

УДК 621.372.85

Моделирование волноводного полосно-пропускающего фильтра в программном пакете ANSYS HFSS

Широков И. Б., Евдокимов П. А., Широкова Е. И.

*Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053., Российская Федерация
shirokov@ieee.org*

Получено: 30 ноября 2021 г.

Отрецензировано: 28 декабря 2021 г.

Принято к публикации: 28 декабря 2021 г.

Аннотация: *В работе представлены результаты моделирования волноводного настраиваемого полосно-пропускающего фильтра в программном пакете ANSYS HFSS. Описан алгоритм анализа структуры исследуемого объекта методом конечных элементов и рассмотрены программные возможности реализации метода в HFSS. Также было проведено исследование влияния изменения размеров ширины стандартного волновода 23×10 мм на характеристики фильтра.*

Ключевые слова: *полосно-пропускающий фильтр, волновод, микроволновые колебания, метод конечных элементов, параметрический анализ.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Широков И. Б., Евдокимов П. А., Широкова Е. И. Моделирование волноводного полосно-пропускающего фильтра в программном пакете ANSYS HFSS // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2021. Т. 4, № 3. С. 209—217.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Широков, И. Б. Моделирование волноводного полосно-пропускающего фильтра в программном пакете ANSYS HFSS / И. Б. Широков, П. А. Евдокимов, Е. И. Широкова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2021. — Т. 4, № 3. — С. 209—217.

Modeling of a Waveguide Bandpass Filter in the ANSYS HFSS Software Package

I. B. Shirokov, P. A. Evdokimov, and E. I. Shirokova

Sevastopol State University

33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation

shirokov@ieee.org

Received: November 30, 2021

Peer-reviewed: December 28, 2021

Accepted: December 28, 2021

Abstract: *The paper presents the results of modeling a waveguide adjustable bandpass filter in the ANSYS HFSS software package. An algorithm for analyzing the structure of the object under study by the finite element method is described and the software capabilities of implementing the method in HFSS are considered. A study was also carried out on the effect of changing the dimensions of the width of a standard waveguide of 23×10 mm on the filter characteristics.*

Keywords: *band-pass filter, waveguide, microwave oscillations, finite element method, parametric analysis.*

For citation (IEEE): I. B. Shirokov et al. “Modeling of a Waveguide Bandpass Filter in the ANSYS HFSS Software Package,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 3, pp. 209–217, 2021. (In Russ.).

1. Введение

Задача по проектированию полосно-пропускающего фильтра является частью проекта по разработке устройства контроля изменения состава воздушной среды [1—3].

В разрабатываемом устройстве фильтр размещается в блоке ретранслятора и предназначен для увеличения уровня возможного усиления и предотвращения самовозбуждения усилителя за счет неидеальности циркулятора, который также является частью ретранслятора. Использование фильтра позволит увеличить расстояние между микроволновыми блоками устройства, следовательно, увеличить длину измерительной трассы. Рабочая частота измерительной системы около 9,4 ГГц.

На сегодняшний день известно множество конструкций СВЧ-фильтров: на полосковых, микрополосковых и волноводных линиях. Волноводные фильтры также различаются между собой по структуре и могут быть штыревыми, с диафрагмами или комбинированными.

При этом для корректировки работы блока ретранслятора и универсальности применения фильтра в целом необходимо предусмотреть возможность настройки его частотных характеристик.

На основе анализа литературы [4—6] был сделан вывод, что для X -диапазона конфигурацией фильтра с наименьшими потерями будет волноводно-штыревая структура.

2. Метод конечных элементов для анализа структуры фильтра

Волноводный фильтр имеет сложную трехмерную структуру и для его расчета необходимы численные алгоритмы дискретизации дифференциальных уравнений электромагнитного поля [7].

Для численного анализа такой структуры использован метод конечных элементов.

Суть метода конечных элементов заключается в том, что любую непрерывную величину можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области.

В общем случае непрерывная величина заранее не известна и нужно определить значение этой величины в некоторых внутренних точках области. Дискретную модель достаточно легко построить, если предположить, что главные значения этой величины в каждой внутренней точке области известны.

Решение задач электродинамики методом конечных элементов основывается на некотором общем алгоритме [8—9].

Первоначально формулируется основное уравнение, решение которого будет найдено методом конечных элементов, и устанавливаются необходимые граничные условия.

После этого производится деление расчетной области на непересекающиеся подобласти — конечные элементы, вершины которых являются узлами тетраэдральной сетки и предназначены для задания неизвестных компонентов решения. Возможно также разбиение и на другие трехмерные конечные элементы.

Далее выбирается набор базисных функций для описания неизвестной функции в каждом конечном элементе. Как правило, в качестве базисных функций выступают полиномы различного порядка. Например, линейные, квадратичные, кубические и т. д.

Осуществляется переход от функциональных уравнений с бесконечно большим числом неизвестных к СЛАУ конечной размерности с помощью метода Рунца или метода Галёркина.

Полученная система уравнений решается одним из методов численного расчета относительно параметров аппроксимации, что в конечном итоге дает приближенное решение задачи.

Используя решение СЛАУ, определяют параметры проектируемой структуры.

3. Моделирование фильтра в программном пакете ANSYS HFSS

Анализ структуры разрабатываемого фильтра осуществлялся в программном пакете ANSYS HFSS.

В отличие от программы Microwave Office, в которой расчет геометрических размеров и частотной характеристики фильтра возможен только для линий передачи планарного типа, программный пакет ANSYS HFSS позволяет рассчитать параметры трехмерных структур [10].

HFSS использует трехмерный векторный вариант метода конечных элементов в частотной области. Это позволяет определить параметры — S -, Y -, Z -матрицы и визуализировать результаты.

HFSS обладает автоматической технологией построения сетки, которая требует задания геометрии и свойств материала. В качестве элемента используется тетраэдр, что дает возможность довольно точно описать объекты сложной геометрической формы. Сеточная технология позволяет уменьшить затраты машинной памяти и времени вычислений.

Модель разработанного полосно-пропускающего фильтра представлена на рис. 1.

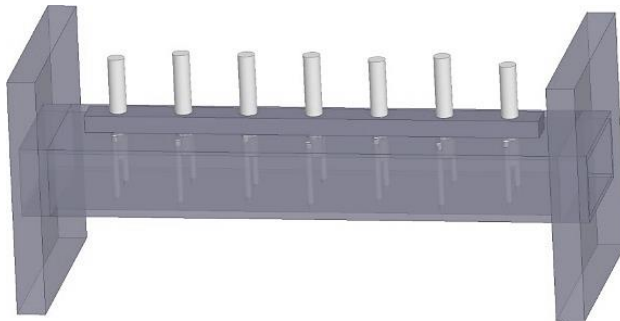


Рис. 1. Модель волноводного полосно-пропускающего фильтра.

Fig. 1. Waveguide bandpass filter model

Фильтр выполнен на отрезке прямоугольного волновода сечением 23×10 мм и длиной 100 мм. Разработанный фильтр является настраиваемым и может работать в частотном диапазоне от 8,5 до 12 ГГц.

В качестве регулируемых элементов для настройки фильтра используются 7 штырей. Они расположены вдоль волновода и выполняют роль емкостной неоднородности.

Также волноводный фильтр имеет внутри 14 припаянных серебряных цилиндрических стержня диаметром 1 мм, которые сопротивление которых носит индуктивный характер. Настройка частотных характеристик фильтра осуществляется за счет изменения длины емкостных штырей в волноводе.

Разбиение модели фильтра на конечные элементы (тетраэдры) представлено на рис. 2.

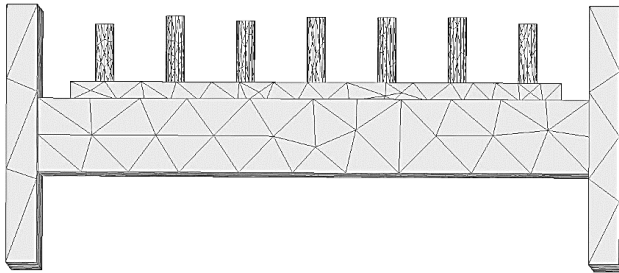


Рис. 2. Модель фильтра разделенная тетраэдральной сеткой.

Fig. 2. Filter model divided by tetrahedral mesh

Функции статистики программного пакета HFSS позволяют оценить необходимое количество конечных элементов для решения задачи. Согласно отчету о решении задачи тетраэдральная сетка модели фильтра состоит из 40271 элемента.

Настройка частотных параметров фильтра для моделирования осуществлялась при помощи встроенного программного модуля ANSYS Optimetrics. Предварительный параметрический анализ позволяет моделировать множество вариантов длины каждого из 7 емкостных штырей в волноводе, используя только одну начальную модель фильтра. После чего при помощи оптимизационных расчетов методом последовательного нелинейного программирования достигается оптимальное значения целевой функции частотных характеристик модели.

Результаты моделирования частотных характеристик модели фильтра представлены на рис. 3.

На рис. 3 по оси абсцисс всех графиков отложена частота в ГГц. Параметр S_{21} в децибелах показан на рис. 3 а. Параметр S_{11} в децибелах показан на рис. 3 б.

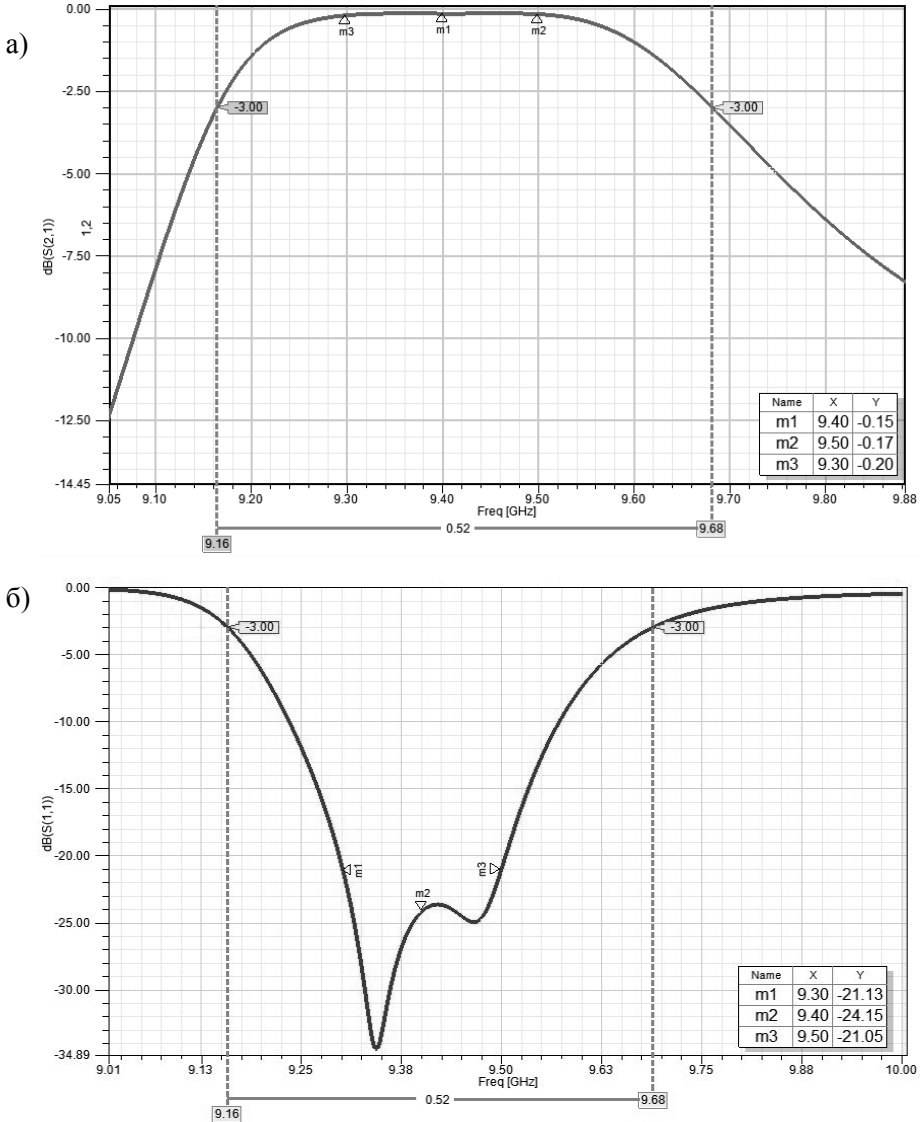


Рис. 3. Результаты моделирования частотных характеристик модели фильтра.

Fig. 3. Results of modeling the frequency characteristics of the filter model

Анализ графиков показывает, что значение параметров S_{21} и S_{11} на центральной частоте 9,4 ГГц соответственно равны: $-0,15$ дБ и $-24,15$ дБ. Полоса пропускания по уровню -3 дБ составляет около 520 МГц.

4. Влияние изменения размеров волновода на характеристики фильтра

При изготовлении СВЧ аппаратуры важным аспектом является точное соблюдение заданных размеров волновода, так как за отклонениями в размерах следует изменение частотных параметров устройства.

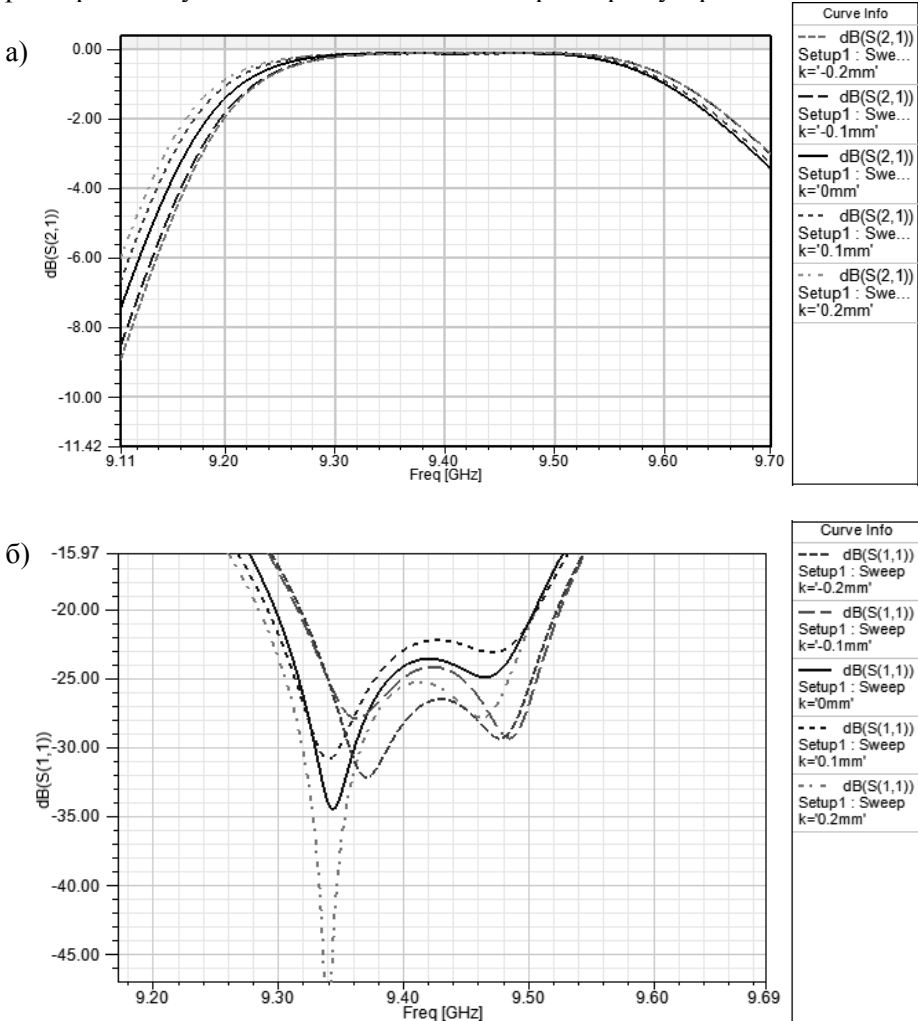


Рис. 4. Результаты моделирования влияния изменения размеров волновода на характеристики фильтра.

Fig. 4. Results of modeling the effect of changing the waveguide size on the filter characteristic

Путем моделирования было установлено влияние изменения размеров волновода на характеристики фильтра.

Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Значения параметров S_{21} , S_{11} и ширины полосы пропускания при различных отклонениях k в размерах стандартного волновода 23×10 мм, полученные в результате моделирования, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты моделирования влияния изменения размеров волновода на характеристики фильтра

Ширина a (мм)	Высота b (мм)	S_{21} (дБ) на частоте 9,4 ГГц	S_{11} (дБ) на частоте 9,4 ГГц	Ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ (МГц)
22,8 ($k = -0,2$)	10	-0,1443	-28,2019	516,1
22,9 ($k = -0,1$)	10	-0,1510	-24,9611	518,8
23 ($k = 0$)	10	-0,1520	-24,1500	515,4
23,1 ($k = 0,1$)	10	-0,1535	-22,9620	532,2
23,2 ($k = 0,2$)	10	-0,1432	-25,5492	534,4

Влияние отклонений в высоте волновода в табл.1 не представлены, так как они оказывают значительно меньшее влияние на характеристику фильтра, чем отклонения ширины [11].

4. Заключение

В работе представлены результаты моделирования волноводного настраиваемого полосно-пропускающего фильтра в программном пакете ANSYS HFSS. Описан алгоритм анализа структуры исследуемого объекта методом конечных элементов и рассмотрены программные возможности реализации метода в HFSS.

Полученная частотная характеристика фильтра является оптимальной для поставленной задачи по разработке устройства контроля изменения состава воздушной среды.

Также было проведено исследование влияния изменения размеров ширины стандартного волновода 23×10 мм на характеристики фильтра.

Стоит отметить, что даже небольшие отклонения ширины волновода от стандартных размеров вносят заметные изменения в характеристики фильтра. Анализируя результаты моделирования, можно сделать вывод, что отклонения в ширине стандартного волновода оказывают более сильное влияние на параметр S_{11} , чем на параметр S_{21} , а также, что независимо от уменьшения или увеличения ширины волновода в указанных пределах, ширина полосы пропускания фильтра только увеличивается.

Так, при увеличении ширины волновода на 0,2 мм ширина пропускания увеличилась на 18,9 МГц, при этом значения параметра S_{21} увеличилось на 0,0088 дБ, а значение параметра S_{11} уменьшилось на 1,399 дБ.

Список литературы

1. Широков И. Б., Евдокимов П. А., Широкова Е. И. Контроль содержания вредоносных газов в воздухе с использованием микроволнового канала связи // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 4. С. 389—398.
2. Широков И. Б., Евдокимов П. А., Широкова Е. И. Система контроля изменения состава воздушной среды // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 1. С. 68—78.
3. Евдокимов П. А., Широкова Е. И., Соколова М. И., Широков И. Б. Экологический контроль атмосферы вблизи транспортных магистралей и промышленных предприятий городов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1–2. С. 392—393.
4. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / Пер с англ. под ред. Л. В. Алексеева и Ф. В. Кушнира. М. : Связь, 1971. Т. 1. 440 с. Т. 2. 496 с.
5. Шаров Г. А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. М. : Горячая линия — Телеком, 2016. 640 с.
6. Морозов А. В., Наумов П. Н., Нырцов А. Н. Устройства сверхвысоких частот и антенны. М. : Радиотехника, 2009. 432 с.
7. Григорьева А. Д. Методы вычислительной электродинамики. М. : Физмаилит, 2012. 432 с.
8. Курушин А. А., Титов А. П. Проектирование СВЧ структур с помощью HFSS. Учебное пособие. М. : МГИЭМ, 2003. 176 с.
9. Банков С. Е., Курушин А. А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР. М. : 2008. 276 с.
10. Банков С. Е., Гутцайт Э. М., Курушин А. А. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS. М. : ООО «Оркада», 2012. 250 с.
11. Методика проектирования волноводных фильтров с параллельными индуктивными связями резонаторов для выходных каскадов мощных СВЧ усилителей / И. М. Аболдуев, А. С. Аверкин, А. М. Зубков [и др.] // Электронная техника. Серия 2 : Полупроводниковые приборы. 2010. № 2 (225). С. 3—7.

Информация об авторах

Широков Игорь Борисович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Евдокимов Павел Алексеевич, студент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Широкова Елена Игоревна, студентка Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Information about the authors

Igor B. Shirokov, Professor of Sevastopol state University, Sevastopol, Russian Federation.

Pavel A. Evdokimov, student of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Elena I. Shirokova, student of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.