13].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотрено применение метода фазового синтеза ФАР для снижения нижних БЛ, направленных на подстилающую поверхность. Эта задача актуальна для активных передающих ФАР, так как для таких антенн стремятся использовать равномерное амплитудное распределение, что не позволяет снижать БЛ с помощью управления амплитудой. Изучены предельные возможности ме-

тода по снижению нижних БЛ. Рассмотрено влияние метода на такие параметры как КУ, ширина ДН, уровень верхних БЛ. Чем сильнее подавляются нижние БЛ, тем сильнее снижается КУ ФАР, увеличивается ширина ДН и возрастают верхние БЛ. Получены зависимости изменения данных параметров от степени подавления нижних БЛ, которые могут использоваться для быстрой оценки достижимых параметров при проектировании ФАР. Также показано, что с помощью фазового синтеза можно уменьшать БЛ начиная не только с первого, но и с некоторого произвольного БЛ. В этом случае можно добиться более низкого уровня БЛ и меньшей деградации других параметров ДН.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bhattacharyya A.K.* Phased Array Antennas. Hoboken: Wiley&Sons, 2006. P. 347.
2. *Хзмалян А.Д., Кондратьев А.С.* // РЭ. 1998. Т. 43. № 7. С. 814.
3. *Хзмалян А.Д.* // РЭ. 2001. Т. 46. № 2. С. 186.
4. *Шишлов А.В., Кривошеев Ю.В., Мельничук В.И.* // Антенны. 2016. № 8. С. 44.
5. *DeFord J.F., Gandhi O.P.* // IEEE Trans. 1988. V. AP-36. № 2. P. 191.
6. *Harikumar P., Bhargav Bikkani V.V., Mahanti G.K., Mahato B.C.* // Annual IEEE India Conf. (INDICON). Hyderabad. 16–18 Dec. N.Y.: IEEE, 2011. Article No. 6139456.
7. *Nemit T.* // Antennas and Propagation Soc. Int. Symp. N.Y.: Wheeler Laboratories, 1969. P. 85.
8. *Trastoy A., Ares F.* // Electron. Lett. 1998. V. 34. № 20. P. 1916.
9. *Trastoy A., Ares F.* // Progress in Electromagnetics Research. 2001. V. 30. P. 47.
10. *Woodward P.M.* // Proc. IEE. 1947. Pt IIIA. V. 93. P. 1554.
11. *Wheeler H.A.* // Proc. IRE. 1939. V. 27. P. 359.
12. *Шумиков А.М.* // Радиотехника. 2010. № 10. С. 71.
13. *Mailloux R.J.* Phased Array Antenna Handbook. Norwood: Artech House, 2018. P. 375.