

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики

Измерение собственных параметров микрополосковых СВЧ фильтров

АВТОРЕФЕРАТ

ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 423 группы

по направлению подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология
электронных средств»

физического факультета

Сомов Сергей Алексеевич

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

И.А. Накрап

Консультант

к.ф.-м.н., доцент

А.Н. Савин

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

О.Е. Глухова

Саратов 2018

Введение

В настоящее время имеется обширная литература по теории и методам синтеза различных типов фильтров СВЧ. Разработанные методы синтеза многих структур фильтров СВЧ (например, на основе фильтров-прототипов нижних частот, ступенчатых трансформаторов, использования частотного преобразования Ричардса) позволяют синтезировать фильтры с высокой точностью на уровне электрических параметров (волновые сопротивления, электрические длины). Однако при переходе от электрических параметров фильтра к геометрическим параметрам топологии возникают определённые трудности, связанные с недостаточной точностью существующих моделей отрезков линий передач и различных неоднородностей, а также с проблемами учёта дисперсии, влияния корпуса, проводимости материала проводников и т.п., особенно в верхней части СВЧ диапазона. Это приводит к необходимости экспериментальной отработки топологии на макетах фильтров.

С появлением программных продуктов, позволяющих выполнять анализ топологии устройств СВЧ на электродинамическом уровне, ситуация изменилась. Появилась возможность так смоделировать топологию проектируемого фильтра, чтобы экспериментальная характеристика хорошо совпадала с расчётной.

Цель данной работы - изучение методов определения собственных параметров микрополосковых СВЧ фильтров. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Рассмотрение методов и результаты измерений комплексных параметров четырехполюсников и СВЧ устройств.
2. Анализ методов измерений эквивалентных параметров четырехполюсников.
3. Выбор методики определения собственных параметров структурных элементов СВЧ цепей.

В данной работе будет проведен критический анализ некоторых методов расчета данных, после чего данный метод будет проверен на практике для расчета параметров микрополоскового СВЧ фильтра.

Основное содержание работы

1. Методы и результаты измерения комплексных параметров четырехполюсников и СВЧ устройств

Понятие четырёхполюсника используется как удобное обобщение характерных свойств линейных электрических схем. Четырёхполюсником называется электрическое устройство, имеющее две пары зажимов, одна из которых служит для подключения системы к источнику энергии (генератору), а другая – к потребителю энергии (нагрузке). Зажимы четырёхполюсника, к которым присоединён генератор, называют входными, а зажимы, к которым присоединена нагрузка – выходными. Принятые за положительные направления токов и напряжений в четырёхполюснике при прямой передаче (слева – направо) и обратной (справа – налево) показаны соответственно на рис. 1а и рис. 1б.

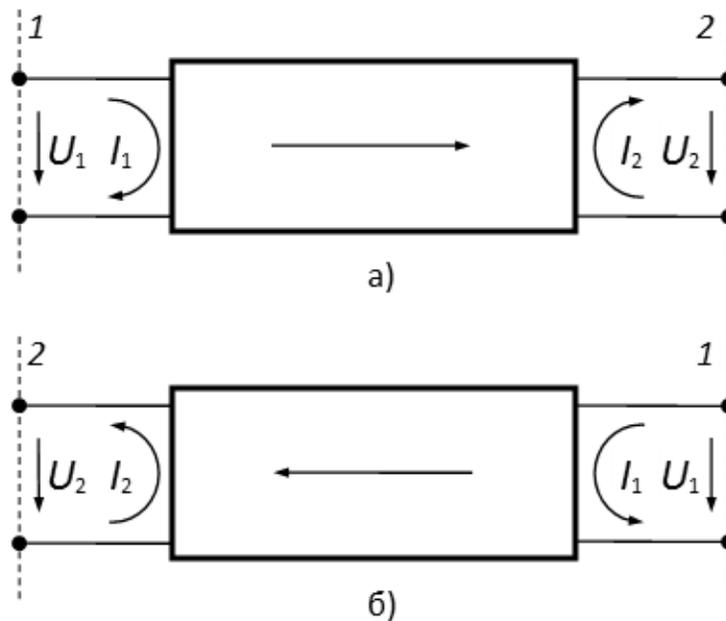


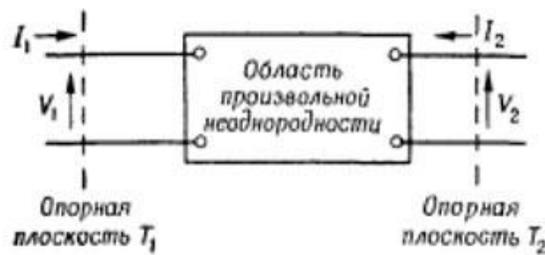
Рис. 1. Положительные направления токов и напряжений в четырёхполюснике при прямой (а) и обратной (б) передачах.

Пассивными называются четырёхполюсники, в которых отсутствуют внутренние независимые источники тока или напряжения, т.е. энергия в них поступает только через входные зажимы.

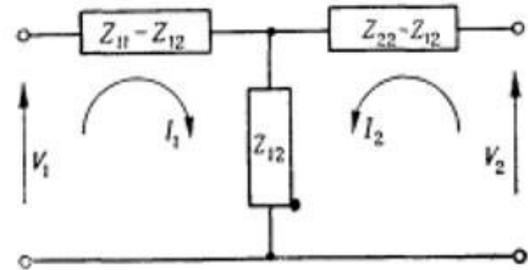
Линейными называются четырёхполюсники, в которых токи и напряжения на зажимах связаны линейной зависимостью.

Далее были приведены основные методы для измерения собственных параметров СВЧ цепей.

Метод эквивалентных схем. Схемы типа Т и П. Поскольку уравнения Максвелла являются линейными и теорема взаимности применима к электромагнитному полю при обычных ограничениях, область неоднородности между двумя произвольно выбранными опорными плоскостями (Фиг. 62) может



Фиг. 62 Соотношения между напряжением и током в произвольном четырехполюснике



Фиг. 63 Т-образная схема представления произвольного четырехполюсника

быть

описана обычными соотношениями напряжений и токов

$$\begin{aligned} V_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2, \\ V_2 &= Z_{12}I_1 + Z_{22}I_2 \end{aligned} \quad (6.1)$$

Эти соотношения содержат постоянные коэффициенты, имеющие размерность полного сопротивления, но не соответствующие непосредственно полному сопротивлению какого-либо частного элемента схемы. Применение законов Кирхгофа к схеме типа Т, изображенной на Фиг. 63, показывает, что для этой схемы справедливы уравнения (6.1).

Метод матричного представления. Постоянные коэффициенты, связывающие падающую и отраженную волны S_{nm} , называются коэффициентами рассеяния. Уравнения рассеяния соответствуют уравнениям полных сопротивлений и представляют другой собой описания характеристик четырехполюсника. Для полного определения этих характеристик достаточно вычислить коэффициенты рассеяния S_{11} , S_{12} и S_{22} . Так как коэффициенты отражения являются комплексными величинами, то и коэффициенты рассеяния имеют подобный же комплексный характер. Их величины не зависят от выбора опорных плоскостей, тогда как фазовые углы изменяются в зависимости от положения опорных плоскостей.

Взаимосвязь между параметрами эквивалентных схем и элементами волновых. Коэффициенты T_{11} , T_{21} , S_{11} , S_{21} определяют свойства четырехполюсника, нагруженного на согласованную линию при прямом направлении передачи.

- Коэффициент T_{11} определяет отношение нормированных напряжений в согласованном режиме и называется коэффициентом передачи.
- Коэффициент T_{21} связывает отраженную волну во входной цепи с падающей волной в выходной цепи (не имеет явного физического смысла).
- Коэффициент $S_{21} = 1/T_{11}$ представляет собой обратную величину коэффициента передачи и называется коэффициентом пропускания.
- Коэффициент S_{11} является коэффициентом отражения во входной линии при согласовании выходной.

При обратном направлении передачи и условии согласования входной линии выясняем смысл остальных коэффициентов волновых матриц.

- S_{22} – коэффициент отражения в выходной линии при согласованной входной.
- S_{12} – коэффициент пропускания с выхода на вход при отсутствии отражения от входа.

Методы определения полного сопротивления и S-параметров, основанные на измерении модулей коэффициента отражения и (или) передачи.

- Метод определения $Z(Y)$, основанный на измерении только модулей коэффициентов отражения K .
- Метод определения $Z(Y)$, основанный на измерении модулей коэффициентов отражения K и передачи T .
- Метод определения S-параметров, основанный на измерении модулей коэффициентов.

2. Методика определения собственных параметров структурных элементов СВЧ цепей по измеренным параметрам их эквивалентных четырехполюсников.

Основным методом, которым мы будем пользоваться, является метод трех точек. Так как четырехполюсник может быть описан тремя независимыми параметрами, то для полного определения четырехполюсника необходимы три взаимно независимых лабораторных измерения. По аналогии с низкочастотной практикой эквивалентная схема четырехполюсника может быть получена путем измерения входного полного сопротивления при нагрузке четырехполюсника

тримя известными полными сопротивлениями. Для простоты это могут быть короткое замыкание, холостой ход и согласованная нагрузка. Если четырехполюсник и опорные плоскости физически симметричны, то имеют места следующие равенства:

$$\begin{aligned} Z'_{11} &= Z'_{22} = Z'_{x, \lambda}, \\ Z'_{12} &= Z'_{x, x} (Z'_{x, x} - Z'_{k, z}). \end{aligned} \quad (6.58)$$

Коэффициенты рассеяния определяются таким же образом. Определение параметров эквивалентной схемы, ровно как и коэффициентов рассеяния по методу трех точек требует минимальной работы в лаборатории. Но погрешность любого измерения вызывает в результате погрешность в расчете всех параметров схемы. Поэтому желательно накапливать экспериментальную информацию в большой мере, чем это необходимо для метода трех точек.

Метод матричного вычисления собственных параметров (характеристического импеданса и постоянной распространения) СВЧ цепи. Унифицированный метод для вычисления комплексной постоянной распространения γ отражающей и неотражающей линий. Метод использует новое матричное представление волновой каскадной матрицы (волновой матрицы передачи), имеющей произвольный характеристический импеданс. Для преодоления проблемы неоднозначности знака, присущей классическому методу, некоторые параметры фиктивной ХАМ матрицы использовались и определялись самим методом. Успех новой процедуры для устранения проблемы неоднозначности знака заключается в новом представлении волновой каскадной матрицы линии, имеющей произвольный характеристический импеданс и надежным критерием для определения параметров am/cm и bm фиктивной ХАМ матрицы.

Практическое применение метода матричного вычисления собственных параметров СВЧ цепи. На основе проведенного анализа было решено проверить на практике унифицированный метод. Были проведены измерения микрополосковых линий на диэлектрической подложке с помощью FR4 (диэлектрическая проницаемость $\epsilon=4,6$, $tg\Delta=0,023$ для частоты (1МГц)). Была использована программа Microsoft Excel, так как она позволяет проводить расчеты комплексных значений переменных.

| K | L | M | N | O | P | Q | R |
|---|---------------------------------------|---|---|---|---|------------------|---|
| | Y | | | | | ϵ_{eff} | |
| | -1,61530635765258-0,469857199149934i | | | | | 5,031E+14 | |
| | -1,34613714743274+0,531737691801302i | | | | | 6,443E+14 | |
| | -1,25165678541963+0,330606909454688i | | | | | 2,491E+14 | |
| | -1,3395769681369+0,157828061639519i | | | | | 5,677E+15 | |
| | -1,31662169143835+0,588092001161808i | | | | | 7,882E+14 | |
| | -1,07825186394694+0,43352931739307i | | | | | 4,283E+14 | |
| | -1,03508588577458+0,275331427379196i | | | | | 1,728E+12 | |
| | -1,16509740263+0,128924036777734i | | | | | 3,788E+13 | |
| | -1,20615353171187+0,54510960135907i | | | | | 6,772E+14 | |
| | -1,00288543647927+0,408231656440276i | | | | | 3,798E+14 | |
| | -1,00259118455371+0,257298382140942i | | | | | 4,853E+14 | |
| | -1,18308586171056+0,12135199251719i | | | | | 3,293E+14 | |
| | -1,30047465897904+0,515790710309706i | | | | | 2,039E+14 | |
| | -1,25955721540101+0,390163635619684i | | | | | 1,098E+14 | |
| | -1,33980260047108-0,384643521258468i | | | | | 5,349E+14 | |
| | -1,20298752350986-0,511978373158608i | | | | | 6,596E+14 | |
| | -1,10365706013967-0,137745824129019i | | | | | 1,806E+15 | |
| | -0,823441273268226-0,256228321895062i | | | | | 4,084E+13 | |
| | -0,74605461015213-0,399257535584184i | | | | | 9,853E+13 | |
| | -0,85189649651154-0,515197140042166i | | | | | 1,858E+14 | |

Выше были приведены расчеты γ , λ , ϵ_{eff} для микрополосков $L=5\text{cm}$ и $L=10\text{cm}$.

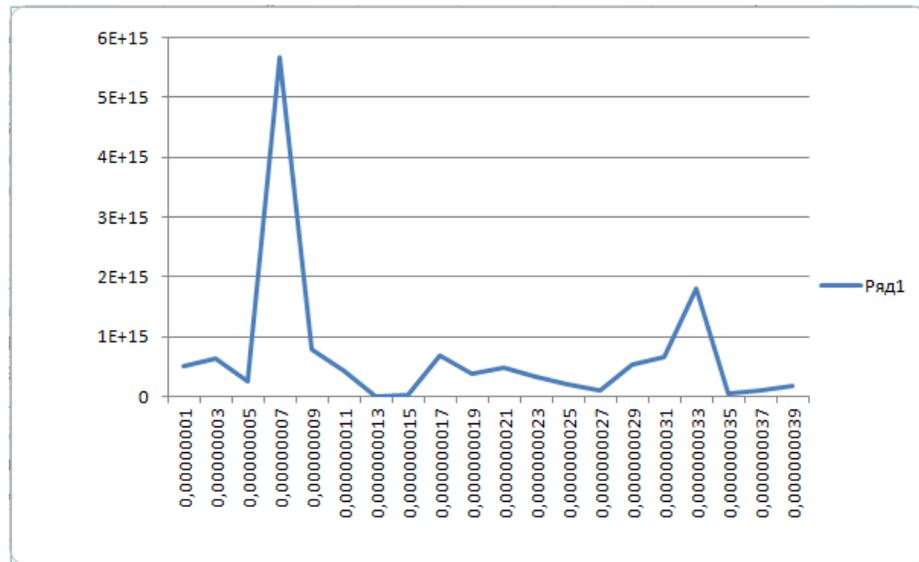


График зависимости ϵ_{eff} от частоты (Гц)

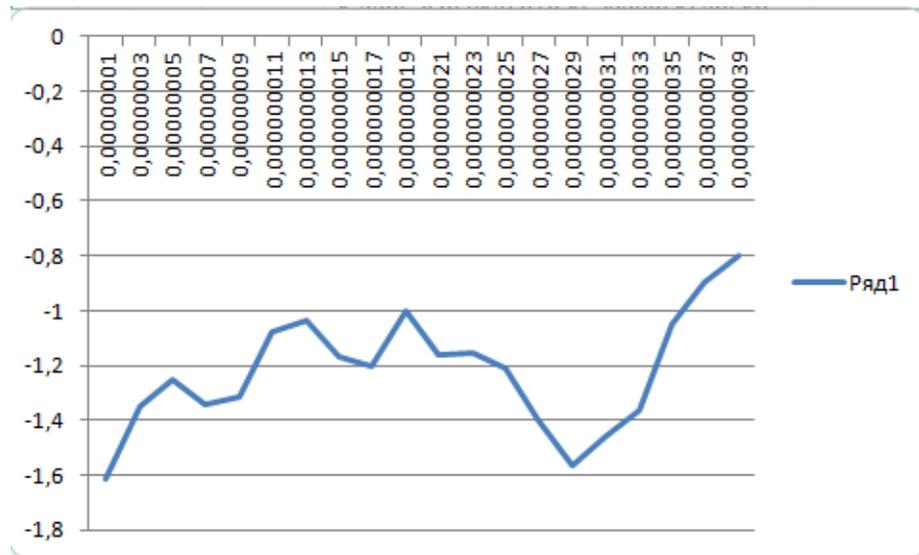


График зависимости α от частоты (Гц)

По полученным данным можно сказать, что данным методом можно пользоваться для получения эффективной диэлектрической проницаемости.

Заключение

- В ходе данной работы были рассмотрены методы и результаты измерений комплексных параметров четырехполюсников и СВЧ устройств.
- Был проведен анализ методов измерений эквивалентных параметров четырехполюсников.
- По итогам анализа выбрана методика определения собственных параметров структурных элементов СВЧ цепей.
- По данной методике был произведен расчет параметров реального СВЧ устройства (микрополоскового фильтра).
- Было произведено сравнение результатов полученных с помощью измерений с результатами, полученных по данной методике.
- По итогам работы было решено, что с помощью данной методики определения собственных параметров структурных элементов СВЧ цепей можно точно рассчитать эквивалентные параметры четырехполюсника.

Список литературы

- Фельдштейн Э.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполюсников и восьмиполусников на СВЧ. М.: Связь. 1971.
- Накрап И.А., Савин А.Н. Исследование характеристик волноводных четырехполюсников. Часть 1. Теоретические основы: Учебное пособие. Саратов: ООО Издательский центр «Наука». 2013. – 64 с.
- Гинзтон Э.Л. Измерение на сантиметровых волнах. М.: Ин. лит. 1960. - 400 с.
- Н.В. Абакумова, В.А. Пчелин, В.А. Мальцев и др. Общий подход к измерению комплексных параметров двухполюсников и четырехполюсников на СВЧ. Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника, вып. 2(490), 2007, С.17
- Балыко И.А., Левашов С.В., Сазонов М.С., Филиппов А.В.. Измерение комплексных параметров двухполюсников и четырехполюсников на СВЧ. Материалы Международной н.-т. конф. 2015. С.137-139.
- Чижов А.И. Определение элементов матрицы рассеяния и условий согласования несимметричных сверхвысокочастотных четырехполюсников. РЭ. 2008. – Т. 53. - №5. - С.580-583.
- Накрап И.А., Савин А.Н., Шараевский Ю.П. Трансформация матрицы рассеяния меандровой линии передачи с ферритовой пленкой при наложении внешнего магнитного поля. Вопросы прикладной физики: Межвузовский научный сборник. Саратов: Изд. Сарат. ун-та. 1998. - Вып. 4. - С. 89-91.
- J. A. Reynoso-Hernández. Unified Method for Determining the Complex Propagation Constant of Reflecting and Nonreflecting Transmission. IEEE Microwave and Wireless Components Lett., vol. 13, no. 8, 2003. P.351-353.