

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.396.67

ДВУМЕРНО-ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ДВУХПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ СВЕРХДИАПАЗОННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА

© 2019 г. В. А. Калошин^{1, 2, *}, Н. Тхай Ле^{2, **}

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

²Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московской обл., 141701 Российская Федерация

*E-mail: vak@cplire.ru

**E-mail: lenhuthairus@gmail.com

Поступила в редакцию 29.10.2018 г.

После доработки 29.10.2018 г.

Принята к публикации 09.11.2018 г.

Предложена и исследована двумерно-периодическая двухполяризационная антенная решетка в виде неоднородной многопроводниковой линии из проводников квадратного сечения. С использованием приближенной теории исследованы характеристики согласования двухпроводной линии с тремя разными законами изменения импеданса и найден оптимальный закон. Методом конечных элементов проведено электродинамическое моделирование бесконечной двумерно-периодической решетки из таких элементов при различных режимах сканирования. Для решеток из 144 (12×12) и из 576 (24×24) элементов с использованием численного эксперимента показана возможность реализации сверхдиапазонного режима согласования: для решетки из 576 элементов полоса рабочих частот в синфазном режиме составила $1 : 34$, а при сканировании в секторе 90° – более $1 : 15$.

DOI: 10.1134/S0033849419110111

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] исследованы сверхширокополосные (СШП) плоские двумерно-периодические двухполяризационные фазированные антенные решетки (АР) из 64 элементов (8×8) в виде неоднородной щелевой линии с полосой согласования в синфазном режиме $1 : 12$ и $1 : 9$, соответственно. Полоса согласования решетки в [1] в секторе сканирования 90° уменьшается до $1 : 8$, а в [2] в секторе сканирования 60° уменьшается до $1 : 7$. В работах [3, 4] исследованы характеристики СШП плоских одно-поляризационных двумерно-периодических фазированных решеток *ТЕМ*-рупоров с металлизацией части межрупорного пространства. В работе [3] построена численная, а в работе [4] – численная и численно-аналитическая модели излучения бесконечной АР из *ТЕМ*-рупоров, которые показали возможность согласования такой решетки в синфазном режиме в полосе частот $1 : 40$. Для решеток из 6×6 элементов полоса согласования уменьшилась до $1 : 10$, а в секторе сканирования 90° – до $1 : 5$. При этом заднее излучение решеток [3, 4] очень большое (отношение излучения вперед–назад в полосе согласования меняется от 0.5 до 6 дБ).

В работе [5] построена численная и численно-аналитическая модель плоской двумерно-периодической сканирующей решетки *ТЕМ*-рупоров с

металлизацией межрупорного пространства и металлическим экраном и проведены исследования характеристик. Результаты численного эксперимента решетки из 144 элементов (12×12) показали, что в синфазном режиме полоса согласования составляет $1 : 10$. При этом отношение излучения вперед–назад существенно увеличилось и на высоких частотах достигло уровня 26 дБ.

Таким образом, полоса частот всех исследованных двумерно-периодических СШП АР с экраном (для подавления заднего излучения) не превышает $1 : 10$, т.е. перекрывается один диапазон волн.

Цель данной статьи – исследование возможности реализации сверхдиапазонного (с полосой частот более $10 : 1$) режима работы плоской двумерно-периодической сканирующей АР. С этой целью в работе предложена и исследована двухполяризационная АР, представляющая собой отрезок многопроводниковой нерегулярной линии, при этом, в отличие от решеток, исследованных ранее в [1–5], проводники АР имеют квадратные поперечные сечения. Размеры сечения проводников по обеим координатам плавно уменьшаются по направлению к апертуре решетки по найденному в работе закону. Для минимизации заднего излучения сзади АР расположен металлический экран.

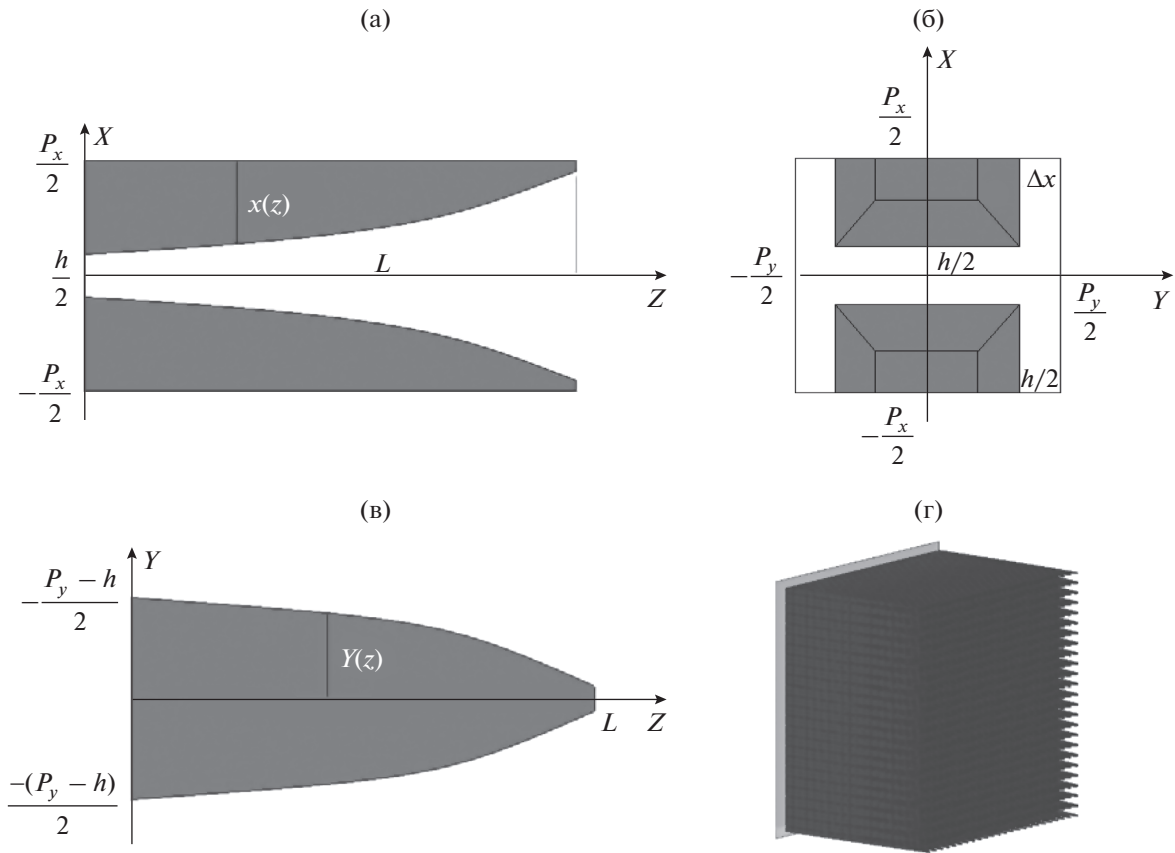


Рис. 1. Сечения элемента (а)–(в) и общий вид решетки из 576 (24 × 24) элементов (г).

На первом этапе на основе приближенной теории длинных линий проведено аналитическое исследование характеристик согласования решеток с тремя законами изменения сопротивления элемента и показано, что оптимальным является экспоненциальный закон. На втором этапе проведено численное исследование характеристик согласования бесконечной сканирующей решетки из элементов с тремя законами изменения сопротивления и подтверждено, что экспоненциальный закон является оптимальным. На третьем этапе исследованы характеристики согласования и излучения двух конечных сканирующих АР из 144 (12 × 12) и 576 (24 × 24) элементов с экспоненциальным законом изменения сопротивления.

1. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОГЛАСОВАНИЯ РЕШЕТОК С РАЗНЫМИ ЗАКОНАМИ ИЗМЕНЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТА

Исследуемая антенная решетка представляет собой многопроводниковую нерегулярную линию, проводники которой имеют квадратные поперечные сечения с плавно уменьшающимися по

направлению к апертуре решетки размерами (рис. 1а–1в). Общий вид АР из 576 (24 × 24) элементов приведен на рис. 1г.

Рассмотрим три закона изменения сопротивления элемента решетки вдоль оси Z (рис. 2):

- 1) линейный закон – $R(z) = \left(\frac{R(L) - R(0)}{L}\right)z + R(0)$,
- 2) параболический закон – $R(z) = \left(\frac{R(L) - R(0)}{L^2}\right)z^2 + R(0)$,
- 3) экспоненциальный закон – $R(z) = R(0) \exp\left(\left(\frac{1}{L} \ln\left(\frac{R(L)}{R(0)}\right)\right)z\right)$.

Здесь $L = 260$ мм – длина элемента решетки, $R(z)$ – сопротивление двухпроводной линии в сечении z , $R(L)$ – сопротивление двухпроводной линии в апертуре, $R(0)$ – входное сопротивление.

Коэффициент отражения от входа элемента решетки будем определять, пренебрегая его взаимодействием с другими элементами. В приближе-

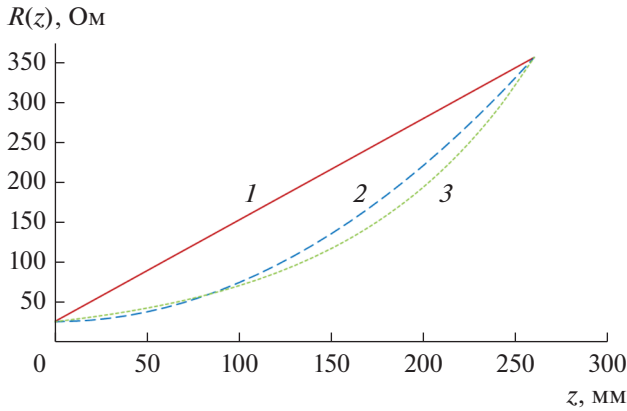


Рис. 2. Линейный (1), параболический (2) и экспоненциальный (3) законы изменения сопротивления линии вдоль оси OZ .

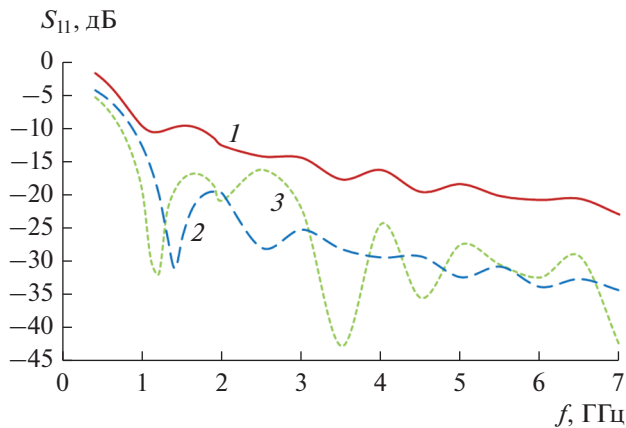


Рис. 3. Теоретические зависимости коэффициента отражения от частоты линии с тремя законами изменения сопротивления: линейным (1), параболическим (2) и экспоненциальным (3).

нии метода поперечных сечений [6], коэффициент отражения R определяется по формуле:

$$R = \int_0^L \frac{R'(z)}{2R(z)} \exp(2jkz) dz, \quad (1)$$

где k – волновое число в линии, которое в данном случае равно волновому числу в свободном пространстве.

На рис. 3 представлена рассчитанная по формуле (1) зависимость коэффициента отражения от частоты от входа линии с линейным законом изменения сопротивления, с параболическим и с экспоненциальным. Видно, что нижние частоты для линии с линейным, параболическим и экспоненциальным законами изменения сопротивления составляют соответственно 1, 0.85 и 0.7 ГГц. Таким образом, линия с экспоненциальным законом изменения сопротивления имеет наименьшую нижнюю частоту согласования.

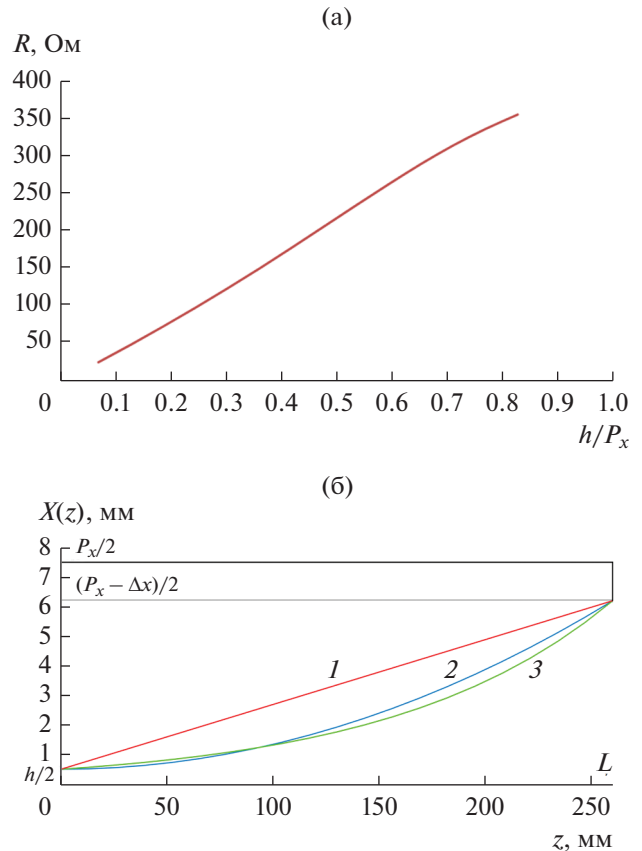


Рис. 4. Зависимость сопротивления канала Флоке от поперечного размера проводника (а) и геометрия сечения элемента (б), соответствующая линейному (1), параболическому (2) и экспоненциальному (3) законам изменения волнового сопротивления.

2. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОГЛАСОВАНИЯ И ИЗЛУЧЕНИЯ БЕСКОНЕЧНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Проведем численное исследование характеристик согласования бесконечной сканирующей решетки из элементов с разными законами изменения сопротивления. С использованием электродинамической модели бесконечной АР на основе метода конечных элементов была исследована зависимость сопротивления канала Флоке от поперечного размера проводника (рис. 4а). На рис. 4б показана геометрия элементов, соответствующая трем законам изменения волнового сопротивления (см. рис. 2) с учетом зависимости, показанной на рис. 4а. Решетка, выбранная для моделирования, характеризуется следующими значениями параметров: $P_x = P_y = 15$ мм – периоды решетки в двух плоскостях, $h = 1$ мм – расстояние между двумя проводниками, $\Delta x = 2.632$ мм – толщина проводника в апертуре и $L = 260$ мм – длина элемента решетки. Для минимизации заднего излучения сзади решеток от узлов возбуждения рас-

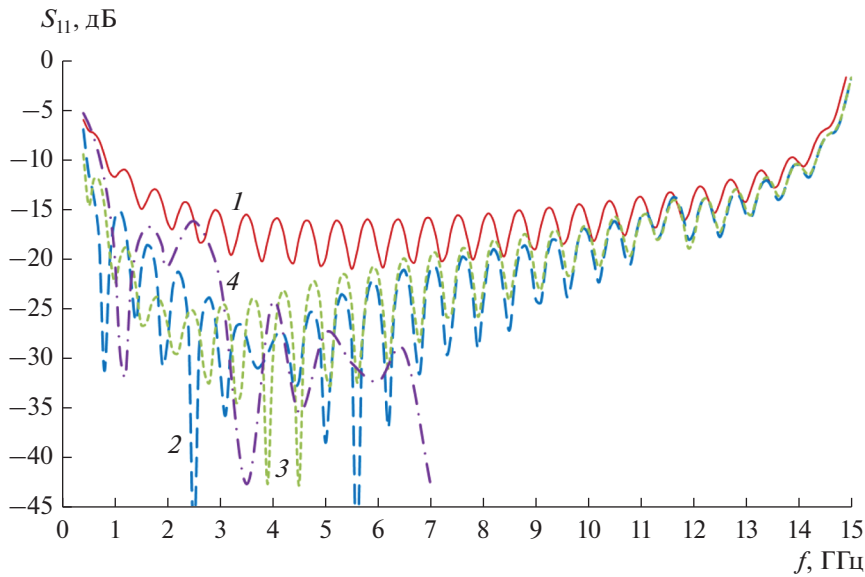


Рис. 5. Зависимость от частоты коэффициента отражения бесконечной АР элементов с тремя законами изменения сопротивления: линейным (1), параболическим (2) и экспоненциальным (3).

положен металлический экран (см. рис. 1г). Расстояние металлического экрана от входов элементов решетки – $d_x = 10$ мм – найдено из условия минимума нижней частоты согласования.

Результаты моделирования коэффициента отражения бесконечной решетки с приведенным на рис. 4б законами изменения поперечного размера проводника показаны на рис. 5. Показаны зависимости коэффициента отражения от частоты синфазной бесконечной АР элементов с линейным, параболическим и экспоненциальным законами изменения сопротивления. Для сравнения на рисунке приведена также зависимость коэффициента отражения от частоты для решетки с экспоненциальным законом, рассчитанная по формуле (1).

Из рис. 5 видно, что расчет по формуле (1) описывает изменение коэффициента отражения с частотой только качественно, но при этом правильно предсказывает оптимальный закон изменения волнового сопротивления. Нижние частоты согласования решетки с линейным, параболическим и экспоненциальным законами изменения сопротивления, соответственно составляют 0,9, 0,45 и 0,41 ГГц, т.е. экспоненциальный закон действительно оказывается лучшим.

В соответствии с этим выводом для дальнейших исследований в режиме сканирования была выбрана решетка с экспоненциальным законом изменения сопротивления канала Флоке.

Результаты исследования характеристик согласования бесконечной сканирующей АР приведены на рис. 6а–6в.

На рис. 6а представлена зависимость коэффициента отражения от частоты сканирующей в E -плоскости ($\varphi = 0$) бесконечной АР, на рис. 6б – для сканирования в H -плоскости ($\varphi = 90^\circ$) и на рис. 6в – в косоугольной плоскости ($\varphi = 45^\circ$). На всех рисунках кривыми 1 показаны зависимости коэффициента отражения от частоты в синфазном режиме, кривыми 2 – при сканировании в секторе 30° , кривыми 3 – в секторе 60° , и кривыми 4 – в секторе 90° .

На рис. 6а видно, что в секторе сканирования 30° полоса согласования решетки практически не меняется по сравнению с полосой синфазной решетки (1 : 34), а в секторах сканирования 60° и 90° полосы согласования сужаются до 1 : 25 и 1 : 15, соответственно. На рис. 6б видно, что при сканировании в H -плоскости полоса согласования мало меняется по сравнению с полосой согласования синфазной решетки. На рис. 6в видно, что в секторе сканирования 30° в косоугольной плоскости полоса согласования решетки (1 : 34) стала чуть шире по сравнению с полосой согласования синфазной решетки, а в секторах 60° и 90° – полосы согласования уменьшаются до 1 : 31 и 1 : 22 соответственно.

3. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОГЛАСОВАНИЯ И ИЗЛУЧЕНИЯ КОНЕЧНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Исследуем характеристики сканирующих АР из 144 (12×12) и 576 (24×24) элементов с экспоненциальным законом изменения сопротивле-

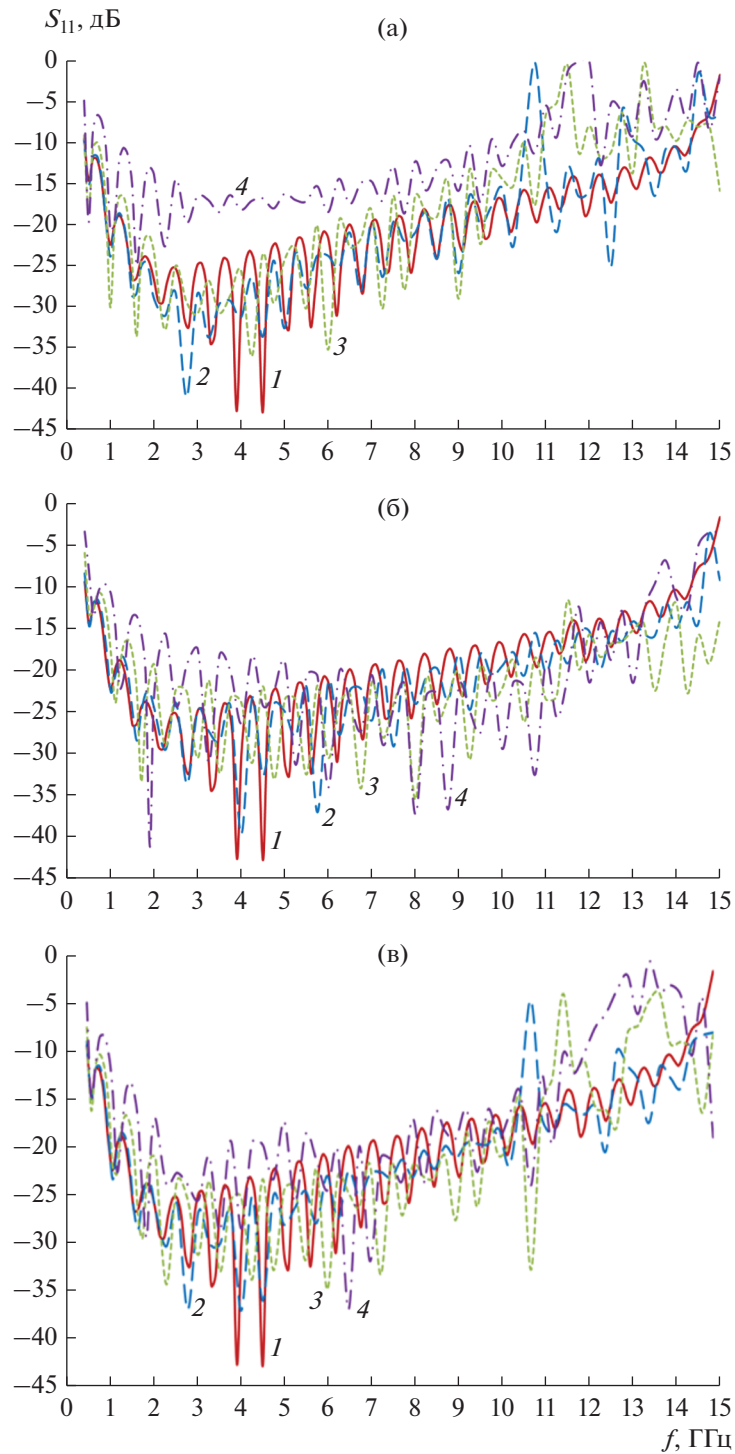


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения от частоты сканирующей в E -плоскости (а), H -плоскости (б) и в косо́й плоскости (в) бесконечной АР.

ния. Сначала рассмотрим АР из 144 элементов (далее – решетка 1).

На рис. 7а представлена зависимость коэффициента отражения от частоты сканирующей в E -плоскости решетки 1 в синфазном режиме (кривая 1), при сканировании в секторе 30° (кри-

вая 2), при сканировании в секторе 60° (кривая 3) и при сканировании в секторе 90° (кривая 4). На рис. 7б и 7в в тех же обозначениях приведены зависимости коэффициента отражения от частоты решетки, сканирующей в H -плоскости и в косо́й плоскости соответственно.

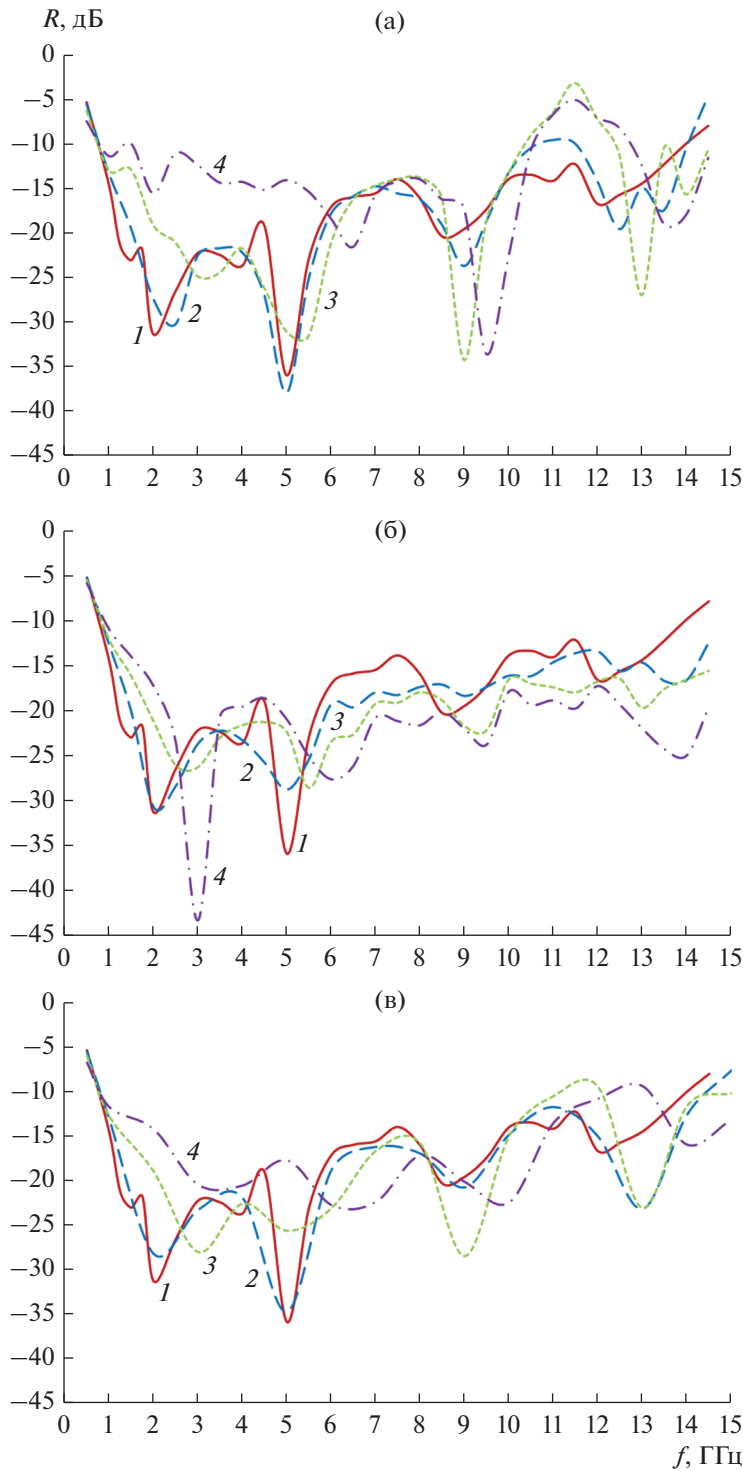


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения от частоты сканирующей в E -плоскости (а), H -плоскости (б) и в косо́й плоскости (в) решетки 1.

Из рис. 7а видно, что полосы согласования в синфазном режиме и в секторе сканирования 30° практически не отличаются (1 : 20), а при сканировании в секторах 60° , 90° сужаются до 1 : 15.

Из рис. 7б и 7в видно, что при сканировании в H -плоскости и косо́й плоскости полосы согласо-

вания шире полосы синфазной решетки (отношение нижней частоты к верхней составляет больше 1 : 20).

На рис. 8–10 представлены диаграммы направленности решетки 1 при сканировании в E -, H - и косо́й плоскостях соответственно. Показана

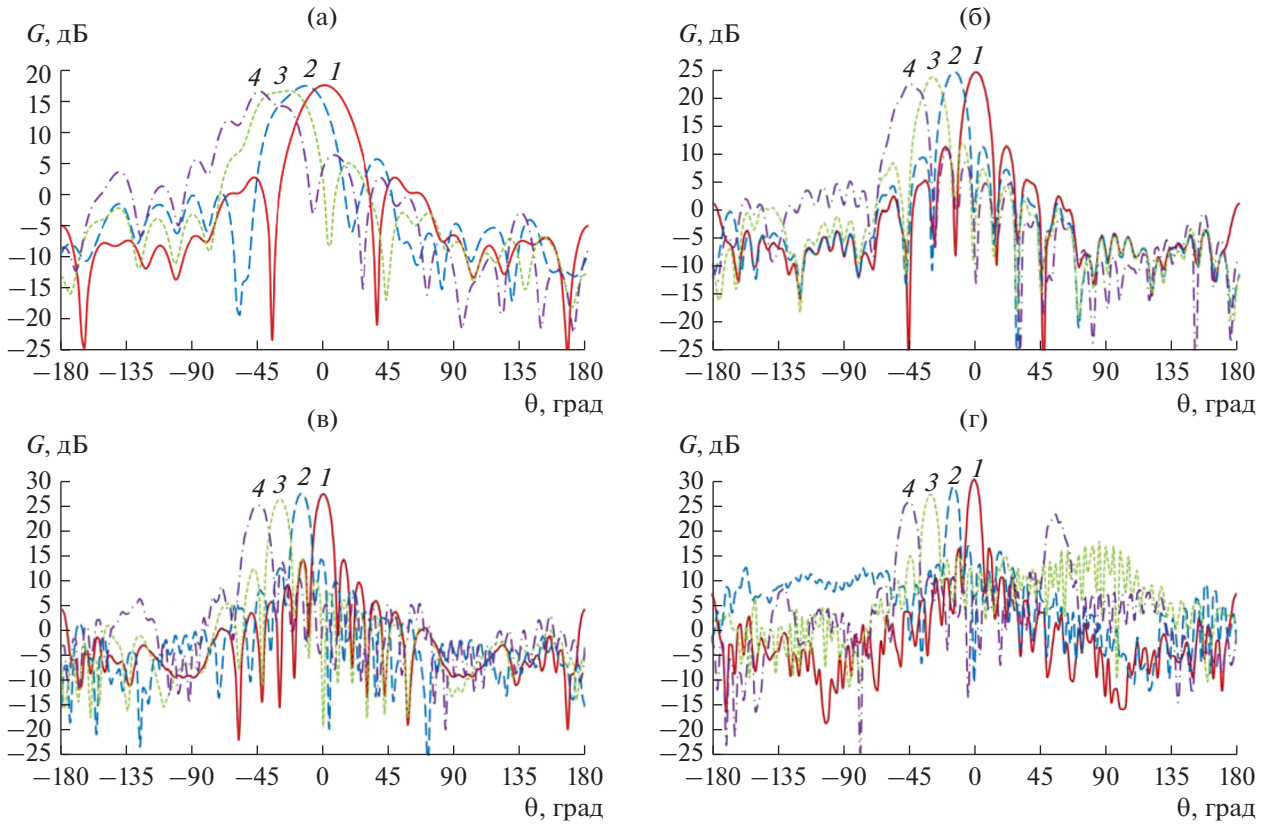


Рис. 8. Диаграммы направленности сканирующей в E -плоскости решетки 1 при $f = 3$ (а), 7 (б), 10 (в) и 13 ГГц (г).

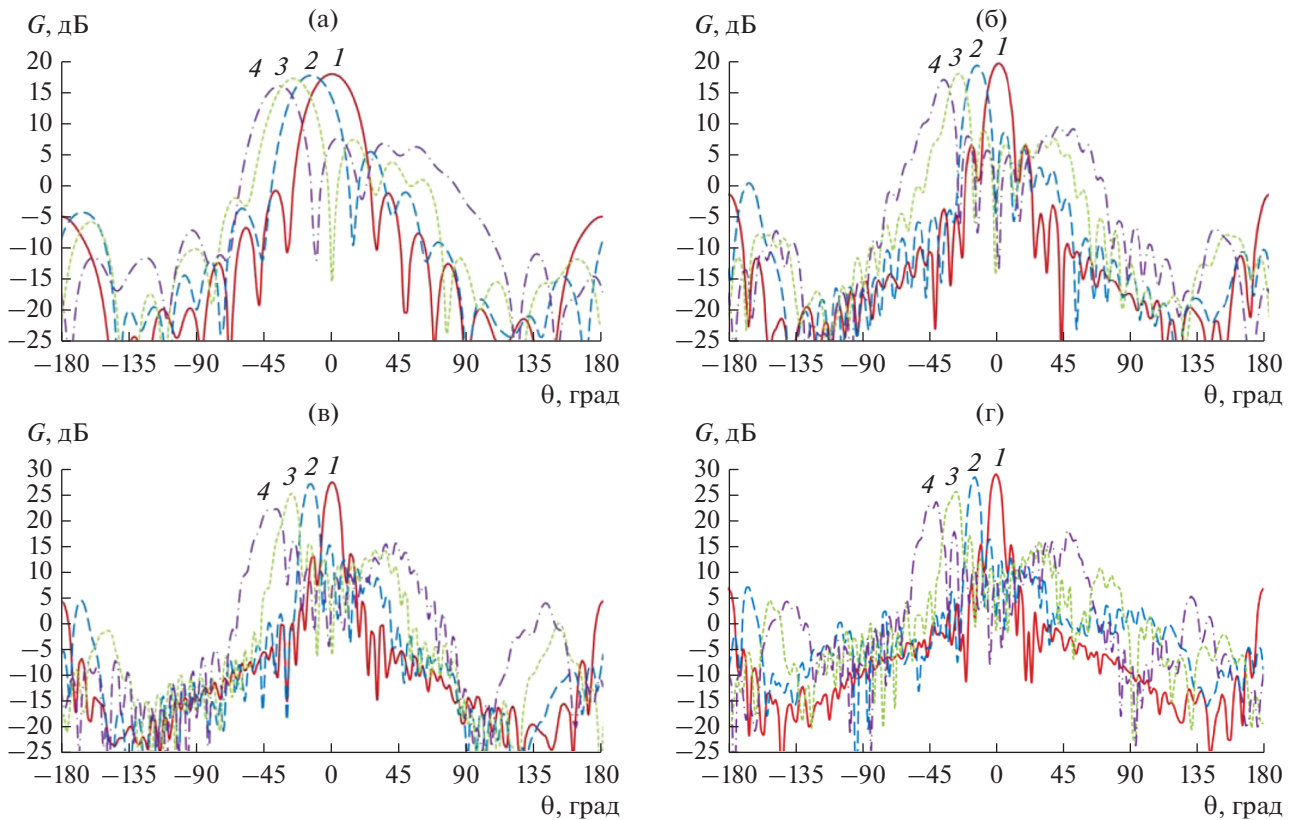


Рис. 9. Диаграммы направленности сканирующей в H -плоскости решетки 1 при $f = 3$ (а), 7 (б), 10 (в) и 13 ГГц (г).

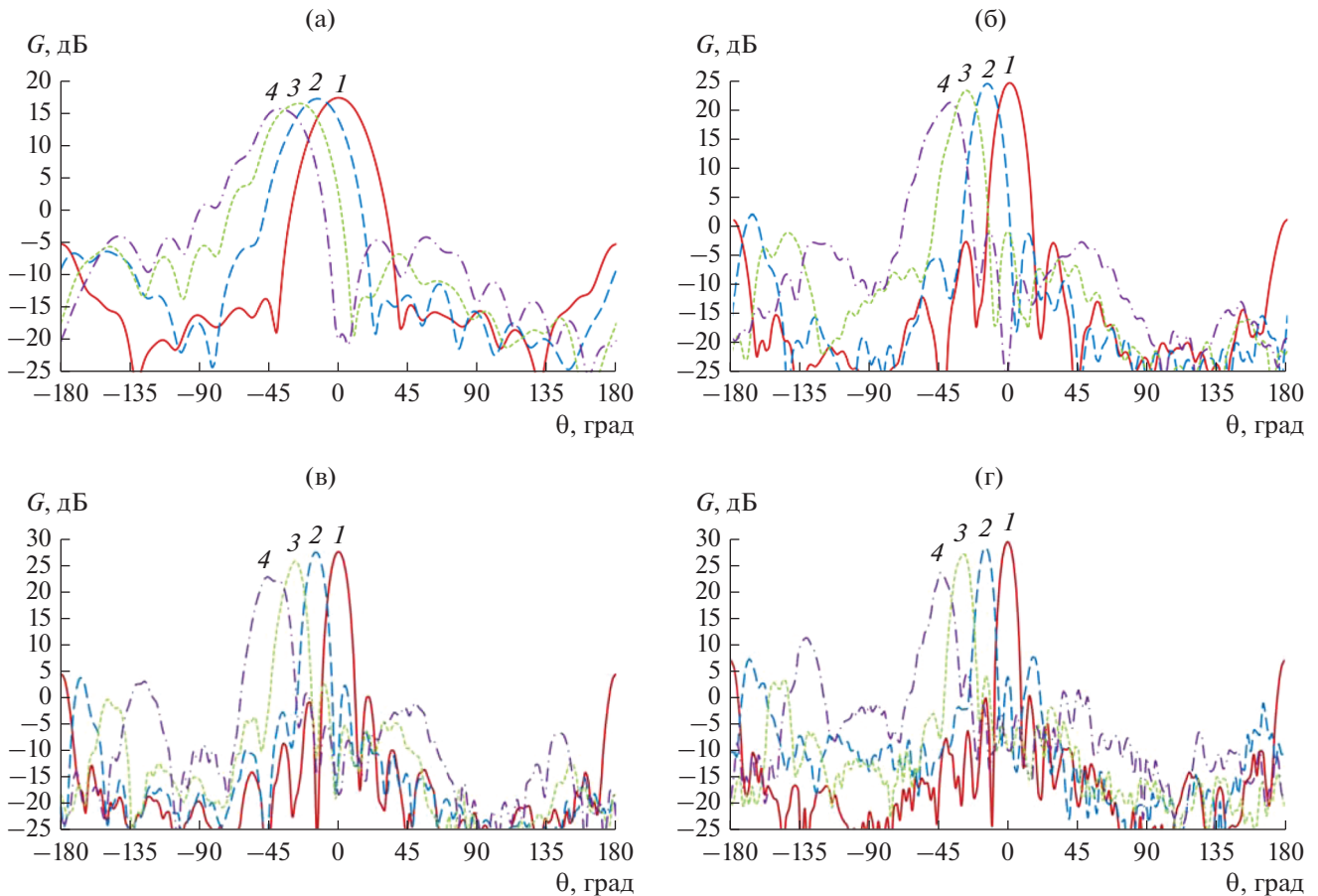


Рис. 10. Диаграммы направленности сканирующей в косои плоскости решетки 1 при $f=3$ (а), 7 (б), 10 (в) и 13 ГГц (г).

диаграмма направленности решетки 1 на частотах 3 (а), 7 (б), 10 (в) и 13 ГГц (г) в синфазном режиме (кривая 1), при сканировании в секторе 30° (кривая 2), в секторе 60° (кривая 3) и при сканировании в секторе 90° (кривая 4).

Как видно из рис. 8–10, в полосе согласования относительный уровень заднего лепестка решетки ниже 25 дБ, первый боковой лепесток в синфазном режиме – ниже 30 дБ, а в режиме сканирования – ниже 15 дБ.

Из-за большого электрического размера АР из 576 элементов (решетки 2) ее исследование в синфазном режиме было проведено с использованием двух плоскостей симметрии, что позволило в четыре раза уменьшить объем задачи. При исследовании сканирования в E - и H -плоскостях были использованы модели решетки, бесконечные в плоскости, ортогональной плоскости сканирования, что позволило в 24 раза уменьшить объем задачи. Проверка корректности этих моделей была предварительно проведена для решетки 1, которая показала, что при сканировании в E -плоскости характеристики согласования и излучения полной модели решетки и модели решетки, бес-

конечные в плоскости, ортогональной плоскости сканирования, достаточно близки (рис. 11, 12). В качестве подтверждения на рис. 11а–11г соответственно показаны характеристики согласования двух моделей решетки 1 в синфазном режиме и при сканировании в секторах 30° , 60° и 90° , а на рис. 12а–12г – диаграммы направленности на частоте 13 ГГц.

На рис. 11 показаны характеристики согласования решетки, бесконечной в плоскости, ортогональной плоскости сканирования, и конечной решетки 1. На рис. 12 показаны нормированные диаграммы направленности модели решетки, бесконечной в плоскости, ортогональной плоскости сканирования, и полной модели. Как видно из рис. 11 и 12, характеристики, рассчитанные с помощью точной и приближенной моделей, действительно близки.

На рис. 13а и 13б представлены частотные зависимости коэффициента отражения решетки 2, сканирующей в E - и H -плоскости соответственно. Приведены характеристики согласования для секторов сканирования 0° , 30° , 60° и 90° .

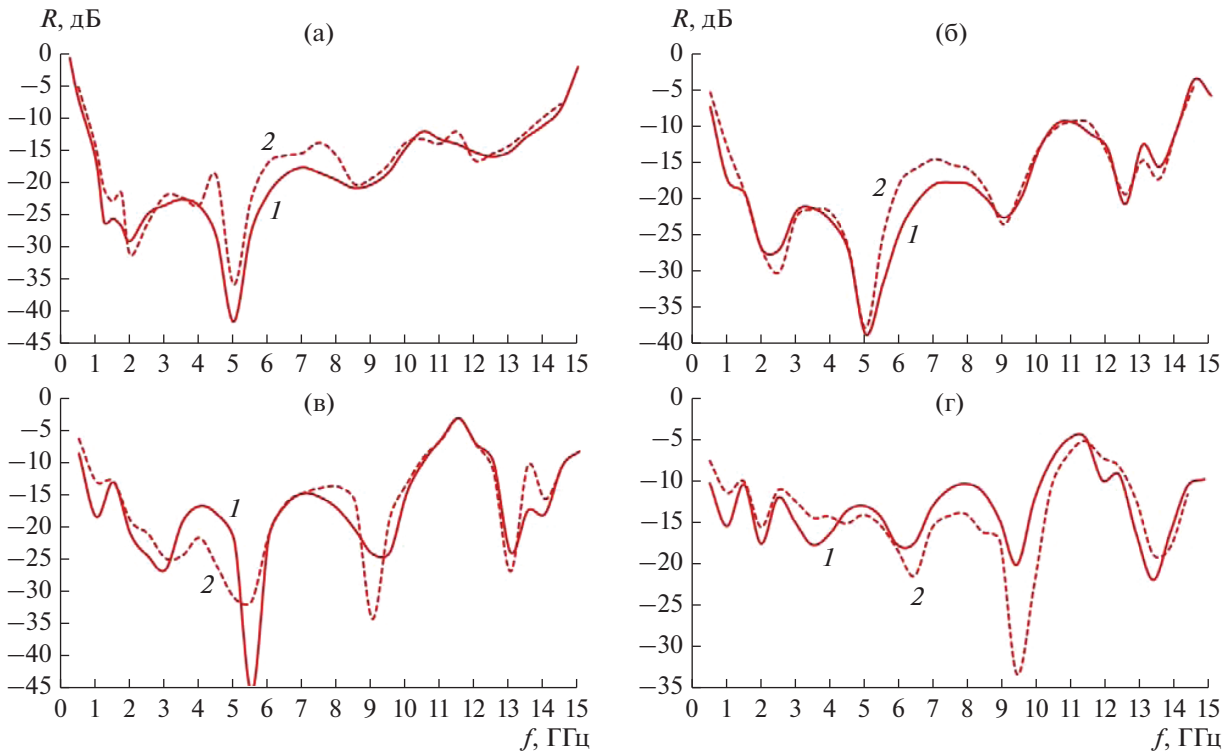


Рис. 11. Зависимость коэффициента отражения от частоты сканирующей в E -плоскости модели решетки, бесконечной в плоскости, ортогональной плоскости сканирования (кривая 1), и решетки 1 (кривая 2) в синфазном режиме (а) и при сканировании в секторе 30° (б), 60° (в) и 90° (г).

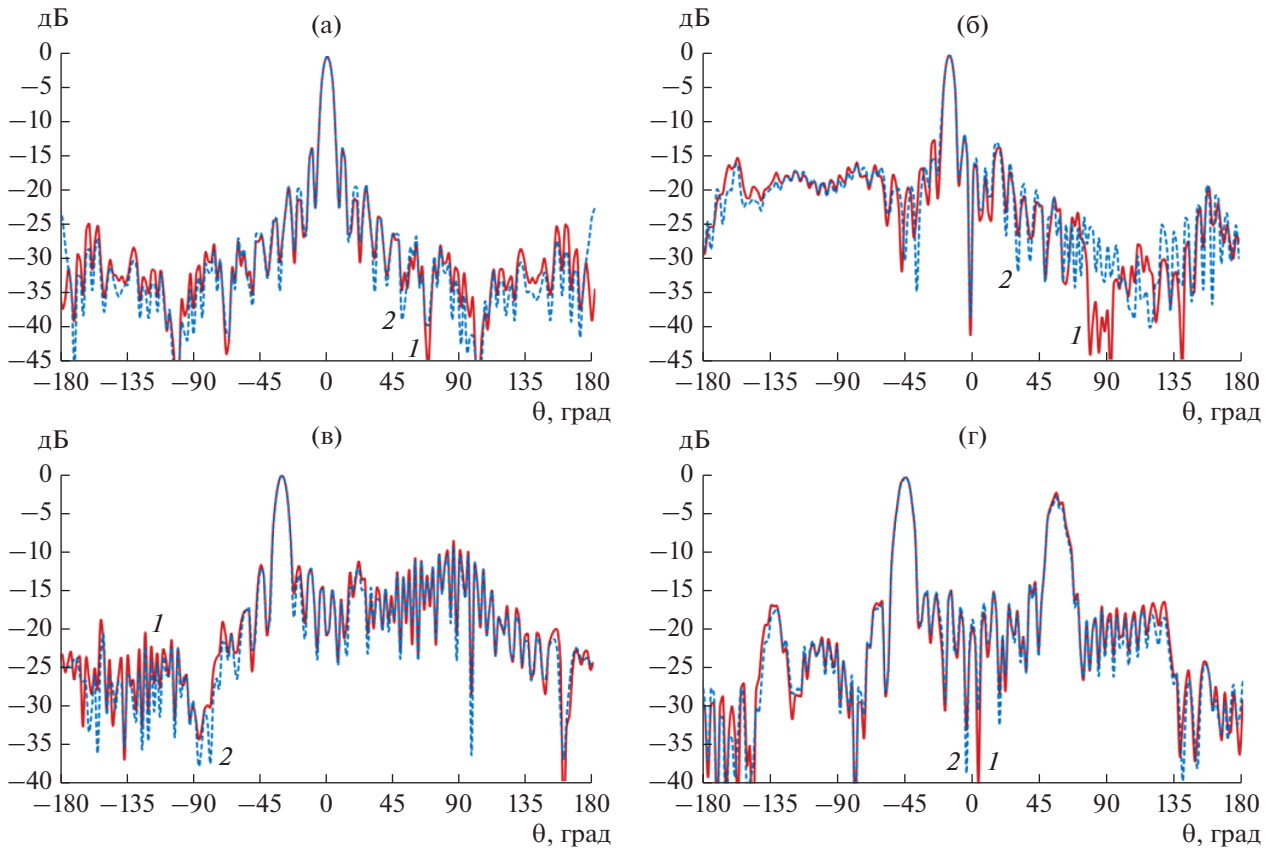


Рис. 12. Нормированные диаграммы направленности сканирующей в E -плоскости модели решетки, бесконечной в плоскости, ортогональной плоскости сканирования (кривая 1), и решетки 1 (кривая 2) в синфазном режиме (а) и при сканировании в секторе 30° (б), 60° (в) и 90° (г).

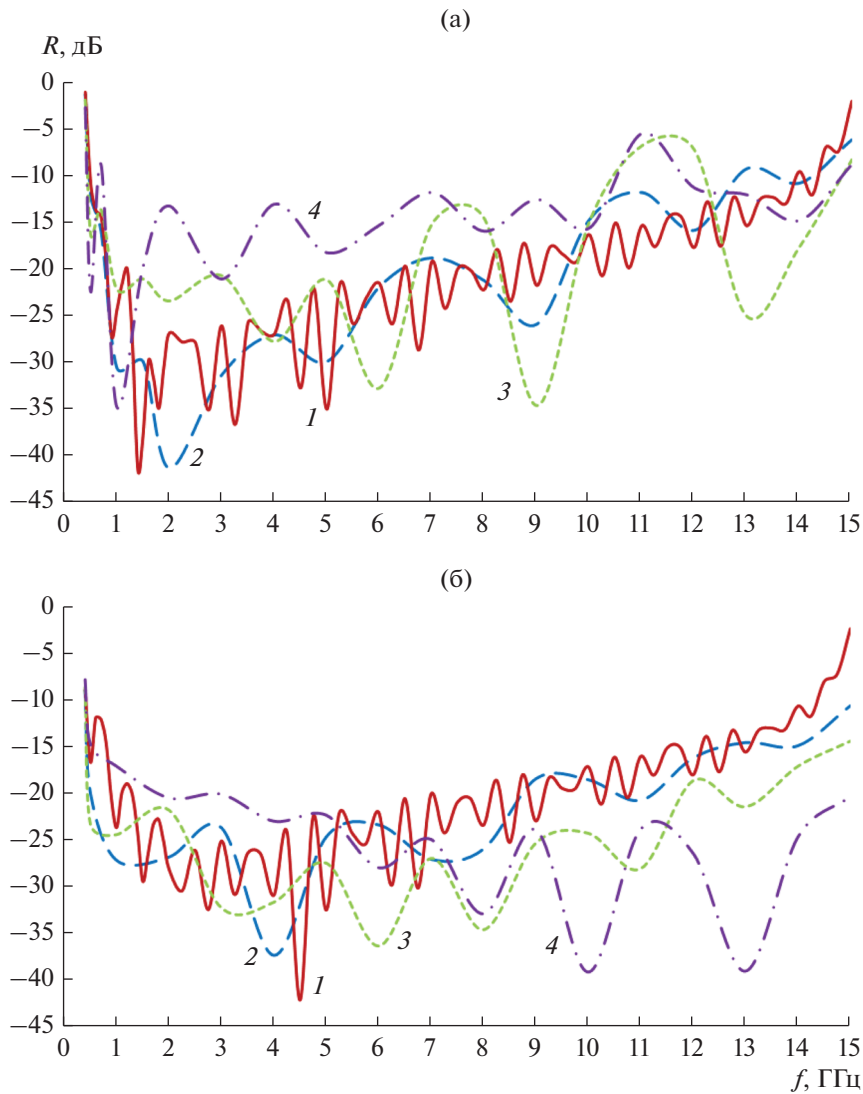


Рис. 13. Зависимость коэффициента отражения от частоты сканирующей в *E*-плоскости (а) и в *H*-плоскости (б) решетки 2 для секторов сканирования 0° (1), 30° (2), 60° (3) и 90° (4).

Как видно из рис. 13а, при небольших углах сканирования в *E*-плоскости (до 30°) характеристики согласования практически не меняются (полоса 1 : 34). При увеличении угла сканирования до 45° нижняя частота согласования увеличивается, а полоса согласования сужается до 1 : 15. Из рис. 13б видно, что при сканировании в секторах 30°, 60° и 90° в *H*-плоскости полоса согласования решетки 2 стала шире, чем в синфазном режиме.

На рис. 14 и 15 представлены нормированные диаграммы направления решетки 2 при сканировании в *E*- и *H*-плоскостях соответственно. Показана нормированная диаграмма направленности решетки 2 на частотах 3 (а), 7 (б), 10 (в) и 13 ГГц (г) в синфазном режиме и при сканировании в секторе 30°, в секторе 60° и в секторе 90°. Из рис. 14

и 15 видно, что относительный уровень заднего лепестка на высоких частотах около -30 дБ в синфазном режиме, при сканировании в секторе 60° возрастает до 15 дБ, а в секторе сканирования 90° на максимальной частоте 13 ГГц – этот уровень достигает -5 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования характеристик двухполяризационной двумерно-периодической антенной решетки из нерегулярных элементов квадратного сечения с экраном показали возможность реализации сверхдиапазонного согласования как в синфазном режиме, так и в режиме сканирования при низком уровне заднего лепестка (-25 дБ). Для решетки из 576 элементов полоса частот согласования составила 1 : 34 в синфазном

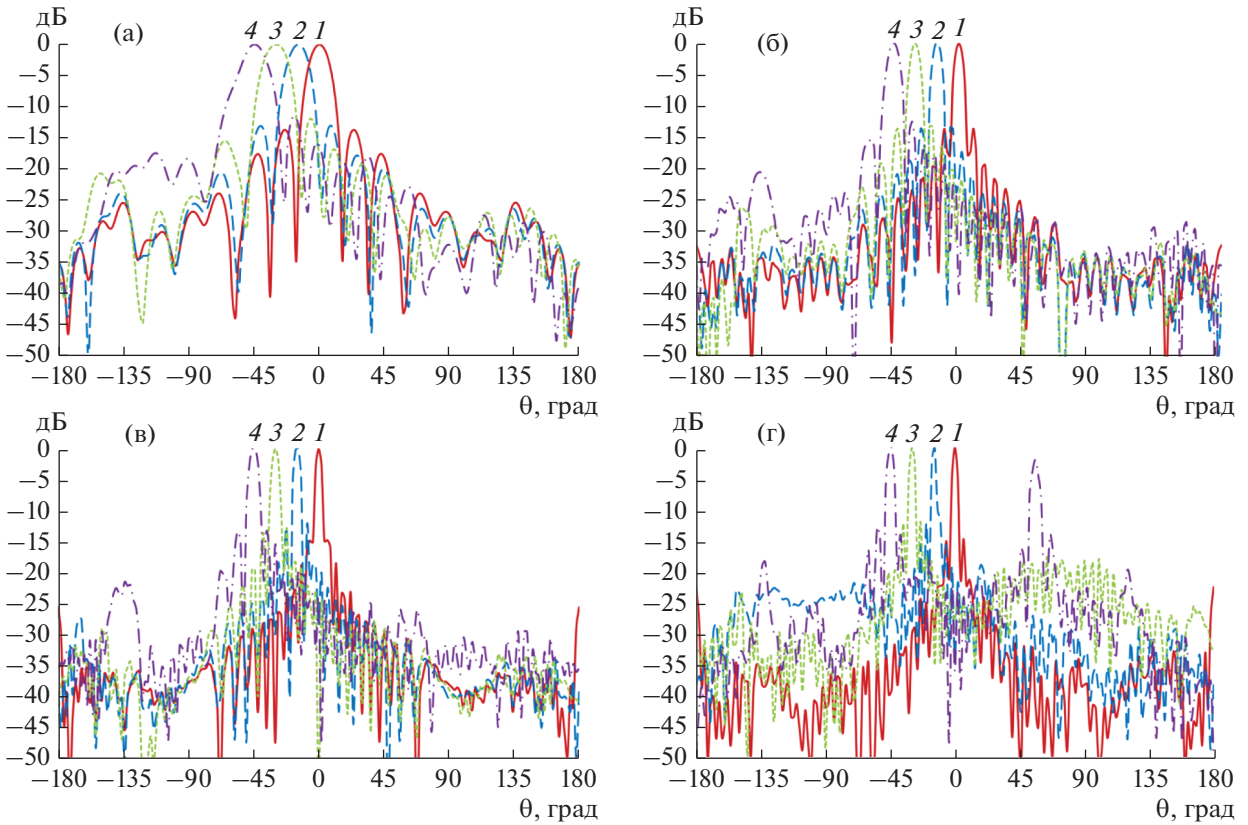


Рис. 14. Нормированные диаграммы направленности сканирующей в E -плоскости решетки 2 при $f=3$ (а), 7 (б), 10 (в) и 13 ГГц (г).

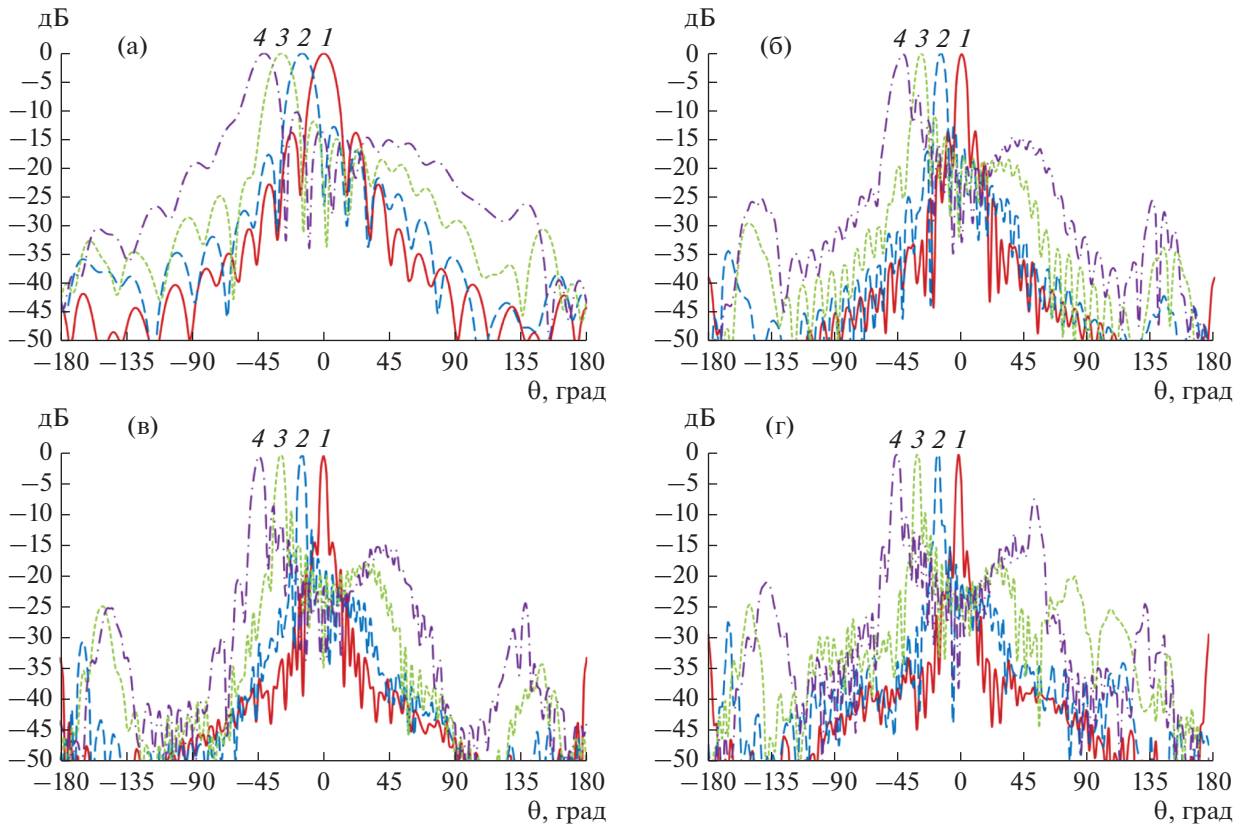


Рис. 15. Нормированные диаграммы направленности сканирующей в H -плоскости решетки 2 при $f=3$ (а), 7 (б), 10 (в) и 13 ГГц (г).

режиме и при сканировании в H -плоскости, в секторе сканирования 30° в E -плоскости – 1 : 25, а в секторе сканирования 90° в E -плоскости – 1 : 15.

Сверху рабочая полоса частот решетки фактически ограничивается ростом первого бокового лепестка, уровень которого растет с увеличением сектора сканирования и на максимальной частоте согласования при отклонении луча на 45° в E -плоскости достигает -5 дБ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-07-00655).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kindt R.W., Pickles W.R.* // IEEE Trans. 2010. V. AP-58. № 11. P. 3568.
2. *Yan J., Gogineni S., Camps-Raga B., Brozema J.* // IEEE Trans. 2016. V. AP-64. № 2. P. 781.
3. *Калошин В.А., Нгуен К.З.* // Журн. радиоэлектроники. 2017. № 5. <http://jre.cplire.ru/jre/may17/14/text.pdf>
4. *Банков С.Е., Калошин В.А., Нгуен К.З.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 7. С. 702.
5. *Банков С.Е., Калошин В.А., Ле Н.Т.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 12. С. 1263.
6. *Каценеленбаум Б.З.* Теория волноводов с медленно меняющимися параметрами. М.: Изд-во АН СССР, 1961.