

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ С ЗАДАННЫМ АМПЛИТУДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

В. И. Калиничев

ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

Статья поступила в редакцию 1 декабря 2015 г.

Аннотация. Рассмотрена задача анализа и синтеза антенны вытекающей волны на прямоугольном волноводе с эквидистантной решеткой двойных щелей в широкой стенке и заданным распределением поля вдоль волновода. С использованием метода конечных элементов проведены расчеты комплексной постоянной распространения в периодическом волноводе сравнения. Определено необходимое распределение длин щелей вдоль решетки, обеспечивающее косинусоидальное амплитудное распределение. Для синтезированной антенны рассчитаны элементы матрицы рассеяния, характеристики излучения и сканирования луча в диапазоне частот 8.5-9.5 ГГц. Спадающее к краям распределение амплитуды поля в апертуре позволило получить пониженный уровень боковых лепестков и улучшенное согласование в полосе частот.

Ключевые слова: антенна вытекающей волны, комплексная постоянная распространения, прямоугольный волновод, неоднородная щелевая решетка, синтез антенны.

Abstract. The problem of analysis and synthesis of a leaky wave antenna on a rectangular waveguide with an equidistant array of dual slots in the wide wall and predetermined amplitude field distribution along the waveguide is considered. Using the finite-element method, the calculations of the complex propagation constant in periodic waveguide of comparison are performed. Given the cosine amplitude distribution, the required slot lengths distribution along the array is determined. For the synthesized antenna, the S-parameters, radiation and beam scanning characteristics are computed in the 8.5-9.5 GHz band. The descending towards the edges of the aperture amplitude field distribution yielded the reduced SLL and

improved matching in the frequency band.

Keywords: leaky-wave antenna, complex propagation constant, rectangular waveguide, nonuniform slotted array, antenna synthesis.

Введение

Существует множество публикаций по антеннам вытекающих волн (см., например, книги и обзоры [1-5]). Большинство из них относится к периодическим излучающим структурам. В [6] рассмотрены некоторые типы непериодических линейных и планарных антенных решеток вытекающей волны. Обсуждаются возможности излучения и фокусировки поля в ближней зоне, методы анализа и примеры реализации. Несмотря на большое число работ по антеннам вытекающих волн, в настоящее время исследования и разработки в этой области продолжают развиваться. Развиваются методы моделирования и технологии изготовления, а также расширяется область приложений таких антенн. Примером является работа [7], в которой реализована антенна вытекающей волны на прямоугольном волноводе сечением 1.295×0.648 мм с однородной решеткой щелей в терагерцовом диапазоне частот, предназначенная для работы в РЛС в системе планетарной посадки. Проведено моделирование и тестирование двух вариантов антенны с разной длиной решетки щелей. Результаты измерений прототипов хорошо согласуются с рассчитанными характеристиками согласования, излучения и частотного сканирования. Относительно методов теоретического описания и расчета антенн вытекающих волн можно отметить работу [8], в которой предложен аналитический метод анализа антенных решеток на волноводах со щелями, учитывающий особенности поля на острых металлических кромках. На примере анализа больших решеток доказана эффективность метода и быстрая сходимость использованных в нем разложений поля. Теоретические результаты, полученные в работе, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Целью данной статьи является описание метода анализа и синтеза антенны вытекающей волны на прямоугольном волноводе с неоднородной

решеткой щелей в широкой стенке с заданным амплитудным распределением поля вдоль волновода. Антенны этого типа используются в тех случаях, когда требуется получить пониженный уровень боковых лепестков по сравнению с излучением, создаваемым однородной щелевой решеткой. Для проектирования антенн вытекающих волн необходимо знание комплексной постоянной распространения моды, создающей излучение антенны. Численный метод расчета постоянной распространения основной вытекающей моды в прямоугольных и волноводах с однородной периодической решеткой щелей, основанный на резонаторной модели и периодических граничных условиях, предложен в [9]. Суть метода заключается в том, что по заданному набегу фазы на периоде структуры рассчитывается собственная комплексная частота эквивалентного резонатора, образуемого одним периодом данной структуры. Действительная часть собственной частоты определяет фазовую постоянную распространения вытекающей моды, мнимая часть – добротность резонатора и связанную с ней постоянную затухания.

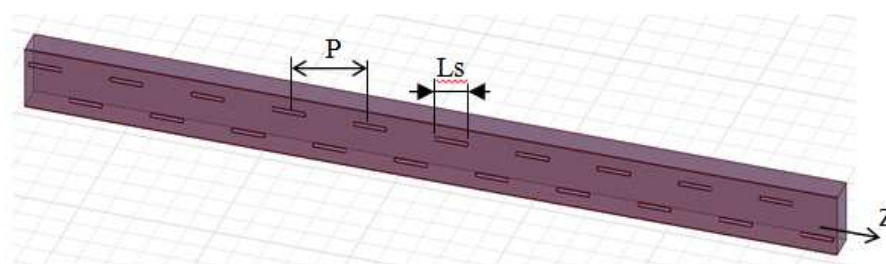
Синтез антенны вытекающей волны с заданным амплитудным распределением поля вдоль антенны может быть осуществлен разными способами. В данной работе используется сильная зависимость постоянной затухания вытекающей моды от длины щелей и синтезируется неоднородная решетка из щелей переменной длины при фиксированном периоде решетки и расстоянии щелей от оси волновода. Для этого сначала проведены расчеты на основе метода [9] комплексной постоянной распространения в периодическом волноводе с парами щелей, длина которых является параметром и изменяется в определенных пределах.

Далее, используя идею метода поперечных сечений, можем рассматривать такой периодический волновод с однородной решеткой одинаковых щелей в качестве волновода сравнения при синтезе волновода с неоднородной решеткой щелей переменной длины. Это дает возможность определить требуемое распределение длин щелей в решетке, которое обеспечивает заданное амплитудное распределение поля вдоль антенны.

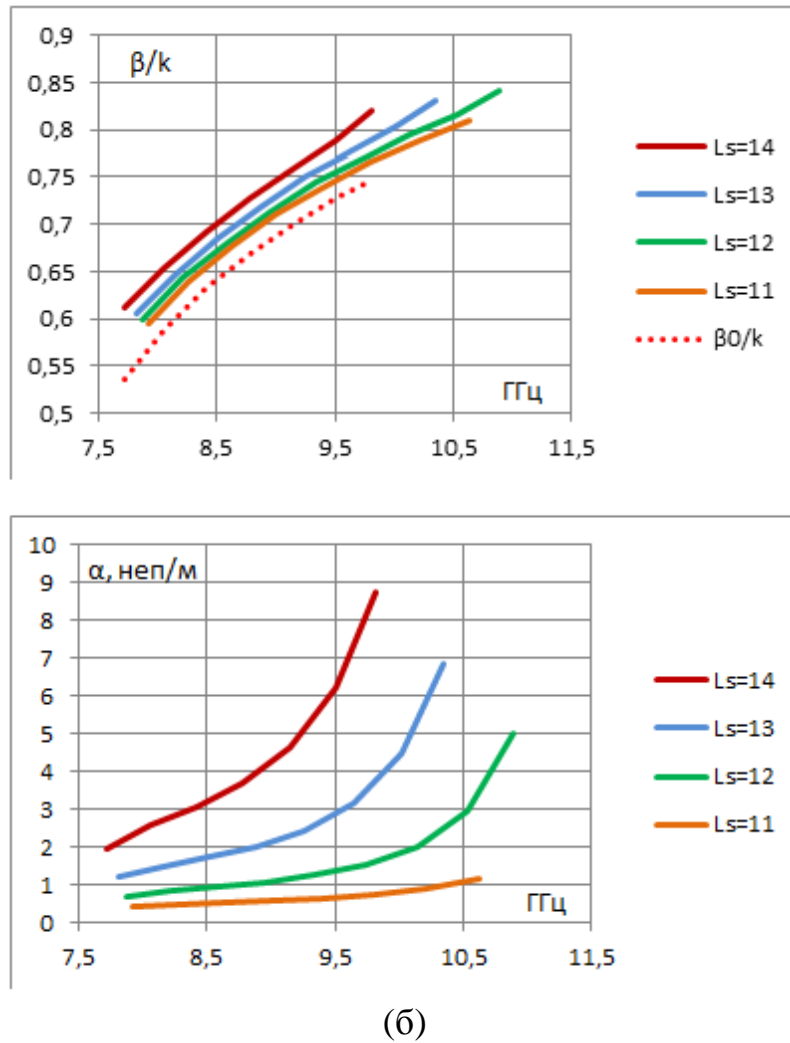
Использование метода конечных элементов для численного моделирования синтезированной антенны позволяет рассчитать распределение амплитуды электрического поля вдоль апертуры, а также характеристики согласования, излучения и сканирования луча антенны в диапазоне частот.

1. Расчет постоянной распространения в периодическом волноводе

Как уже отмечено выше, в данной работе для реализации заданного распределения поля будем использовать неоднородную решетку из эквидистантно расположенных вдоль оси волновода пар щелей переменной длины. Расстояние щелей от центральной линии широкой стенки фиксировано и равно четверти ширины стенки, ширина щелей также фиксирована. Волноводом сравнения для такой неоднородной решетки является периодический волновод с однородной решеткой одинаковых щелей, см. рис. 1а. Длина щелей L_s в нем является параметром, изменяющимся в определенных пределах. Поэтому для решения задачи синтеза антенны вытекающей волны на неоднородной решетке сначала необходимо провести расчеты комплексной постоянной распространения вытекающей моды в периодическом прямоугольном волноводе сравнения с парными продольными щелями одинаковой длины. Расчеты были проведены с помощью метода, основанного на резонаторной модели и периодических граничных условиях [9]. Толщина стенки волновода задана равной 0.5 мм, материал – медь. Некоторые расчетные зависимости действительной части β и мнимой части α постоянной распространения от частоты для четырех длин щелей L_s при фиксированном периоде $P=30$ мм и ширине щелей 3 мм представлены на рис. 1б (длины щелей указаны в мм).



(a)



(б)

Рис. 1. (а) – Периодический волновод сравнения с сечением 23x10 мм, (б) – Действительная и мнимая части постоянной распространения вытекающей моды в зависимости от частоты для разных длин щелей. Период 30 мм, ширина щелей 3 мм. Пунктир - фазовая постоянная основной моды в сплошном металлическом волноводе

Результаты численного расчета хорошо аппроксимируются сравнительно простыми аналитическими функциями. Величина α описывается экспоненциальной зависимостью от длины щелей. В рассмотренных пределах изменения L_s при $P=30$ мм и ширине щелей 3 мм на частоте 9 ГГц эта аппроксимация имеет вид $\alpha(L_s) = 0.0003 \cdot \exp(0.6806 \cdot L_s)$, где α в неп/м, L_s в мм. В то же время, фазовая постоянная сравнительно слабо зависит от длины щелей и при тех же параметрах хорошо описывается полиномиальной зависимостью:

$\beta/k(L_s)=0.0020*L_s^2-0.0376*L_s+0.882$, $k = 2\pi/\lambda$ - постоянная распространения, λ - длина волны в свободном пространстве. Для ширины щелей 1.5 мм при том же периоде щелей $P=30$ мм и на той же частоте 9 ГГц аппроксимирующие зависимости имеют аналогичный вид: $\alpha(L_s)=7 \times 10^{-5} * \exp(0.7443*L_s)$, $\beta/k(L_s)=0.0023 * L_s^2 - 0.0458*L_s + 0.9343$. Значения β и α для вытекающей моды и их аппроксимации были получены также и для нескольких других значений периода однородной решетки щелей.

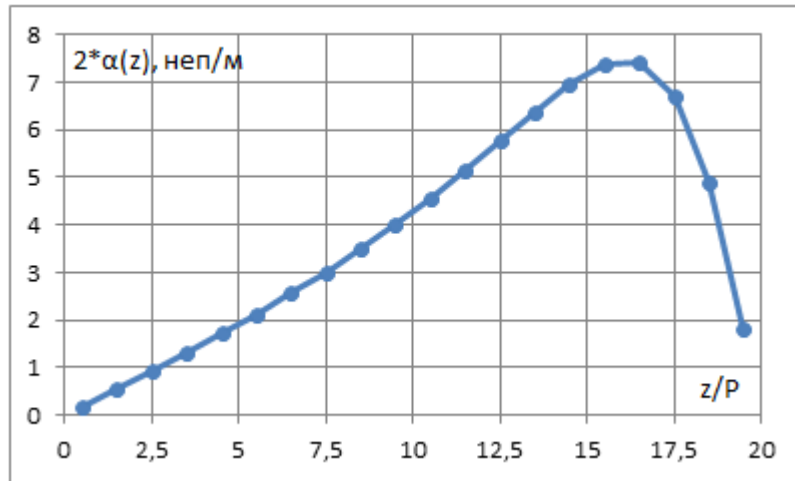
2. Синтез антенны

Полученные зависимости $\alpha(L_s)$ были использованы для решения задачи синтеза антенны вытекающей волны, имеющей заданное амплитудное распределение поля вдоль апертуры. В данном случае под синтезом имеем в виду определение параметров неоднородной решетки, в которой реализуется заданное распределение поля. В качестве примера была рассмотрена задача синтеза неоднородной решетки на основе прямоугольного волновода сечением 23×10 мм с парными продольными щелями в широкой стенке и распределением амплитуды поля в апертуре $E(z) = \sin(\pi z/L)^{0.5}$, где $L = 600$ мм – длина апертуры, координата z отсчитывается от входного сечения волновода. Требуемый закон изменения постоянной затухания определяется путем интегрирования амплитудного распределения вдоль апертуры [1] и представлен на рис. 2а в виде зависимости $2\alpha(z)$ от переменной z/P . Основываясь на представленной выше экспоненциальной зависимости $\alpha(L_s)$ для периода 30 мм и ширины щелей 3 мм, получаем необходимое распределение длин щелей вдоль антенны, приведенное на рис. 2б, которое отвечает закону затухания на рис. 2а. Точки на графиках соответствуют середине каждого отрезка-периода. Выбирая длины щелей в соответствии с рис. 2б, тем самым синтезируем неоднородную решетку, которая обеспечивает требуемое распределение поля вдоль антенны.

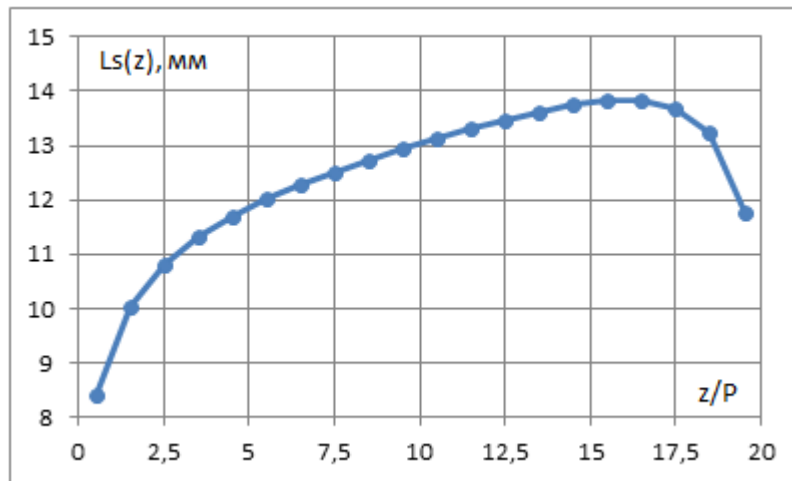
3. Характеристики антенны

Была построена модель и рассчитаны характеристики синтезированной антенны вытекающей волны с длинами щелей в решетке, изменяющимися в соответствии с рис. 2б. Отметим, что фазовая скорость распространения

вытекающей волны в антенне с таким распределением длин щелей не является постоянной, несмотря на постоянный период решетки. Имеет место некоторое изменение этой величины вдоль антенны за счет изменения длин щелей. Используя приведенную выше аппроксимацию $\beta/k(L_s)$, получаем, что изменение фазовой постоянной вдоль антенны составляет около 5% (рис. 3



(a)



(б)

Рис. 2. Требуемый коэффициент вытекания (а) и соответствующие длины щелей (б) в зависимости от продольной координаты вдоль апертуры. Период 30 мм, ширина щелей 3 мм, частота 9 ГГц

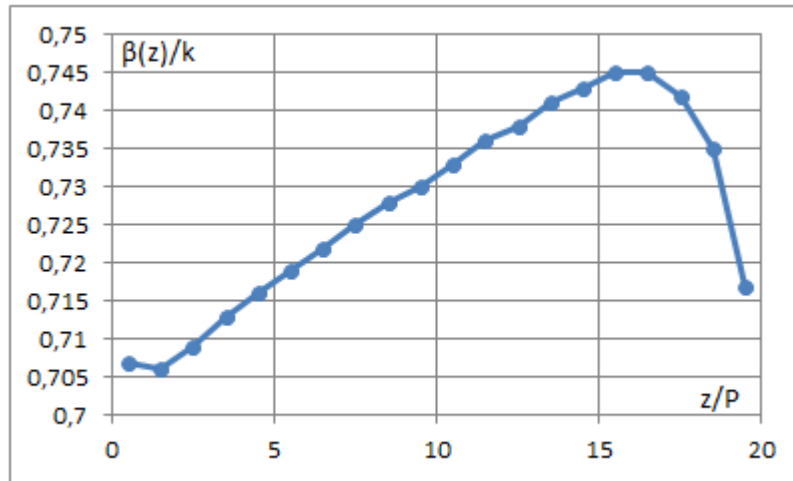
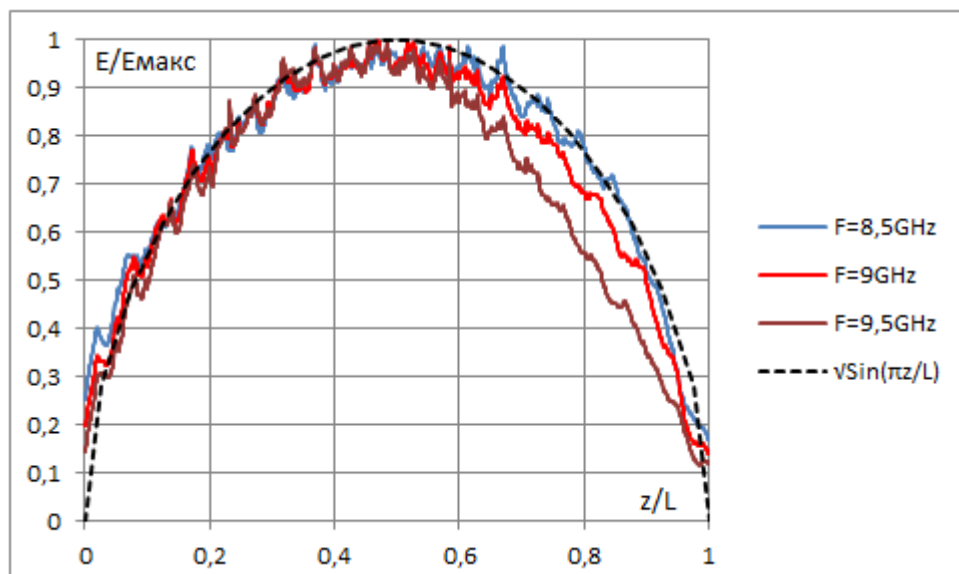
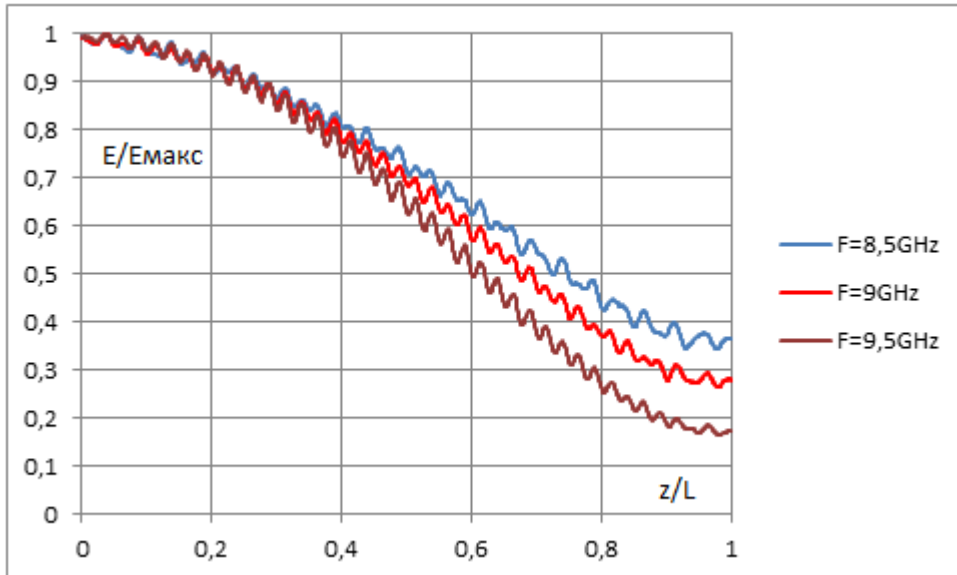


Рис. 3. Изменение фазовой постоянной распространения вдоль антенны с неоднородной решеткой щелей

При моделировании антенны предполагаем, что волновод задней стенкой расположен на металлическом экране, за счет чего исключается излучение в полупространство за волноводом. На рис. 4а, б показаны рассчитанные на трех частотах нормированные распределения амплитуды поля E вдоль щелевой апертуры на расстоянии 15 мм от широкой стенки и внутри волновода вдоль его оси. Видим, что рассчитанное и заданное (штриховая линия на рис. 4а) амплитудные распределения достаточно хорошо согласуются.



(a)



(б)

Рис. 4. Нормированные распределения поля E на расстоянии 15 мм от апертуры (а) и внутри волновода вдоль его оси (б). Штриховая линия – заданное распределение

На рис. 5 представлены элементы матрицы рассеяния антенны, рассчитанные в полосе частот 8.5 - 9.5 ГГц. На рис. 6 приведены диаграммы направленности излучения антенны на трех частотах. Основное излучение происходит на -1 пространственной гармонике в обратном направлении относительно направления распространения вытекающей волны в волноводе.

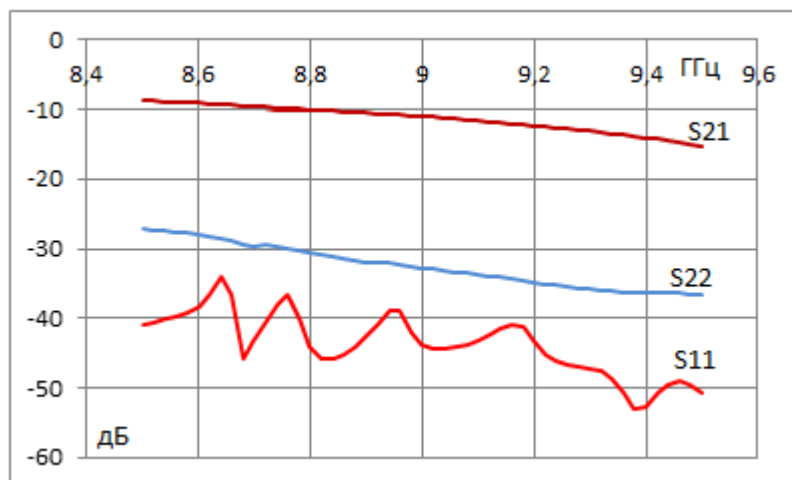


Рис. 5. Элементы матрицы рассеяния антенны в полосе частот: 1 – вход, 2-выход

Диапазон сканирования луча антенны в рассмотренном диапазоне частот составляет от 106.5° до 119.5° с производной угла сканирования луча по частоте $13^\circ/\text{ГГц}$. Ширина луча в Н-плоскости по уровню половинной мощности составляет примерно 3.6° , в то время как в Е-плоскости луч намного шире, что наглядно иллюстрируется рассчитанной трехмерной диаграммой направленности на рис. 7. Направленность и коэффициент усиления антенны около 22 дБ, уровень боковых лепестков около -17 дБ.

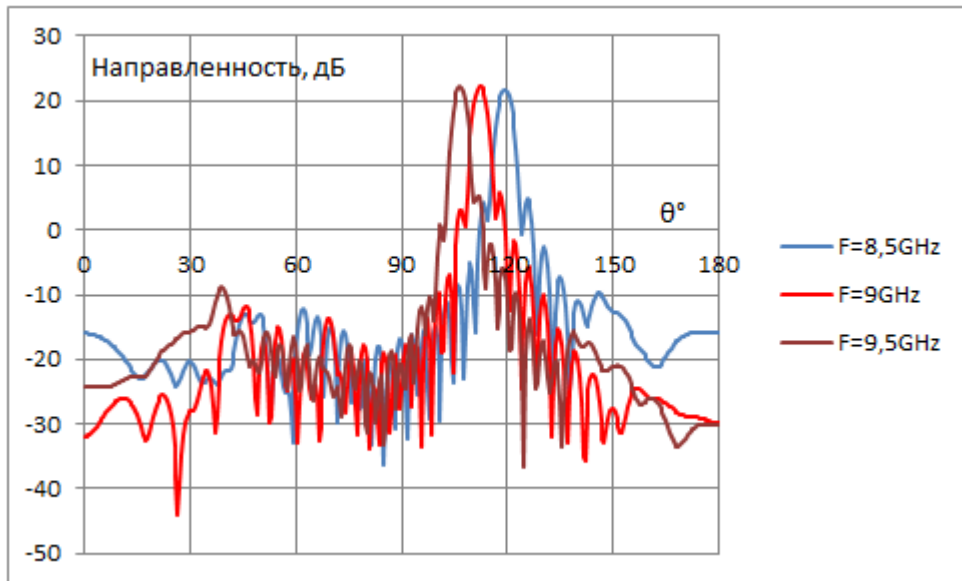


Рис.6. Диаграммы направленности излучения и сканирование луча по частоте

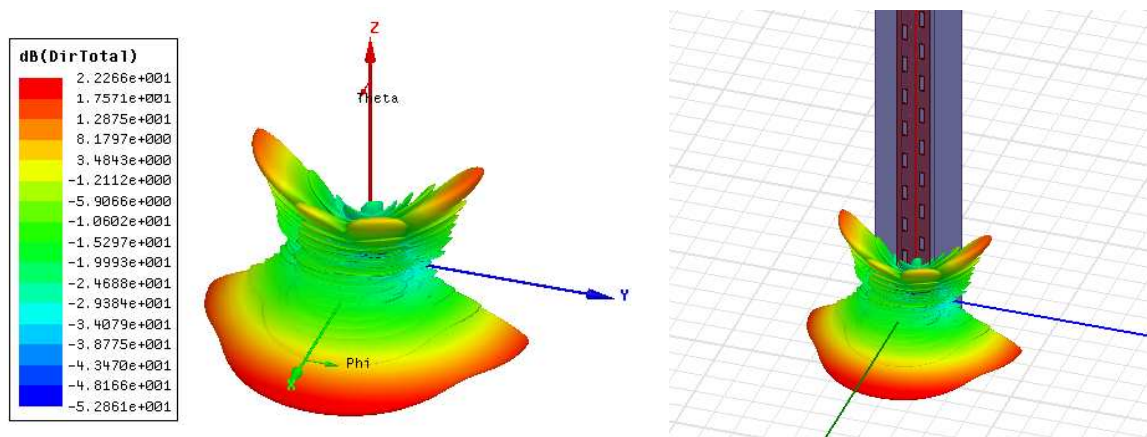


Рис.7. Трехмерная диаграмма направленности антенны на частоте 9 ГГц

С ростом частоты направление излучения антенны приближается к нормали. Как и ожидалось, неравномерное спадающее к краям амплитудное распределение поля вдоль антенны приводит к пониженному уровню боковых

лепестков в диаграмме направленности по сравнению с излучением, создаваемым однородной периодической решеткой.

Заключение

В статье на конкретном примере изложен метод анализа и синтеза антенны вытекающей волны на прямоугольном волноводе с неоднородной решеткой щелей переменной длины в широкой стенке. Рассчитаны действительная и мнимая части постоянной распространения вытекающей моды в периодическом волноводе сравнения с однородной решеткой щелей. Определены зависимости, связывающие параметры распространения волны с параметрами решетки. В частности, показано, что в рассмотренном диапазоне параметров щелей и частот постоянная затухания экспоненциально зависит от длины щелей. На примере синусоидального распределения поля в апертуре определен закон изменения длин щелей, реализующий данное распределение. Построена модель и рассчитаны характеристики антенны с синтезированной решеткой щелей. Показано, что рассчитанное и заданное амплитудные распределения полей вдоль антенны достаточно хорошо согласуются. Показано также, что использование неоднородной решетки щелей в рассмотренном примере позволило снизить уровень боковых лепестков в диаграмме излучения примерно на 4-5 дБ в сравнении с излучением из однородной периодической решетки и улучшить согласование антенны. Продемонстрированный в работе метод синтеза может быть использован при проектировании антенн бегущей волны на металлическом волноводе с решеткой щелей с произвольно заданным распределением амплитуды поля вдоль антенны.

Литература

1. К. Уолтер. Антенны бегущей волны. Пер. с англ. под ред. А. Ф. Чаплина. М.: Энергия, 1970.
2. R. J. Mailloux. Phased array antenna handbook, Artech House, 1994, Norwood, MA.

3. М. Б. Мануилов, В. А. Лерер, Г. П. Синявский. Методы расчета и новые применения волноводно-щелевых антенных решеток. Успехи современной радиоэлектроники, 2007, вып. 5, с. 3-28.
4. F. Xu and K. Wu. Understanding Leaky-Wave Structures. IEEE Microwave Magazine, vol.14, No. 5, July/Aug. 2013, p. 87-96.
5. С. Е. Банков. Антенные решетки с последовательным питанием. М.: Физматлит, 2013.
6. С.Е. Банков, В. И. Калиничев, В.А. Калошин, Е.В. Фролова. Непериодические линейные и планарные антенные решетки вытекающей волны. Докл. 3 Всеросс. Микроволновой конф., 25-27 ноября 2015, М. ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, с. 207-211.
7. E. D. Cullens, et al. Micro-Fabricated 130–180 GHz Frequency Scanning Waveguide Arrays. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 8, 2012, p. 3647-3653.
8. M. Manuilov, V. Lerer, G. Sinyavsky. Fast and Accurate Full-Wave Analysis of Large Slotted Waveguide Array Antennas. Proc. of 37th Eur. Microw. Conf., Oct 2007, p. 360–363.
9. В. И. Калиничев, А. А. Бабаскин. Метод расчета постоянной распространения вытекающей моды в волноводах со щелями. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2015. №7. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul15/2/text.pdf>.