

DOI 10.30898/1684-1719.2020.4.1

УДК 621.396.67

ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННА С СЕКТОРОМ ЧАСТОТНОГО СКАНИРОВАНИЯ 180 ГРАДУСОВ

В. А. Калошин¹, Д. Т. Ле²

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, 125007, г. Москва, ул. Моховая д. 11, стр.7

² Московский физико-технический институт, 141700, Долгопрудный, Институтский пер. 9

Статья поступила в редакцию 19 марта 2020 г.

Аннотация. Предложена и исследована линейная волноводно-щелевая антенна с сектором частотного сканирования 180 градусов. Антенна выполнена в виде прямоугольного металлического волновода, заполненного диэлектриком с периодическими скачками диэлектрической проницаемости и периодически расположенными вдоль волновода тройными поперечными щелями в широкой стенке. Сектор сканирования 180 градусов достигается благодаря использованию двух режимов излучения: основной (нулевой) гармоники и минус первой гармоники пространственного спектра. Частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения, а также коэффициентов усиления и использования поверхности сопоставлены с аналогичными зависимостями антенны на основе эквивалентного по замедлению двухслойного волновода со скачками толщины одного из слоев.

Ключевые слова: волноводно-щелевая антенна, частотное сканирование.

Abstract. A linear waveguide slot antenna with a 180-degree frequency scanning sector is proposed and studied. The antenna is made in the form of a rectangular metal waveguide filled with a dielectric with periodic changes in permittivity and triple transverse slots periodically located along the waveguide in a wide wall. The scanning sector of 180 degrees is achieved by the use of two radiation modes: the main (zero) harmonic and -1 harmonic of the spatial spectrum. The frequency dependences of the reflection and transmission coefficients, as well as the gain and aperture efficiency

coefficients are compared with the similar characteristics of the antenna based on the equivalent two-layer waveguide with changes in the thickness of one of the layers.

Key words: waveguide-slot antenna, frequency scanning.

Введение. Исследования антенн вытекающей волны проводились в течение длительного времени, что нашло отражение во многих публикациях (см., например, [1-4]). При этом используются два типа излучения - на основной (нулевой) и на минус первой пространственной гармонике. Последний вариант обеспечивает более широкий сектор частотного сканирования, вплоть до полного сектора углов от -90° до $+90^\circ$ относительно нормали к излучающей апертуре. Однако это возможно лишь в случае заполнения волновода материалом с высокой диэлектрической проницаемостью [4], что приводит к увеличению веса, стоимости и тепловых потерь.

Широкий сектор частотного сканирования в антенне вытекающей волны можно получить также при излучении прямоугольного металло-диэлектрического волновода, интегрированного в подложку с меандровыми щелями в широкой стенке [5]. При соответствующем выборе параметров волновода и щелей удается реализовать режимы распространения прямой (в верхней части рабочего диапазона) и обратной (в нижней части диапазона) вытекающей волны, излучающих в широком секторе углов. В работе [6] экспериментально реализованный сектор частотного сканирования составляет от -60° до $+60^\circ$ относительно нормали при изменении частоты от 8.6 до 12.8 ГГц. При этом данные об полной эффективности антенны отсутствуют.

В работе [7] была предложена волноводно-щелевая антенна с сектором частотного сканирования 180° . Такой сектор сканирования достигается выбором параметров антенны, при котором обеспечиваются режимы излучения основной (нулевой) и минус первой гармоник пространственного спектра в диапазоне рабочих частот антенны, определяемым полосой одномодового режима

волновода. Антенна выполнена в виде заполненного диэлектриком прямоугольного металлического волновода с периодически расположенными парными поперечными щелями в широкой стенке. Исследование частотной зависимости коэффициента усиления (КУ) и коэффициента использования поверхности (КИП) антенны в работе [8] показало заметное снижение этих величин в значительной части частотного диапазона, обусловленное наличием частотных резонансов коэффициента отражения и сильной частотной дисперсией постоянной затухания вытекающей волны, что приводит к неравномерному амплитудному распределению вдоль антенны и, соответственно, снижению величины КУ и КИП.

Цель данной работы: подавить частотные резонансы коэффициента отражения антенны в области перехода от одного режима излучения к другому и при излучении по нормали путем добавления третьей щели на периоде и оптимизации параметров щелей в структуре.

1. Частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения ячейки

Для исследования частотной зависимости коэффициентов отражения и прохождения рассмотрим ячейку (период) двух вариантов антенны на основе прямоугольного металлодиэлектрического волновода с тремя поперечными периодически расположенными щелями на широкой стенке (рис. 1). Первый случай - однородно заполненный волновод (рис. 2а) с геометрическими параметрами $p = 6.56$ мм, $a = 4$ мм, $w = 0.44$ мм, $s_1 = 2.43$ мм, $s_2 = 2.45$ мм, $s_3 = 2.42$ мм, $d_1 = 1.66$ мм, $d_2 = 1.62$ мм. Второй случай - волновод со скачкообразным изменением диэлектрической проницаемости на периоде (рис. 2б) с геометрическими параметрами $p = 4.62$ мм, $a = 4.09$ мм, $w = 0.44$ мм, $s_1 = 2.15$ мм, $s_2 = 2.38$ мм, $s_3 = 2.2$ мм, $d_1 = 1.13$ мм, $d_2 = 1.18$ мм, остальные размеры показаны на рис.2.

Параметры ячейки выбраны так, чтобы коэффициенты отражения при возбуждении ячейки были минимальными на двух частотах, совпадающих с

частотными резонансами коэффициента отражения антенны. Первый резонанс имеет место на частоте перехода из режима излучения основной гармоники в режим излучения минус первой гармоники, второй - на частоте излучения по нормали.

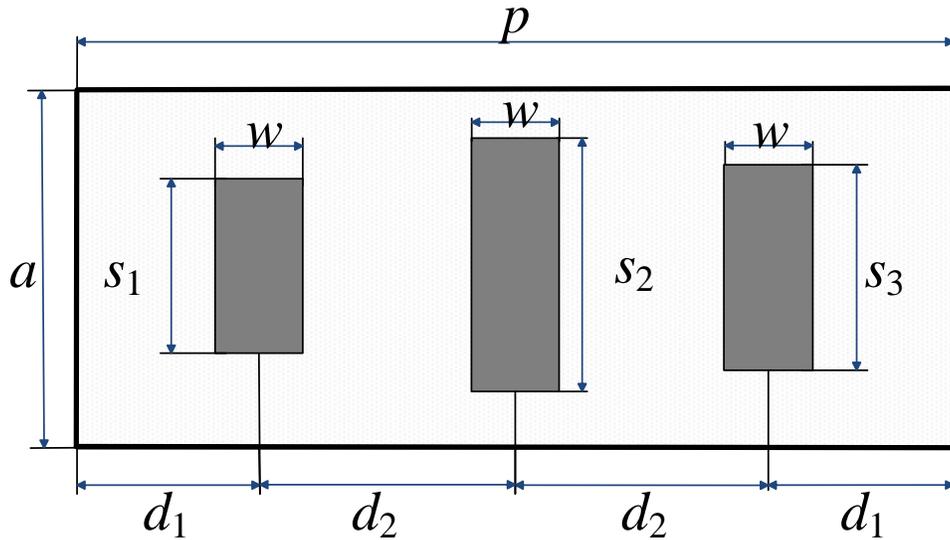


Рис. 1. Ячейка с тремя поперечными щелями.

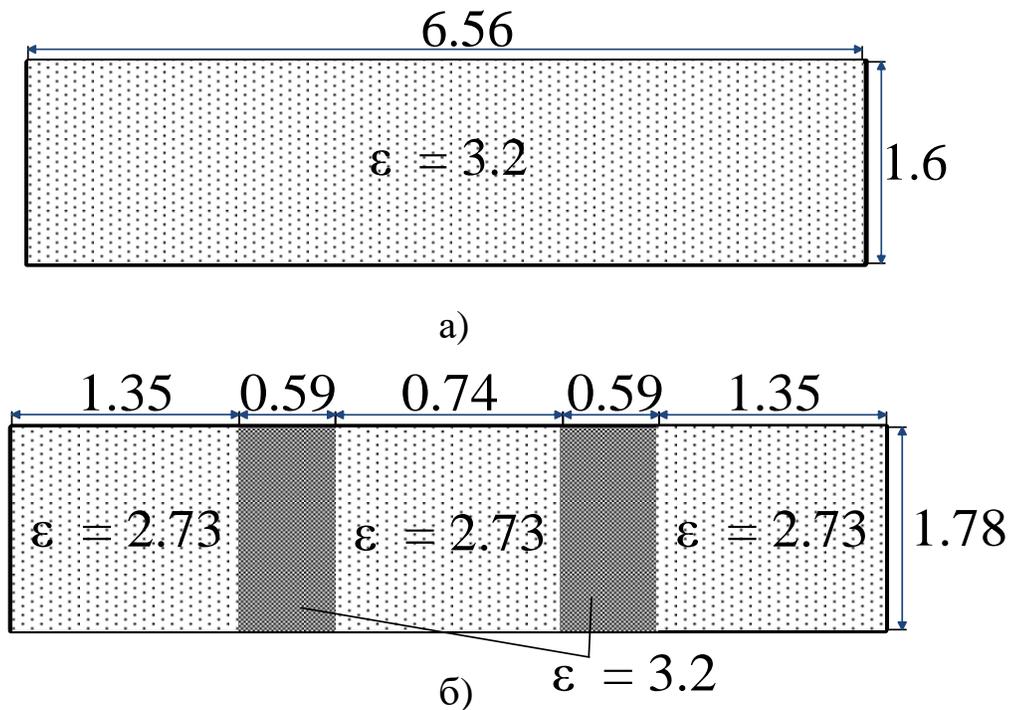


Рис. 2. Продольные сечения ячейки в Е-плоскости : а - однородно заполненный волновод, б - волновод со скачкообразным изменением диэлектрической проницаемости.

На рис. 3 представлены рассчитанные методом конечных элементов в программной среде Ansys HFSS частотные зависимости коэффициентов отражения (кривая 1 - однородно заполненный волновод, кривая 2 - волновод со скачкообразным изменением диэлектрической проницаемости) и прохождения (кривая 3 - однородно заполненный волновод, кривая 4 - волновод со скачкообразным изменением диэлектрической проницаемости) рассмотренных ячеек.

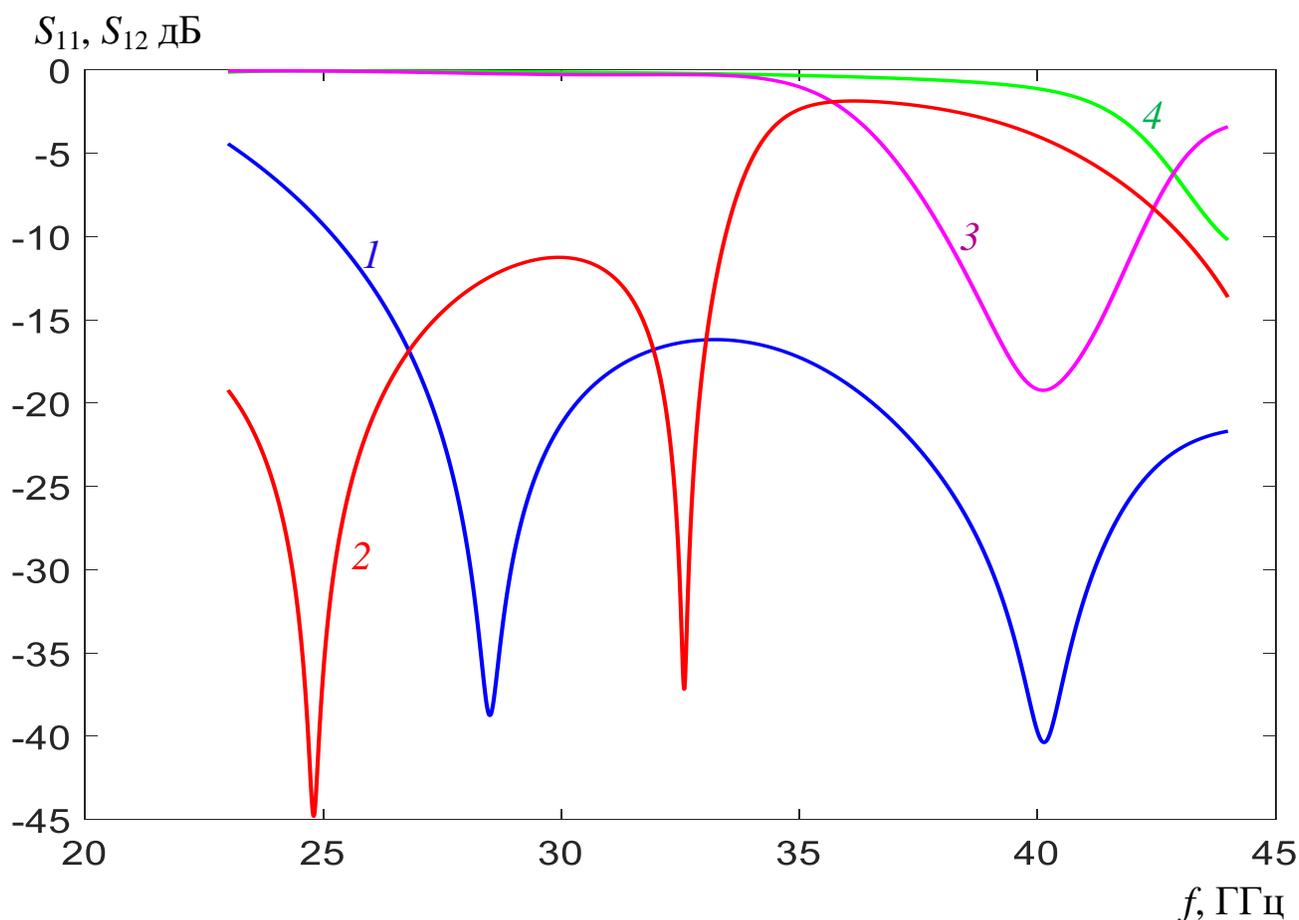


Рис. 3. Зависимости коэффициентов отражения и прохождения ячеек от частоты.

На рис. 3 видно, что отражение от ячейки однородно заполненного волновода (кривая 1) на двух частотах практически отсутствует. Однако попытки подобрать параметры ячейки так, чтобы эти частоты совпадали с резонансами периодического волновода, не увенчались успехом. Отражение от ячейки

волновода со скачкообразным изменением диэлектрической проницаемости на периоде (кривая 2) показывает, что отражение подавлено на двух частотах, которые совпадают с резонансами периодического волновода, и уровень отражения на обеих частотах не превышает -37 дБ. Кривая 3 показывает, что коэффициент передачи с частотой падает, причем на высоких частотах достаточно резко.

2. Исследование волноводно-щелевой антенной решётки

На основе метода конечных элементов была построена электродинамическая модель волновода со скачкообразным изменением диэлектрической проницаемости на периоде (240 периодов с длиной $L = 1108\text{мм}$) и волновода с эквивалентным двухслойным диэлектриком со скачкообразным изменением толщины одного из слоев. Такой волновод легче реализовать на практике, подбирая необходимый коэффициент замедления соотношением толщин слоев.

На рис. 4 и 5 представлены частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения для двух вариантов волновода вытекающей волны, при подключении ко входу антенны волновода с однородным заполнением и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.73$. На рисунках видно, что отражение от входа антенны с двухслойным диэлектриком выше, чем антенны с однослойным диэлектриком, а коэффициент прохождения в целом более стабилен в полосе частот.

На рис. 6 показаны зависимости угла излучения от частоты для двух вариантов антенны. Частотные области вне зоны между штриховыми линиями соответствуют разным режимам излучения (низкие частоты - область излучения основной (нулевой) гармоники, высокие частоты – область излучения минус первой гармоники). Области между режимами излучения основной и минус первой гармоник (между штриховыми линиями на рис.6) - переходные (нерабочие) области частот, в пределах которой происходит резкое изменение угла излучения антенны θ от 90^0 до -90^0 .

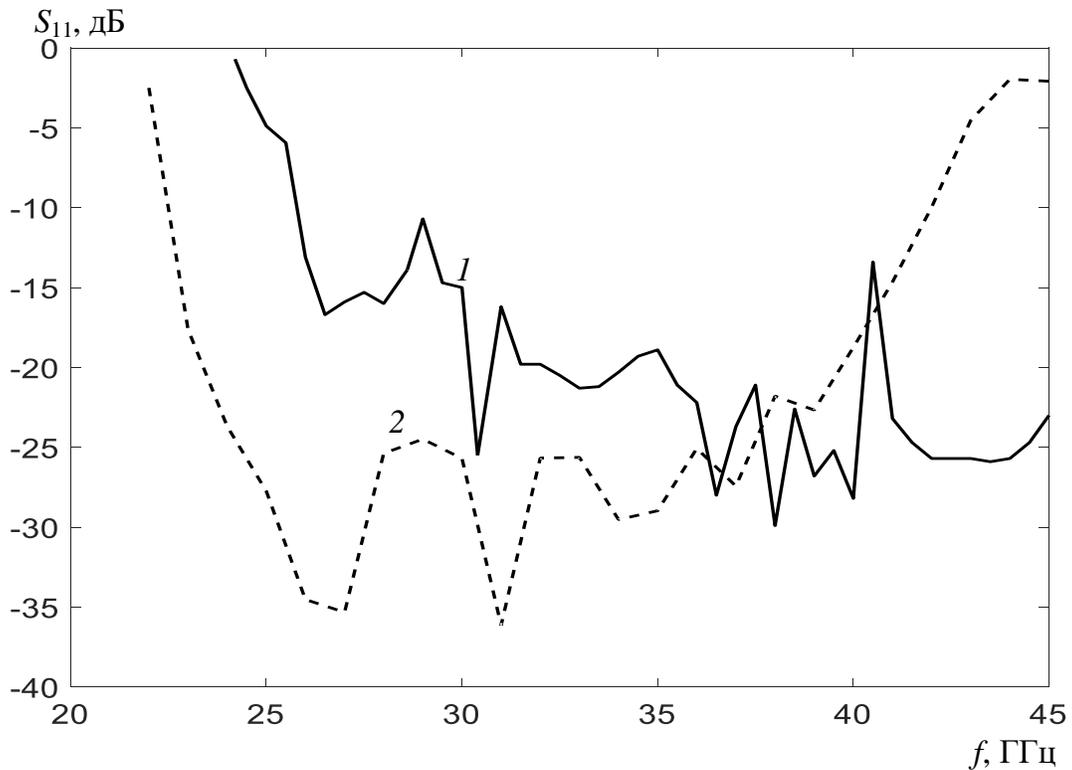


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициентов отражения (1 - двухслойный волновод, 2 – однослойный волновод).

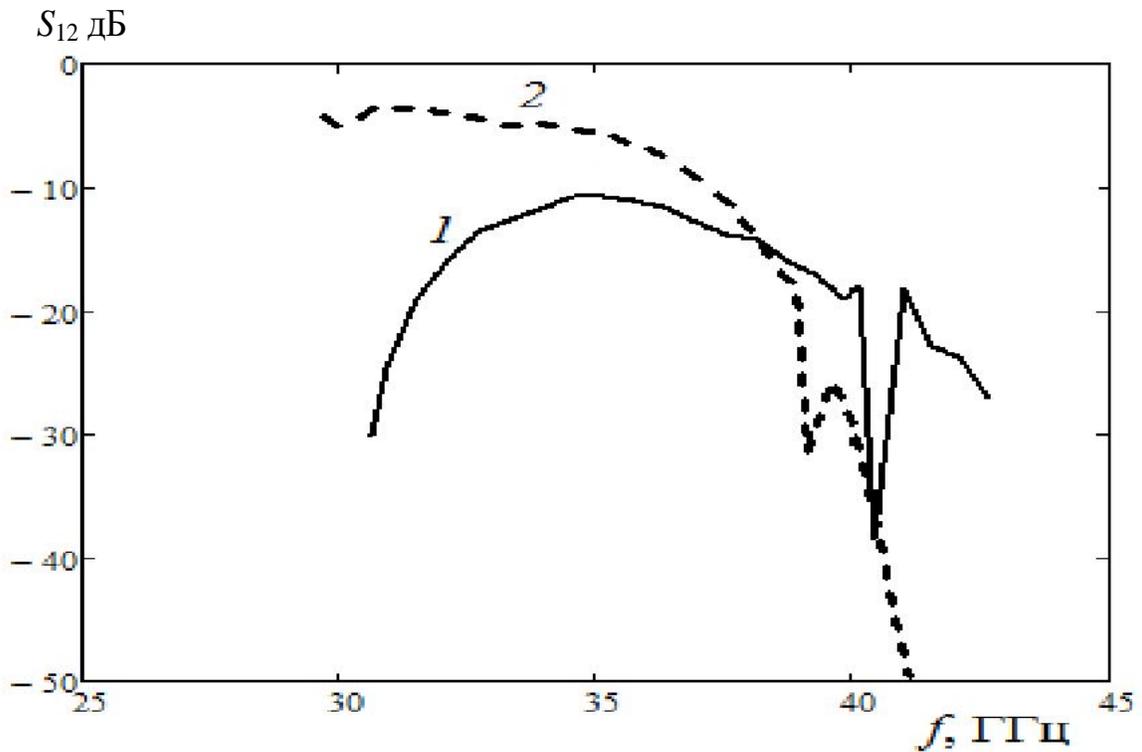


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициентов прохождения отражения (1 - двухслойный волновод, 2 – однослойный волновод).

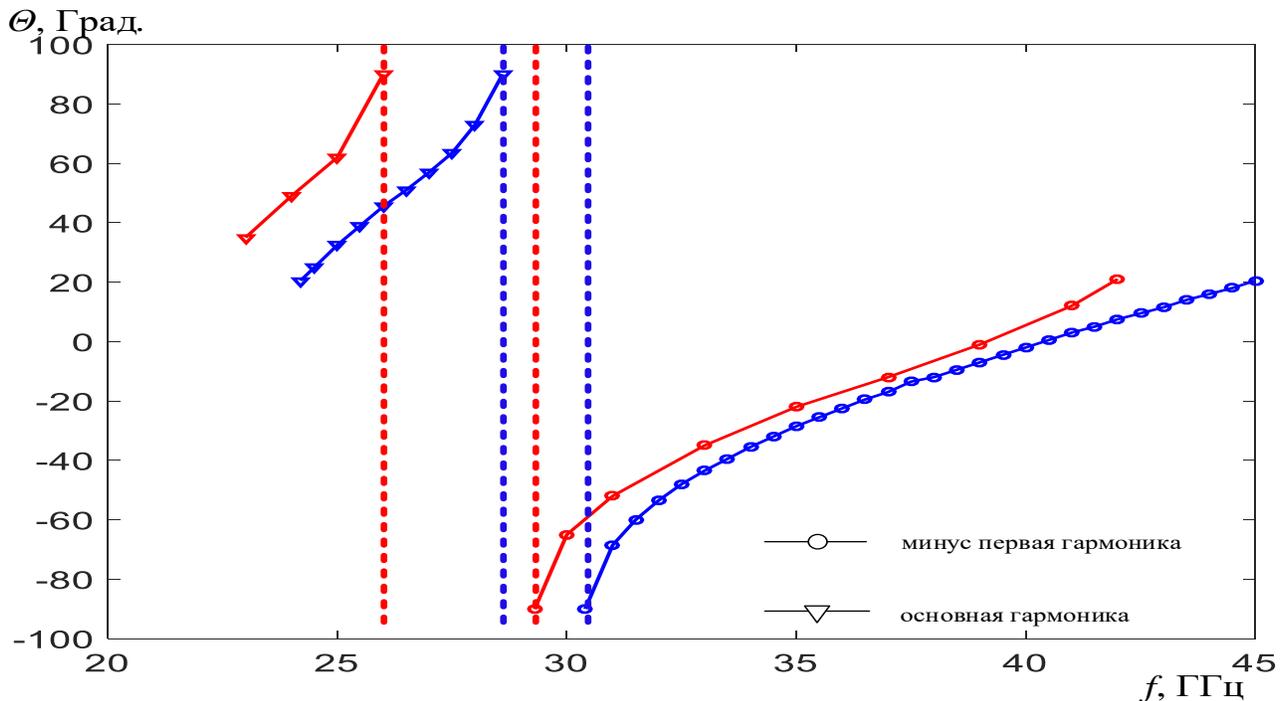


Рис. 6. Зависимость угла излучения от частоты: красные кривые – однослойный волновод, синие кривые – двухслойный волновод.

Используя найденную зависимость между частотой и углом излучения антенны (рис. 6), была найдена зависимость величин коэффициента усиления K_u (рис.7) и величины КИП от угла излучения (рис. 8). Максимумы кривых $K_u(\theta)$ соответствуют частотам: 1 - 23, 2 - 24, 3 - 25, 4 – 25.8, 5 – 29.6, 6 – 30.4, 7 - 31, 8 - 33, 9 - 35, 10 - 39, 11 – 42 , 1' - 25, 2' - 26, 3' - 27, 4' - 28, 5' - 29, 6' – 30.4, 7' - 31, 8' - 32, 9' - 34, 10' - 38, 11' - 40, 12' – 45 ГГц.

Как видно на рис.7, коэффициент усиления антенны с двухслойным диэлектриком выше, чем антенны с однослойным диэлектриком и нигде не падает ниже 22.5 дБ.

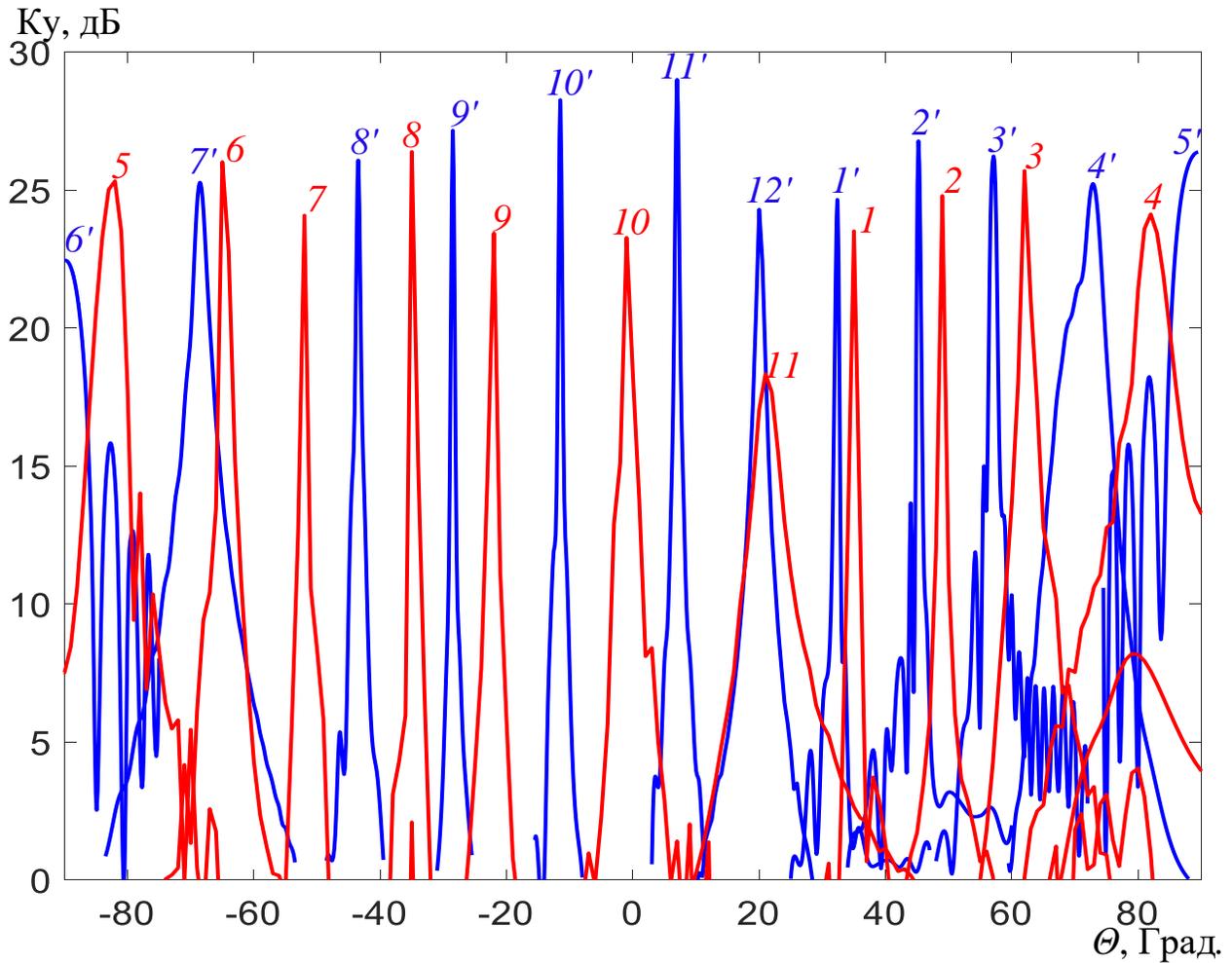


Рис. 7. Зависимости коэффициента усиления от угла сканирования в E – плоскости: красные кривые – однослойный волновод, синие кривые – двухслойный волновод.

Как видно на рис.8, антенна с однослойным диэлектриком имеет глубокие провалы уровня величины КИП в области излучения минус первой гармоники. КИП антенны с двухслойным диэлектриком опускается ниже уровня 0.5 только в относительно небольших угловых секторах (от -90° до -75° и от 20° до 30°).

Заключение

На основании полученных результатов можно сделать выводы:

1. Антенна со скачкообразным изменением диэлектрической проницаемости обеспечивает частотное сканирование луча во всем секторе углов от -90° до 90° , хорошее согласование по входу, но имеет глубокие провалы

коэффициента использования поверхности в широком диапазоне углов сканирования.

2. Антенна с двухслойным диэлектриком и скачкообразным изменением толщины одного из слоев обеспечивает частотное сканирование луча во всем секторе углов от -90° до 90° с уменьшением коэффициента использования поверхности менее 0.5 в двух небольших угловых диапазонах углов сканирования.

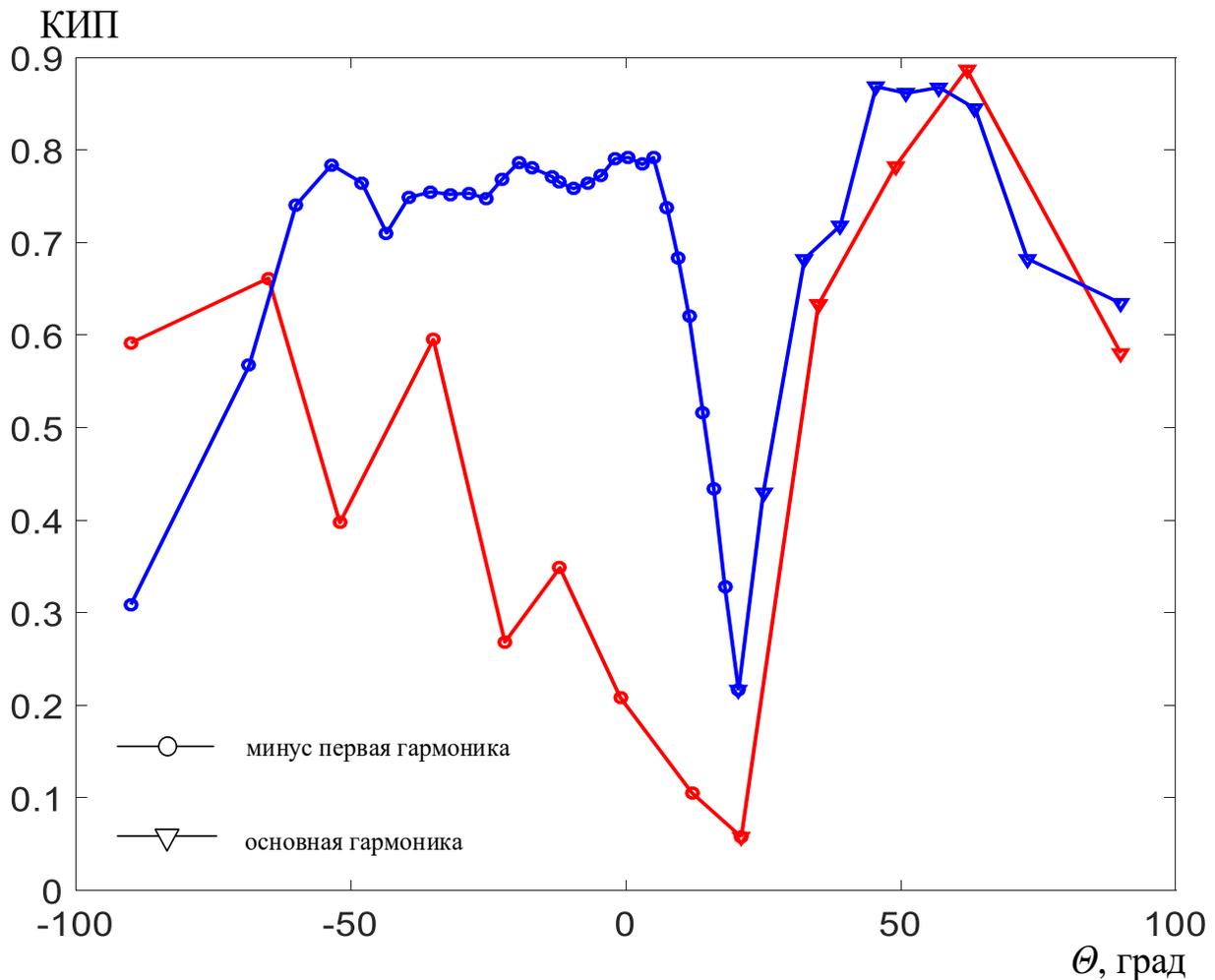


Рис. 8. Зависимость величины КИП от угла сканирования: красные кривые – однослойный волновод, синие кривые – двухслойный волновод.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-006.

Литература

1. Уолтер К. Антенны бегущей волны // под ред. А. Ф. Чаплина. – М.: Энергия. – 1970.
2. Калошин В. А. Антенны миллиметровых волн // Зарубежная радиоэлектроника. 1984. №11. С.81- 96.
3. Банков С. Е. Антенные решетки с последовательным питанием. М.: Физматлит, 2013.
4. Modern antenna handbook / Ed. C.A. Balanis. N.Y.: John Wiley & Sons, 2008.
5. Caloz C., Itoh T. “Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications” // The engineering approach. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
6. Dong Yu., Itoh T. “Composite right/left-handed substrate integrated waveguide and half mode substrate integrated waveguide leaky-wave structures” // IEEE Trans. 2011. V. AP-59. № 3. P. 767.
7. Калошин В.А., Калиничев В.И. “Линейная волноводно-щелевая антенная решетка с 180- градусным сектором частотного сканирования” // РЭ. 2019. Т. 64. № 7. С. 678.
8. Калошин В.А., Калиничев В.И. “Характеристики излучения линейной волноводно-щелевой решетки с широким сектором частотного сканирования” // Журнал радиоэлектроники 2019. № 2. <http://jre.cplire.ru/jre/feb19/7/text.pdf>
9. Xu F., Patrovsky A., Wu K. “Fast Simulation of Periodic Guided-Wave Structures Based on Commercial Software” // Microwave Opt. Technol. Lett. 2007. V. 49. № 9. P. 2180.

Для цитирования:

Калошин В.А., Ле Д.Т. Волноводно-щелевая антенна с сектором частотного сканирования 180 градусов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr20/1/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.4.1