

DOI 10.30898/1684-1719.2020.3.9

УДК 621.396.67

ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННА С ШИРОКИМ СЕКТОРОМ ЧАСТОТНОГО СКАНИРОВАНИЯ

В. А. Калошин¹, Д. Т. Ле², Е. В. Фролова¹

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

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский
университет), 141700, Москов. обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. 9

Статья поступила в редакцию 5 марта 2020 г.

Аннотация. Исследована линейная волноводно-щелевая антенна с широким сектором частотного сканирования. Антенна выполнена в виде прямоугольного интегрированного в подложку метало - диэлектрического волновода с периодически расположенными в широкой стенке щелями. Волноводно-щелевая антенна излучает на -1-ой пространственной гармонике. С использованием метода конечных элементов исследованы несколько вариантов антенны с разным количеством и расположением щелей на широкой стенке волновода. Показано, что антенна с четырьмя продольными щелями на периоде обеспечивают широкий сектор углов частотного сканирования. При этом синусоидальное распределение амплитуды поля вдоль антенны обеспечивает большую величину КИП в рабочей полосе частот, чем экспоненциальное. Результаты моделирования подтверждены результатами измерений характеристик согласования и излучения экспериментального образца антенны.

Ключевые слова: волноводно-щелевая антенна, частотное сканирование.

Abstract. A linear waveguide slot antenna with a wide sector of frequency scanning was investigated. The antenna is made in the form of a rectangular metal waveguide integrated into the substrate with slots periodically located in the wide wall. The waveguide slot antenna radiates at the -1st spatial harmonic. Using the finite element method, several variants with different numbers and arrangement of slots on a wide

waveguide wall were investigated. The waveguide cells (one period) with a single, two and three transverse slots, two and four longitudinal slots were preliminarily investigated. The cell parameters are selected from the calculation so that the reflection coefficients are minimal at a frequency of 10 GHz, and the transmission coefficients are approximately equal to -0.3 dB. Based on the analysis of the frequency stability of the transmission coefficient, an antenna with four longitudinal slots was selected for further research. It is shown that two versions of the antenna with four longitudinal slots per period provide a wide sector of frequency scanning angles. In this case, the sinusoidal distribution of the field amplitude along the antenna provides a larger efficiency in the working frequency band than exponential one. The simulation results are confirmed by the measurement results of the matching characteristics and radiation of the experimental antenna sample.

Key words: waveguide-slot antenna, frequency scanning.

Введение. Волноводно-щелевые антенны вытекающей волны находят широкое применение в различных приложениях. Методы анализа и характеристики антенн этого типа описаны в ряде монографий и обзоров [1-4]. Большинство из них использует двойные продольные щели на периоде в широкой стенке волновода в качестве излучающих элементов. В работе [5] рассмотрена задача синтеза и анализа антенны вытекающей волны на прямоугольном волноводе с двойными продольными щелями в широкой стенке с переменными длинами и синусоидальным распределением поля вдоль волновода. В работе [6] рассмотрены планарные двумерно-периодические сканирующие антенные решетки вытекающей волны, состоящие из заполненных диэлектриком прямоугольных металлических волноводов с двойными поперечными щелями. В [7] рассмотрены волноводно-щелевые антенны с различным количеством поперечных щелей на периоде антенны.

В данной работе исследованы возможности расширения рабочей полосы и, соответственно, сектора частотного сканирования волноводно-щелевой антенны с излучением на -1 пространственной гармонике в виде интегрированного в подложку волновода со щелями в широкой стенке с различным количеством и расположением щелей на периоде.

1. Частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения

При исследовании коэффициентов отражения и прохождения в зависимости от частоты, типа и количества щелей на периоде антенны ограничимся сначала рассмотрением одного периода, т.е. одной ячейки прямоугольного волновода сечением 15×5 мм, заполненного диэлектриком с относительной проницаемостью $\varepsilon = 2.25$ и щелями в широкой стенке. Поперечное сечение метало - диэлектрического волновода приведено на рис. 1, толщина медных стенок волновода 0.5 мм.

Рассмотрим ячейки с одиночной (рис. 2), двумя (рис. 3) и тремя поперечными щелями (рис. 4), а также с двумя (рис. 5) и четырьмя продольными щелями (рис. 6). Параметры ячеек будут выбраны из расчета, чтобы коэффициенты отражения при возбуждении ячейки были минимальными на частоте 10 ГГц, соответствующей излучению антенны по нормали, а коэффициенты прохождения были бы примерно равны - 0.3 дБ.

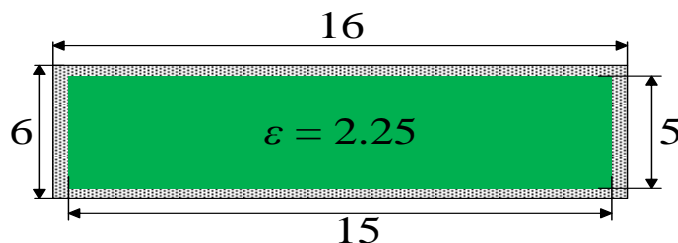


Рис. 1 - Поперечное сечение метало - диэлектрического волновода.

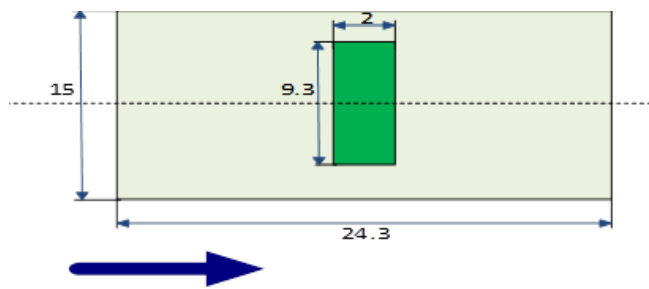


Рис. 2 - Ячейка с одиночной поперечной щелью.

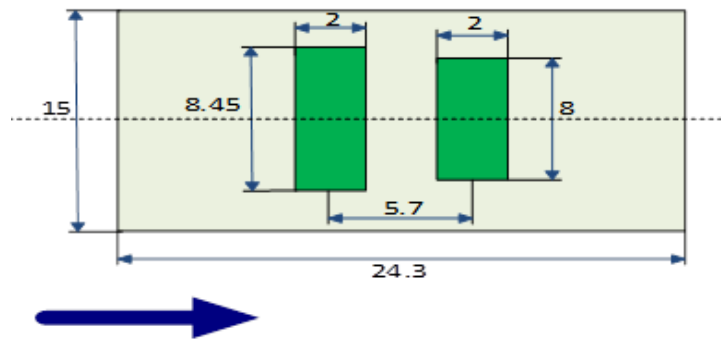


Рис. 3 - Ячейка с двумя поперечными щелями.

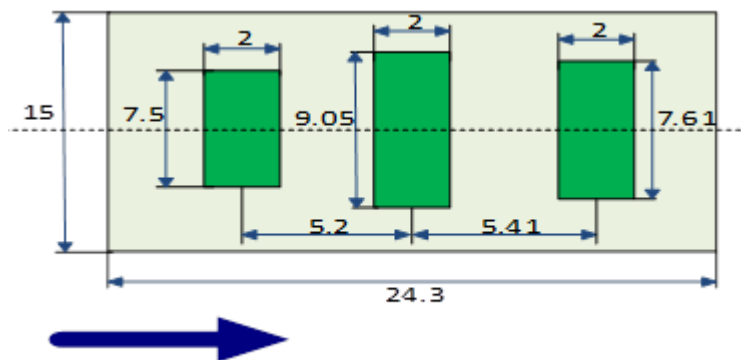


Рис. 4 - Ячейка с тремя поперечными щелями.

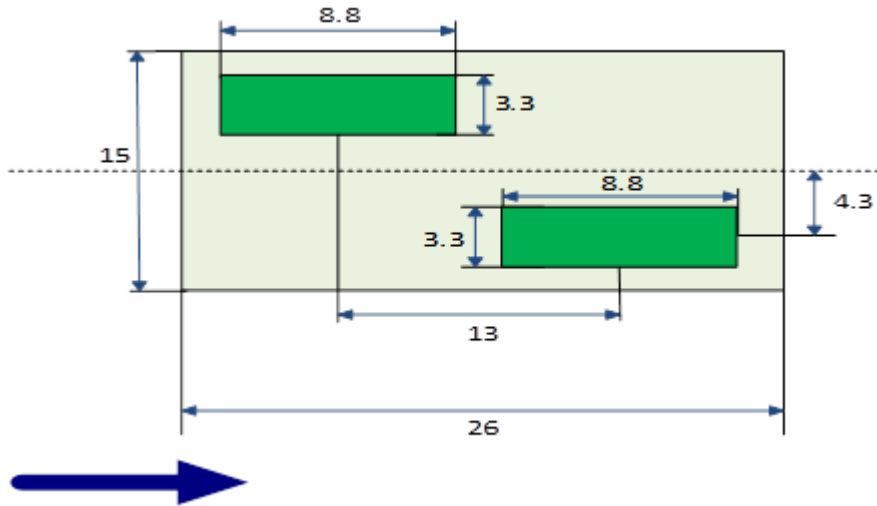


Рис. 5 - Ячейка с двумя продольными щелями.

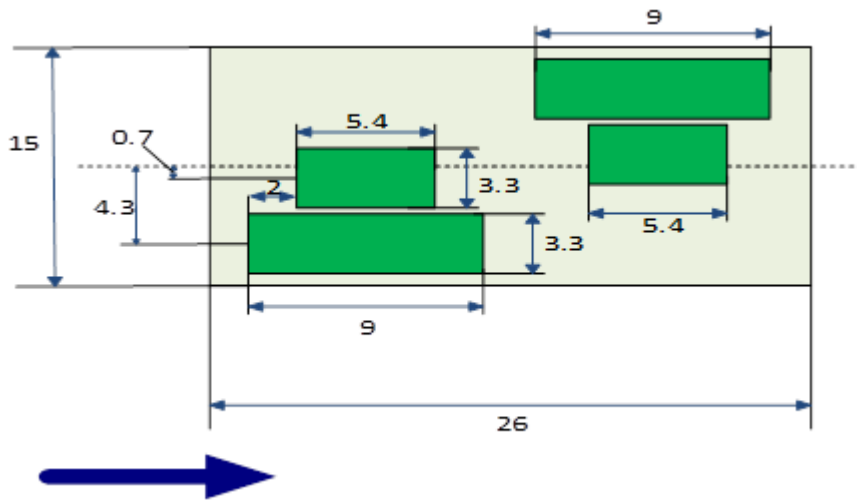


Рис. 6 - Ячейка с четырьмя продольными щелями.

На рисунках 7, 8 представлены рассчитанные методом конечных элементов частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения рассмотренных ячеек.

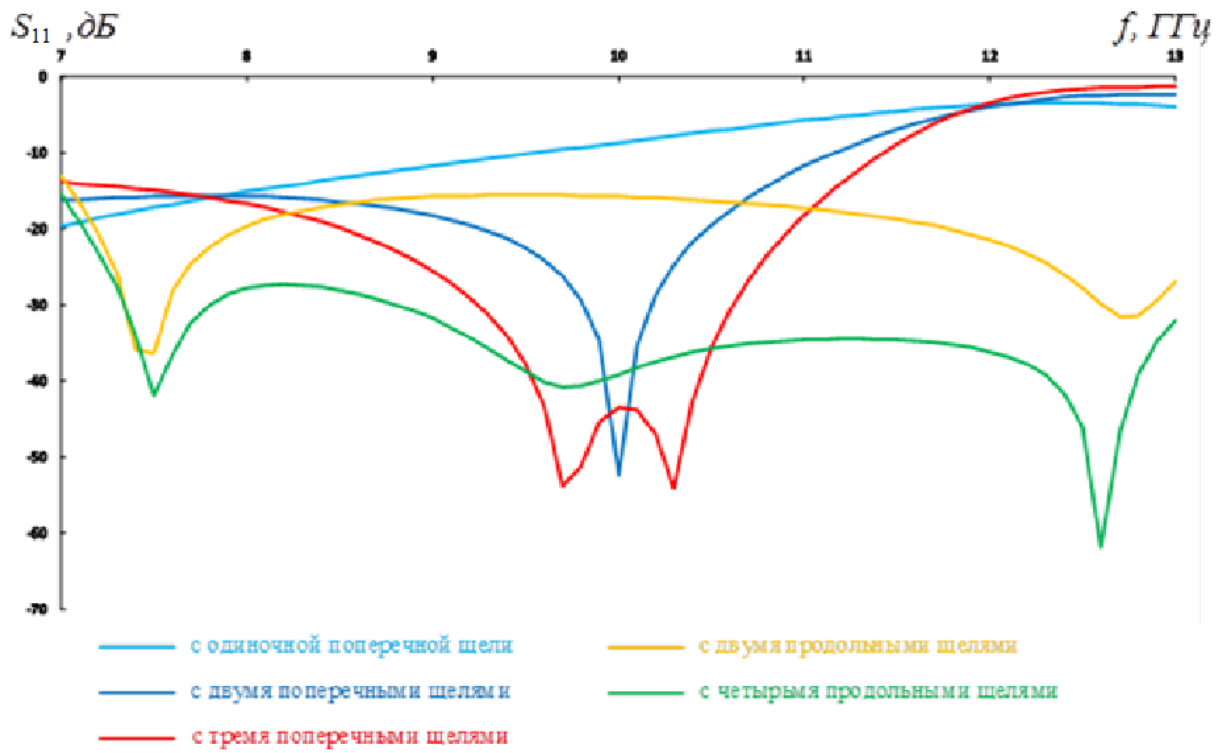


Рис. 7 - Зависимости коэффициентов отражения ячеек от частоты.

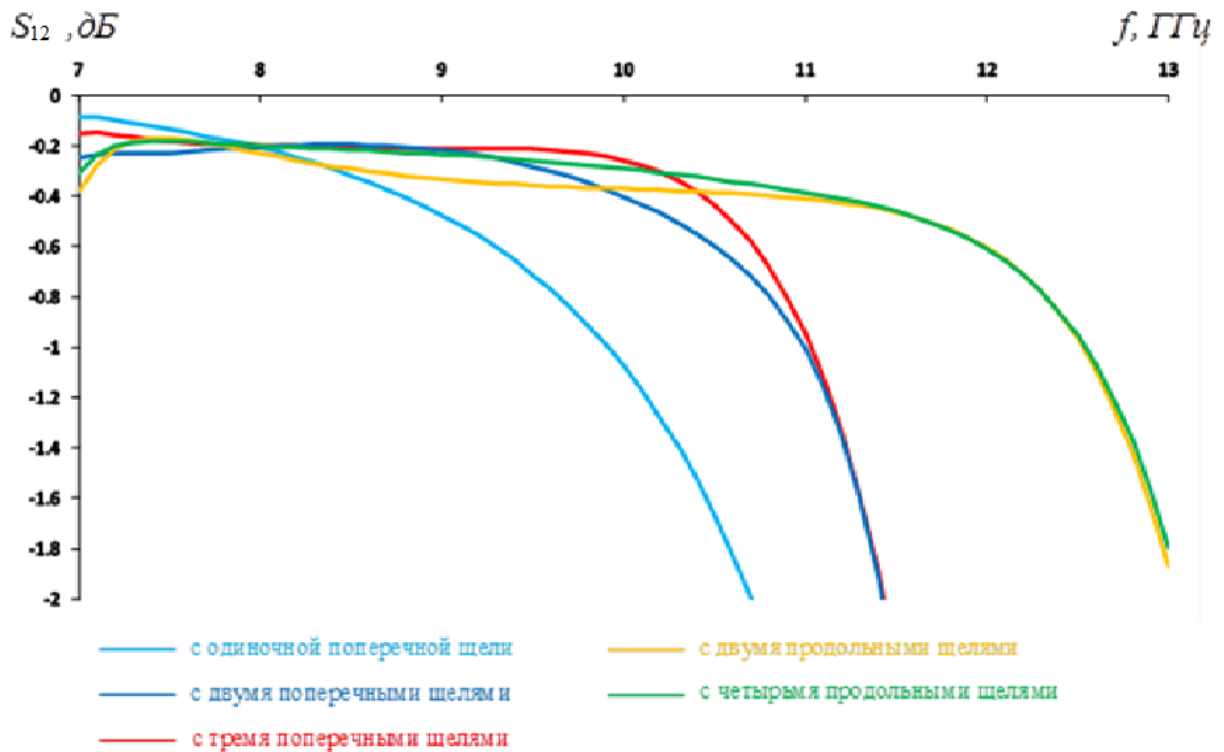


Рис. 8 - Зависимости коэффициентов прохождения ячеек от частоты

На рис. 7, 8 видно, что ячейка с одиночной поперечной щелью имеет высокий коэффициент отражения в полосе частот от 7 до 13 ГГц и ее коэффициент передачи резко падает в этой полосе частот. Также можно видеть, что наиболее стабильными в полосе частот от 7 до 12 ГГц являются коэффициенты прохождения ячеек с четырьмя продольными щелями. Исследование возможностей именно этого варианта антенны будет проведено ниже.

2. Исследование линейной волноводно-щелевой антенны с четырьмя продольными щелями

Рассмотрим ячейку интегрированного в подложку волновода с четырьмя продольными щелями (рис. 9). Размер узкой стенки волновода равен 1.6мм, остальные размеры и параметры оптимизации в низко - частотной части миллиметрового диапазона показаны на рисунке.

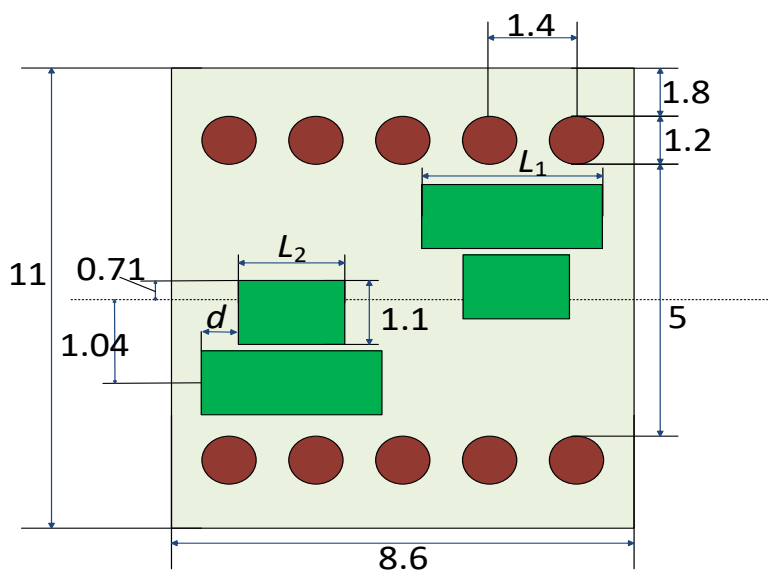


Рис. 9 - Ячейка с четырьмя продольными щелями.

Для обеспечения согласования при излучении по нормали были выбраны четыре набора параметров ячеек, в которых коэффициенты отражения

минимальны на частоте 30 ГГц: 1 - $L_1 = 4.1$, $L_2 = 2.48$, $d = 1.14$; 2 - $L_1 = 3.8$, $L_2 = 2.25$, $d = 1.045$; 3 - $L_1 = 3.5$, $L_2 = 2.42$, $d = 0.78$; 4 - $L_1 = 3.2$, $L_2 = 1.32$, $d = 1.15$. Все размеры здесь и далее - в миллиметрах.

На рис. 10, 11, соответственно, представлены расчетные зависимости постоянной затухания α и постоянной распространения β от частоты для этих наборов параметров ячейки. Номер кривой соответствует номеру набора параметров. При моделировании ячейки использовалась методика, описанная в работе [6].

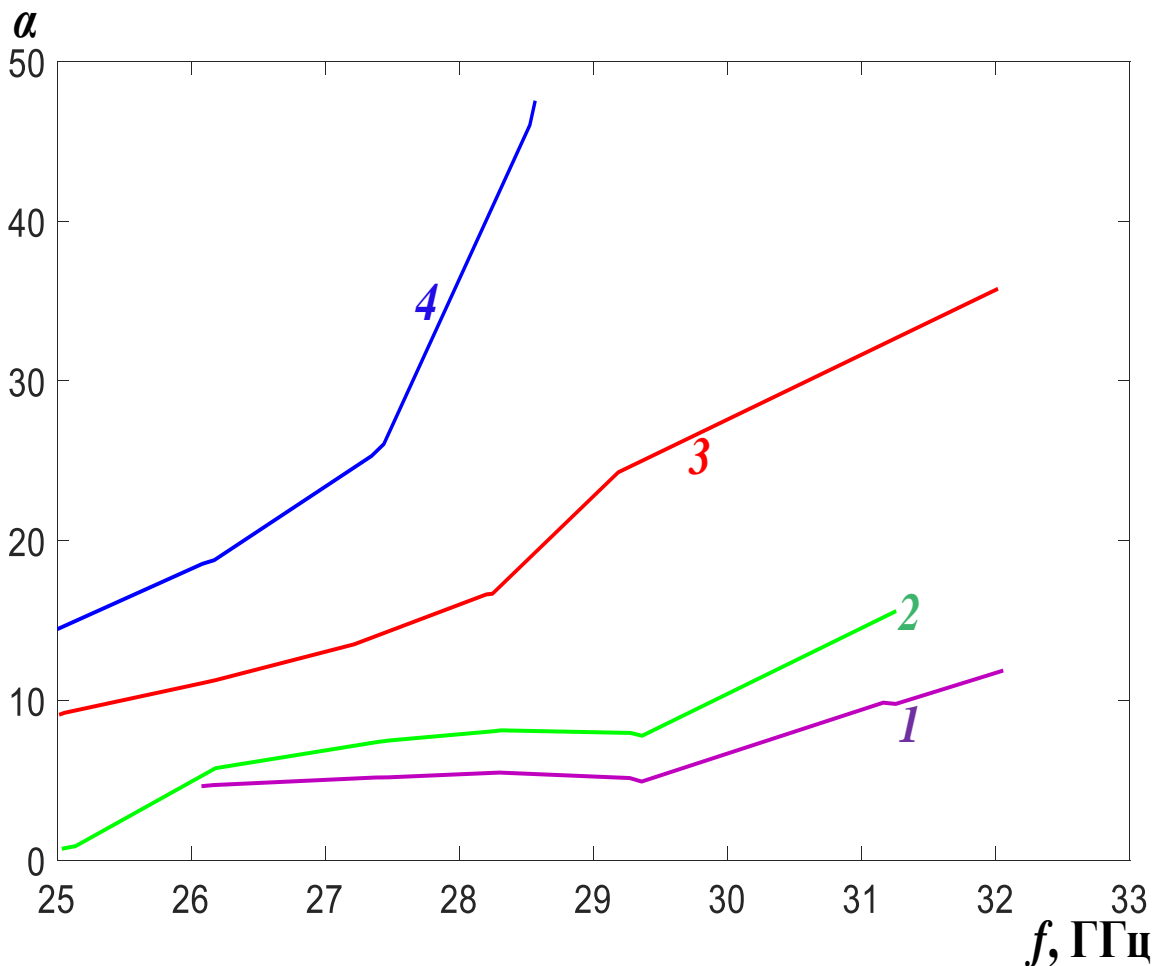


Рис. 10. Зависимости постоянной затухания вытекающей моды от частоты.

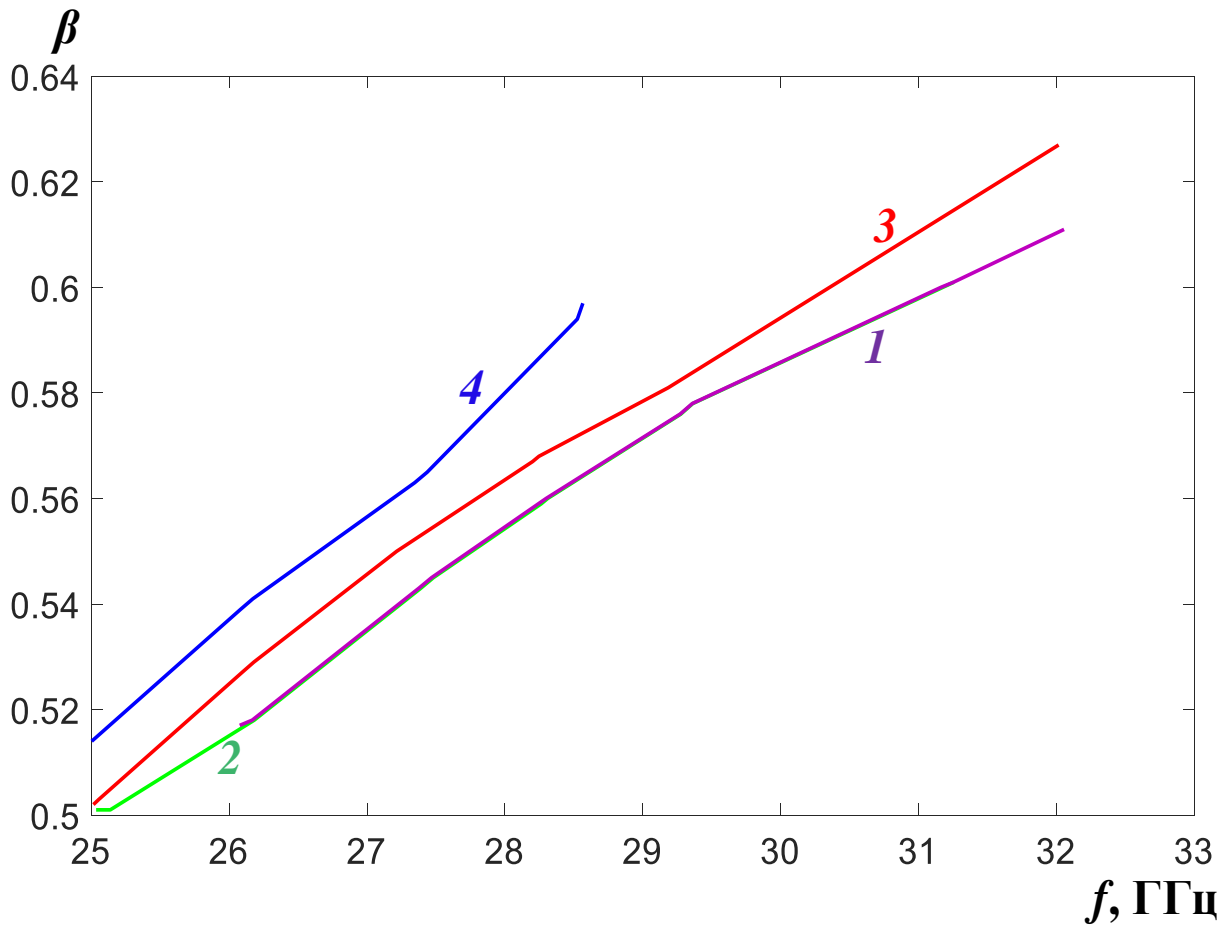


Рис. 11. Зависимости постоянной распространения вытекающей моды от частоты.

На рис.10 видно, что постоянная затухания сильно зависит от частоты и параметров ячейки. При этом постоянная распространения (рис.11) растет с частотой практически по линейному закону и сравнительно слабо зависит от параметров ячейки.

Постоянная затухания наиболее стабильна в области частот 26- 30 ГГц. На средней частоте этого диапазона ($f = 28$ ГГц) зависимость постоянной затухания от длины первой щели (L_1) можно аппроксимировать по формуле $\alpha(L_1) = 0.0078 \exp(2.01L_1)$. Используя эту формулу и известную формулу [1, 4], связывающую постоянную затухания и распределение мощности вытекающей волны вдоль волновода, можно найти зависимость длины щели L_1 (у) вдоль волновода. Длины других щелей выбираются из расчета, чтобы коэффициенты

отражения при возбуждении ячейки были минимальными на частоте 30 ГГц, соответствующей излучению по нормали.

Длина щели L_1 для синусоидального распределения модуля электрического поля вдоль волновода определяется формулой

$$L_1(y) = \frac{(\ln(0.5\alpha(y)) - \ln(a_0))}{b_0}, \quad (1)$$

где $a_0 = 0.0078$, $b_0 = 2.01$, $\alpha(y) = (10^3 A(y)) / ((\frac{P_0}{P_0 - P_L}) \frac{2L}{\pi} + \frac{L}{\pi} \cos((\frac{\pi y}{L}) - 1))$,

$A(y) = \sin(\pi y/L)^{0.5}$ - амплитудное распределение поля вдоль антенны, P_0 - полная мощность на входе антенны, P_L - мощность излучения, $L = 172$ мм - длина антенны. Результаты расчетов длины щели с L_1 использованием формулы (1) и остальных параметров оптимизации приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Длины щелей (L_1 , L_2) и их относительное положение (d).

Номер	L_1 (мм)	L_2 (мм)	d (мм)
1	1.851	0.1	1.075
2	2.399	0.53	1.135
3	2.656	0.72	1.168
4	2.827	0.83	1.199
5	2.958	1.01	1.174
6	3.065	1.19	1.138
7	3.157	1.36	1.099
8	3.238	1.51	1.084
9	3.312	1.7	1.026
10	3.381	1.89	0.966
11	3.445	2.31	0.808
12	3.505	2.39	0.798
13	3.56	2.4	0.83
14	3.611	2.45	0.841
15	3.654	2.44	0.867
16	3.682	2.5	0.851
17	3.685	2.5	0.853
18	3.637	2.47	0.844
19	3.479	2.4	0.78
20	2.988	1.04	1.174

При выборе постоянных значений параметров $L_1 = 3.5\text{мм}$, $L_2 = 2.34\text{мм}$ и $d = 0.83\text{мм}$ реализуется экспоненциальное распределение поля вдоль антенны со спаданием амплитуды вытекающей моды на конце антенны -10 дБ .

На рис.12 приведены результаты моделирования методом конечных элементов распределения амплитуды электрического поля вдоль антенны в плоскости ее симметрии на расстоянии от излучающей поверхности. На рисунке видно достаточное хорошее совпадение заданных и полученных распределений амплитуды поля.

На рис.13 красной и синей кривой, соответственно для экспоненциального и синусоидального распределений амплитуды поля, приведены результаты моделирования частотной зависимости коэффициента отражения. На рисунке видно, что уровень отражения во всей исследованной полосе частот не превышает -12 дБ .

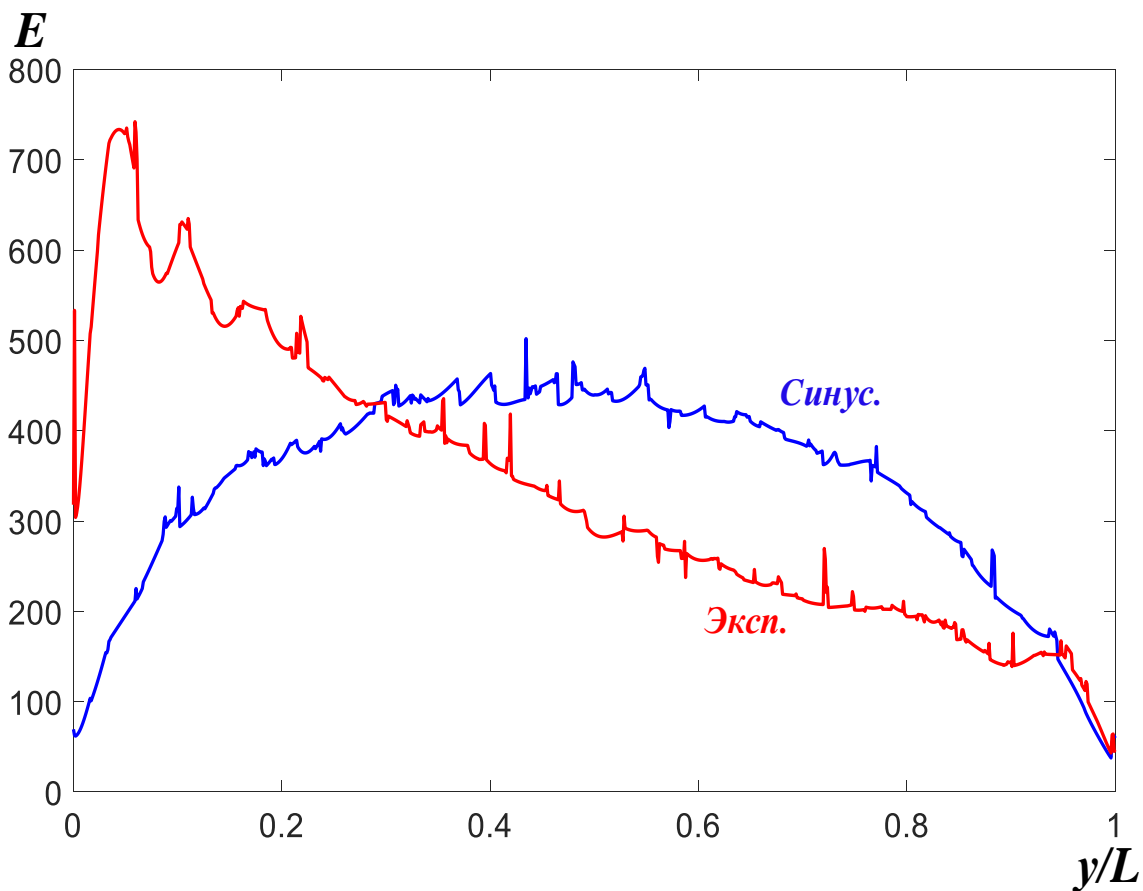


Рис. 12. Распределения амплитуды электрического поля вдоль антенны.

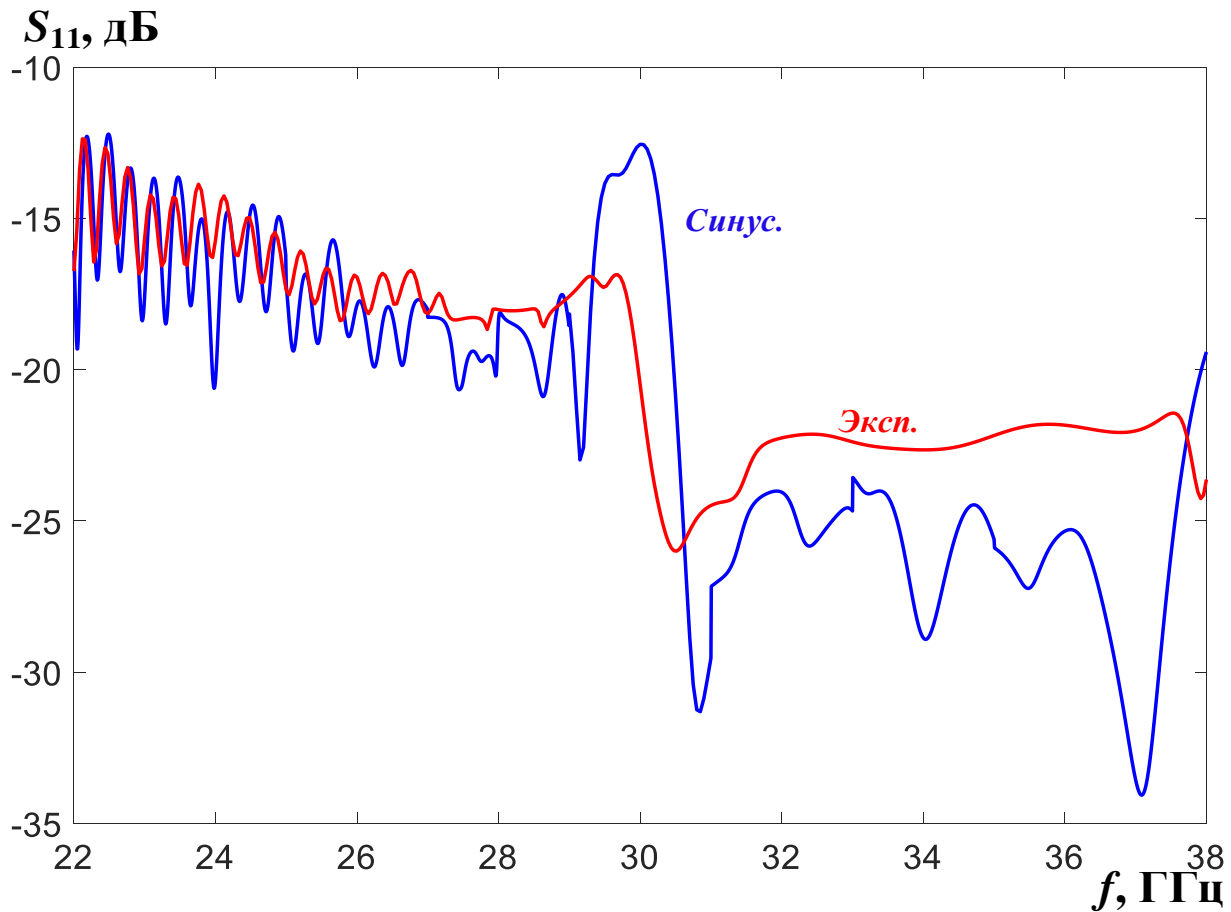


Рис. 13. Зависимости коэффициентов отражения от частоты.

На рис.14 в тех же цветах приведены диаграммы направленности антенны на 17 частотах при синусоидальном и экспоненциальном распределениях амплитуды. На рис. 14 видно, что усиление на высоких частотах у антенны с синусоидальным амплитудным распределением спадает медленнее, чем в случае экспоненциального распределения. На рис. 15 представлены соответствующие зависимости КИПа от частоты.

На рис.15 видно, что КИП антенны с экспоненциальным распределением более 0.5 в секторе углов сканирования 47° , а антенны с синусоидальным распределением – в секторе углов сканирования 55° .

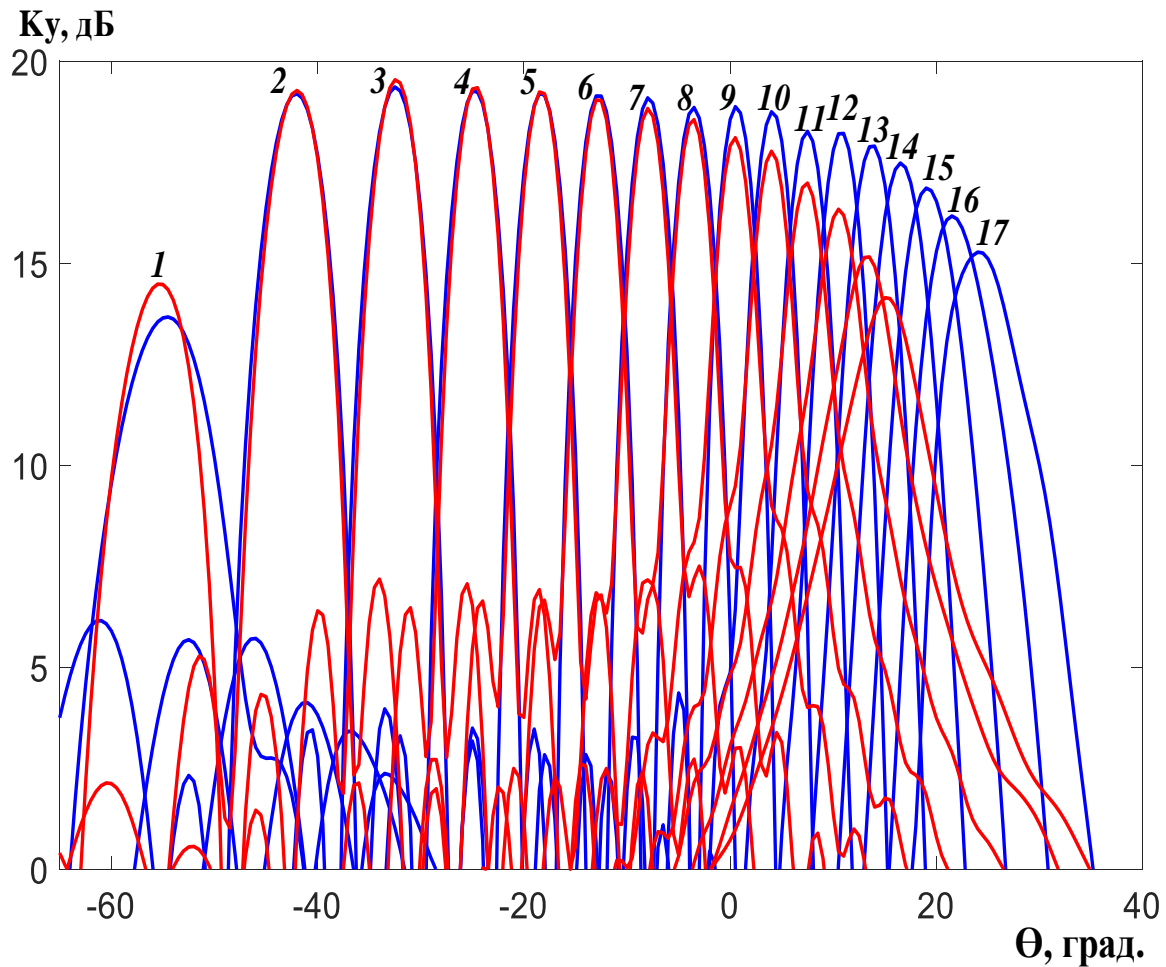


Рис.14. Диаграммы направленности на частотах: 1 – 22ГГц, 2 - 23ГГц, 3 - 24ГГц, 4 - 25ГГц, 5 - 26ГГц, 6 - 27ГГц, 7 - 28ГГц, 8 - 29ГГц, 9 - 30ГГц, 10 - 31ГГц, 11 - 32ГГц, 12 - 33ГГц, 13 - 34ГГц, 14 - 35ГГц, 15 - 36ГГц, 16 - 37ГГц, 17 - 38ГГц.

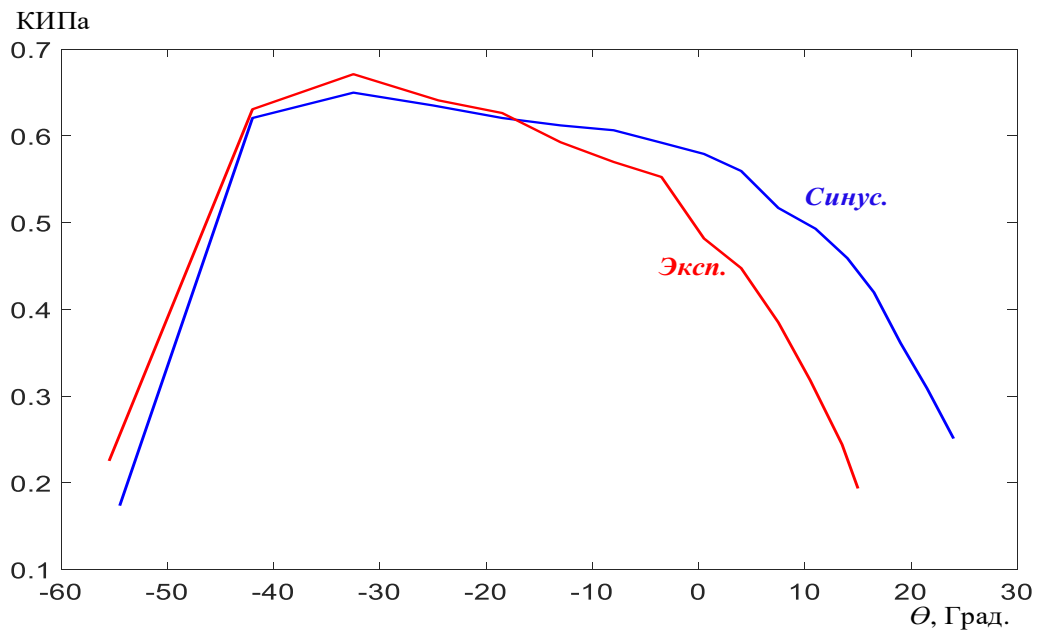


Рис. 15. Зависимости КИПа от частоты.

На рис. 16 приведено фото экспериментального образца волноводно-щелевой антенны длиной 187 мм (15 ячеек) с экспоненциальным распределением. На рис. 17 представлены зависимости коэффициентов отражения от частоты, а на рис. 18 - диаграммы направленности экспериментального образца антенны на 13 частотах. Синими кривыми на рисунках показаны результаты моделирования, красными - измерений.



Рис.16. Экспериментальный образец антенны.

Как видно на рис. 17, результаты измерений коэффициента отражения выше расчетных на 3-5 дБ, а области частот 31 - 33 ГГц – на 5-7 дБ. При этом коэффициент отражения на частоте излучения по нормали (30 ГГц) не превышает уровень – 10 дБ в отличие от классической конструкции антенны с двумя продольными щелями на периоде (зеленая кривая).

Как видно на рис. 18, различие между результатами моделирования и измерений коэффициента усиления экспериментального образца не превышает 1 дБ, за исключением области низких частот (менее 30 ГГц).

Отличие результатов измерений коэффициентов отражения и усиления от результатов моделирования можно объяснить рядом факторов, в том числе наличием коаксиально-волноводного перехода, отражение от которого не учитывалось при моделировании, качеством изготовления экспериментального образца и т.д.

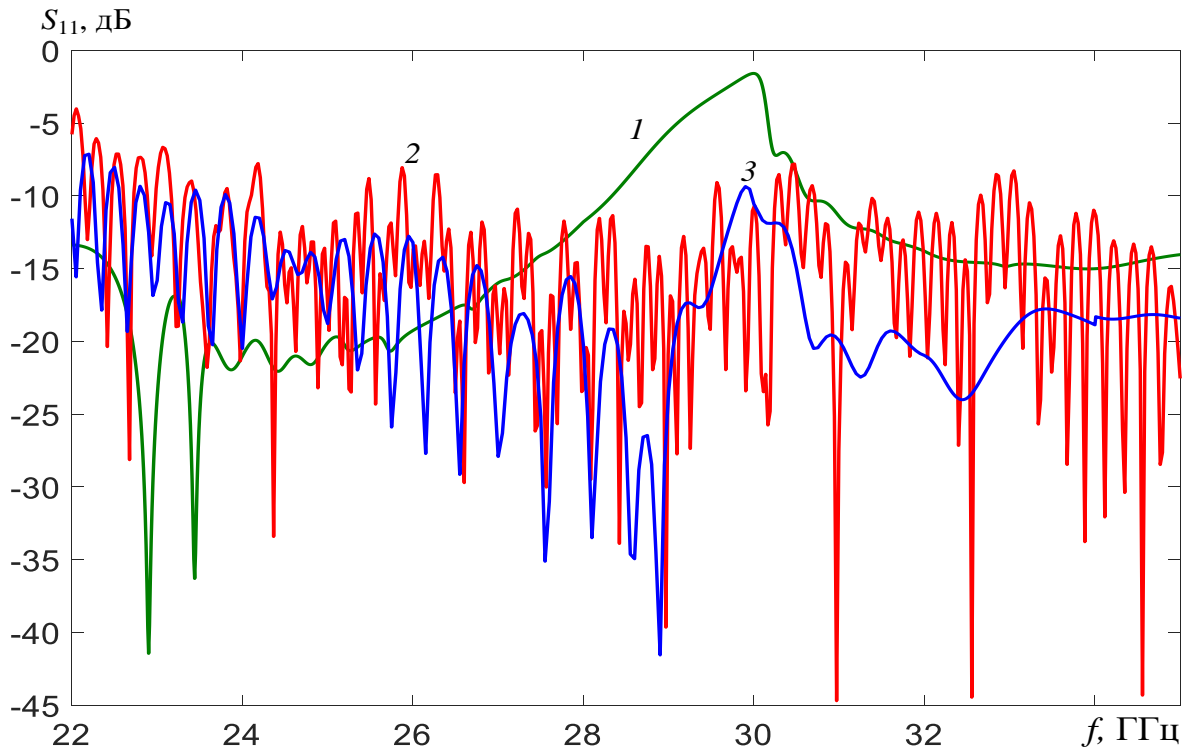


Рис. 17. Частотная зависимость коэффициента отражения.

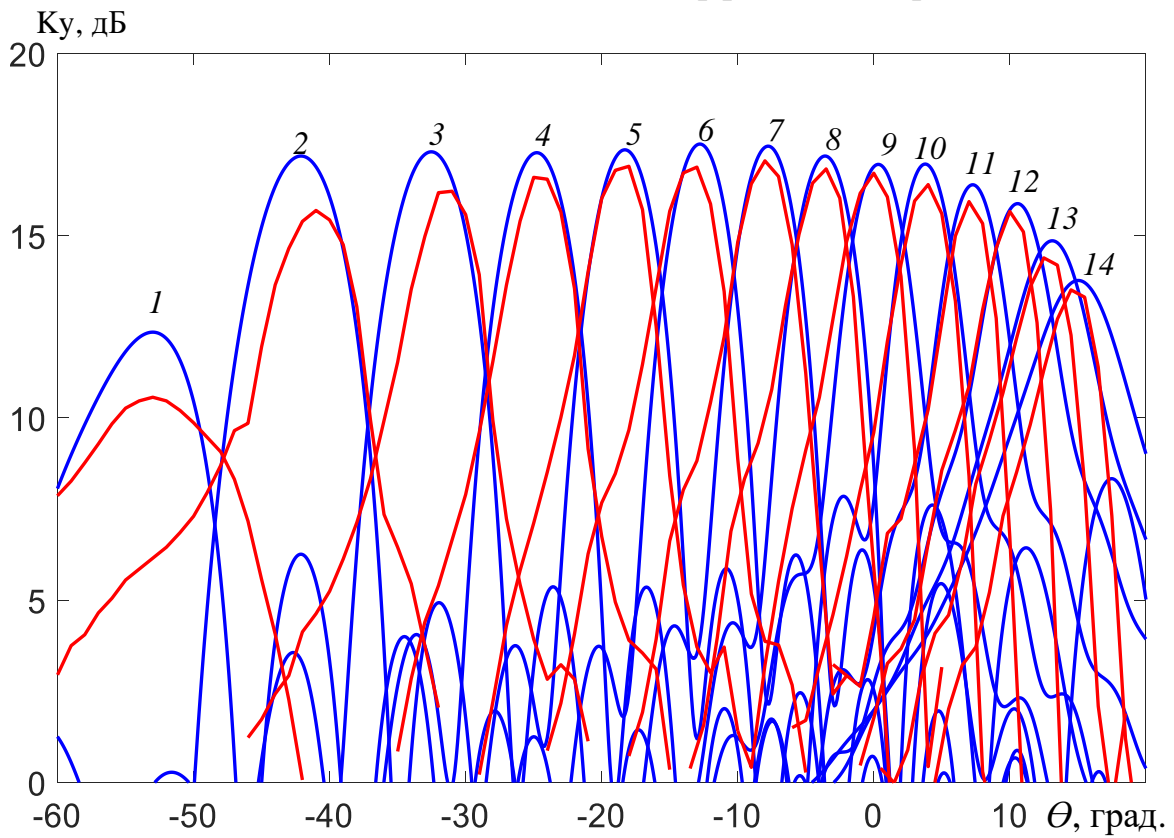


Рис. 18. Диаграммы направленности на частотах: 1-23 ГГц, 2-24 ГГц, 3-25 ГГц, 4-26 ГГц, 5-27 ГГц, 6-28 ГГц, 7-29 ГГц, 8-30 ГГц, 9-31 ГГц, 10-32 ГГц, 11-33 ГГц, 12-34 ГГц, 13-35 ГГц.

Заключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Результаты моделирования подтвердили возможность реализации широкой полосы частот и, соответственно, широкого сектора частотного сканирования волноводно-щелевой антенны на основе интегрированного в подложку метало - диэлектрического волновода с четырьмя продольными щелями на периоде.
2. Синусоидальное распределение амплитуды поля вдоль антенны обеспечивает больший сектор частотного сканирования по сравнению с экспоненциальным при заданном уровне величины КИП.
3. Результаты измерения характеристик согласования и излучения экспериментального образца волноводно-щелевой антенны в целом подтверждают результаты численного эксперимента.

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. Мануилов М. Б., Лерер В. А., Синявский Г. П. Методы расчета и новые применения волноводно-щелевых антенных решеток // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. №5. С. 3-28.
4. Банков С. Е. Антенные решетки с последовательным питанием // – М., Физматлит. 2013.
5. Калиничев В. И. Анализ и синтез волноводно-щелевой антенны с заданным амплитудным распределением // Журнал радиоэлектроники. 2015. №12.
URL <http://jre.cplire.ru/jre/dec15/8/text.pdf>

6. Калиничев В. И., Бабаскин А. А. Частотно-фазовое сканирование волноводно-щелевых антенных решеток, заполненных диэлектриком // Журнал радиоэлектроники. 2017. №9. URL <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/14/text.pdf>

7. David R. S., Okan Yurduseven, Laura P. M. and others. Analysis of a waveguide-fed metasurface antenna // Phys. Rev. Appl. 2017. V.8(5). 054048.

Для цитирования:

Калошин В.А., Ле Д.Т., Фролова Е.В. Волноводно-щелевая антенна с широким сектором частотного сканирования. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar20/9/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.3.9