

Проблемы экстракции параметров полосковых линий

А.Г. Лоцилов, Г.А. Малютин, Т.Т. Чинь

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

lag@main.tusur.ru; mr.mageorge@yandex.ru; thanhvodoi1995@gmail.com

Аннотация — Проводится обсуждение проблем экстракции параметров полосковых структур, связанных с решением комплекса задач использования экспериментальных данных, математических моделей и средств измерения. Рассматриваются алгоритмы восстановления параметров одиночных и связанных полосковых линий на основе экспериментальных данных. Приведены примеры экстракции первичных параметров, фазовых скоростей распространяющихся волн и эффективных диэлектрических проницаемостей. Наряду с использованием данных в частотной области, берутся экспериментальные характеристики отклика на импульсное воздействие. Ставится вопрос о создании приборов для эффективного решения задач экстракции параметров.

Ключевые слова — экстракция параметров, полосковые линии передачи, связанные полосковые линии, первичные параметры, фазовые скорости синфазных и противофазных волн, алгоритмы экстракции

I. ВВЕДЕНИЕ

Задача экстракции параметров полосковых структур в микроэлектронике возникает достаточно часто по многим причинам, например, ввиду недостаточности данных о свойствах используемых материалов, сложности расчетов конкретных конструкций, наличия квази-сосредоточенных элементов в полосковых схемах и т.п. [1–3]. Полосковые структуры отличаются высокими функциональными и технологическими показателями и применяются в печатных платах, в гибридных и интегральных микросхемах, для изготовления антенн и других устройств СВЧ диапазонов [4–6]. Сложность решения задач анализа и, тем более, синтеза полосковых элементов и устройств побуждает создавать компактные модели для систем с распределенными параметрами, каковыми являются полосковые узлы [7]. Полосковые узлы СВЧ, как правило, анализируются для обеспечения заданных частотных характеристик, поэтому в их отношении проводится измерение матриц рассеяния S [8]. Проектирование элементов вычислительной базируется на использовании преимущественно импульсных сигналов, поэтому важен вопрос о целостности сигналов [9]. При работе высокоскоростных устройств может быть полезен сравнительный анализ теорем отсчетов во временной и частотной областях [10]. Полосковые элементы, устройства могут исполняться в виде достаточно

сложных конструкций, поэтому расчет их электродинамических характеристик может представлять сложность. Отсюда строятся упрощенные модели полосковых линий для проведения анализа сложных схем с включением этих моделей [11]. Поэтому остаются актуальными экспериментальные исследования полосковых линий как в частотной, так и во временной областях, которые дают возможность проводить восстановление, или иначе – экстрагирование недостающих параметров.

В настоящей работе проводится обсуждение некоторых проблем экстракции параметров полосковых структур, связанных с решением комплекса задач использования экспериментальных данных, математических моделей и средств измерения. В качестве объекта рассматриваются одиночные и связанные полосковые линии. Приведены примеры восстановления первичных параметров, фазовых скоростей распространяющихся волн и эффективных диэлектрических проницаемостей. Обсуждается потребность в создании приборов для эффективного решения задач экстракции параметров, что будет способствовать ускорению процесса разработки новых изделий.

II. ЭКСТРАКЦИЯ ПЕРВИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОДИНОЧНЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ

Наиболее простой алгоритм экстракции первичных параметров разработан в отношении одиночных полосковых линий. В основе алгоритма экстракции лежит модель, построенная на решении телеграфных уравнений [12]. Исходными данными для отыскания первичных параметров берутся экспериментальные зависимости коэффициентов матрицы рассеяния S . Тестирование алгоритма вычисления первичных параметров проведено на примере копланарной полосковой линии (КПЛ), базовая конструкция которой показана на рис. 1.

Отрезок КПЛ имел следующие поперечные размеры: $w_1 = 2,4$ мм; $w_2 = 12,8$ мм; $d = 1$ мм; $h_1 = 1,5$ мм; длина отрезка $l = 112$ мм; относительная диэлектрическая проницаемость подложки предположительно $\epsilon_{r1} = 4,5$. Рассматривалась также конструкция КПЛ с размещенным на верхней поверхности объемным кристаллом ниобата лития (рис. 2).

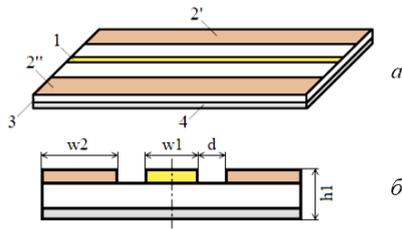


Рис. 1. Конструкция копланарной полосковой линии (а): 1 – токонесущая полоска; 2', 2'' – боковые планарные экраны; 3 – подложка; 4 – нижняя экранирующая плоскость; (б) поперечное сечение

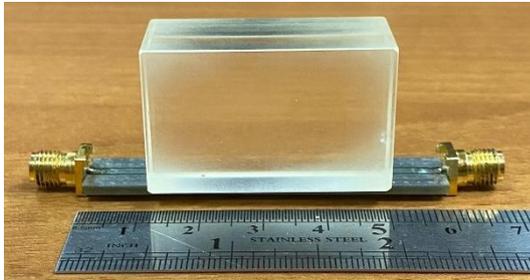


Рис. 2. Конструкция модуля на основе копланарной полосковой линии с размещенным на ней кристаллом ниобата лития

В процессе измерений параметров КПЛ (рис. 1) на векторном анализаторе цепей P4226 производства АО «НПФ «Микран» была получена матрица рассеяния S , коэффициенты которой являются функциями частоты. Определение матрицы S проводилось при равных нагрузках на входе Z_{H1} и выходе Z_{H2} , причем $Z_{H1} = Z_{H2} = 50 \text{ Ом}$. Графики зависимости модулей коэффициента отражения $|S_{11}(f)|$, коэффициента передачи $|S_{21}(f)|$ и фазовых сдвигов $\arg[S_{11}(f)]$, $\arg[S_{21}(f)]$ показаны на рис. 3, 4. Последовательность решения задачи экстракции погонных параметров КПЛ следующая [13].

- 1) Получение экспериментальным путем матрицы рассеяния S с переходом к классической матрице передачи \hat{a} [14].
- 2) Далее, используя выражение для матрицы a в виде (1), получаемым в результате решения телеграфных уравнений, считая, что $a = \hat{a}$, получаем формулу (2) для определения коэффициента распространения γ и формулу (3) для расчета характеристического сопротивления Z_0 .

$$a = \begin{bmatrix} \text{ch}(\gamma l) & Z_0 \text{sh}(\gamma l) \\ Z_0^{-1} \text{sh}(\gamma l) & \text{ch}(\gamma l) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\gamma = \text{arccosh}(\hat{a}_{11}) \cdot l^{-1}, \quad (2)$$

$$Z_0 = \hat{a}_{12} \cdot \frac{1}{\sinh(\gamma \cdot l)}. \quad (3)$$

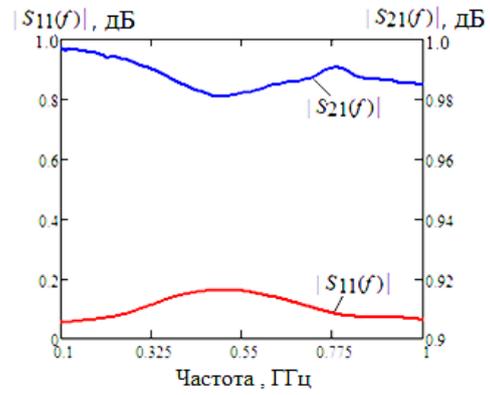


Рис. 3. Экспериментальная частотная зависимость модулей коэффициентов матрицы рассеяния S

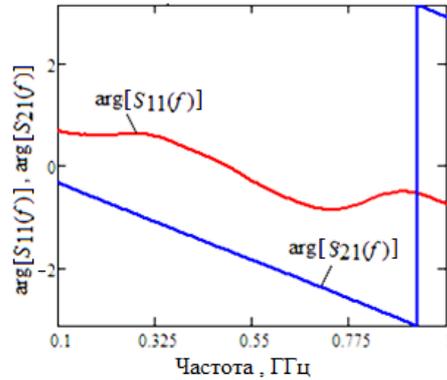


Рис. 4. Экспериментальная частотная зависимость фазы коэффициентов матрицы рассеяния S

Анализируя эквивалентную конечно-разностную схему отрезка линии передачи с Т-волной, составляем систему уравнений

$$\begin{cases} \gamma = \sqrt{ZL \cdot YC} \\ Z_0 = \sqrt{\frac{ZL}{YC}} \end{cases}, \quad (4)$$

из которой определяется комплексная проводимость YC и комплексное сопротивление ZL , выражения (5), (6)

$$YC = \frac{\gamma}{Z_0} \quad (5)$$

$$ZL = \gamma \cdot Z_0 \quad (6)$$

3) Из найденной комплексной проводимости (5) определяется погонная емкость $C_0 = \text{Im}(YC)$ и погонная проводимость КПЛ $G_0 = \text{Re}(YC)$.

4) Найденное комплексное сопротивление позволяет определить погонную индуктивность $L_0 = \text{Im}(ZL)$ и погонное сопротивление $R_0 = \text{Re}(ZL)$.

По приведенным аналитическим выражениям проведен расчет погонной емкости C_0 и погонной

индуктивности L_0 в широком диапазоне частот. Результаты отражены на рис. 5, 6.

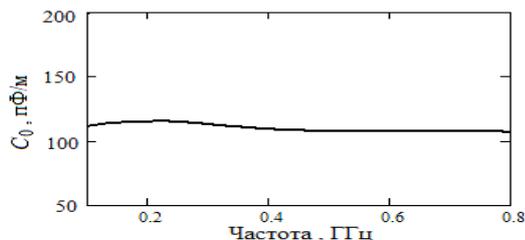


Рис. 5. Частотная зависимость погонной емкости КПЛ, рассчитанная по экспериментальным данным о матрице рассеяния S

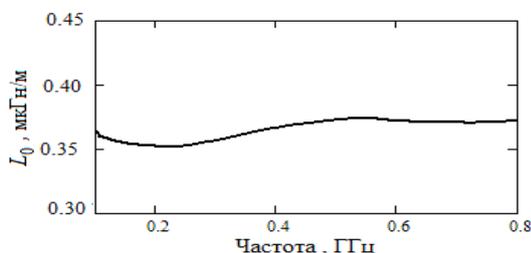


Рис. 6. Частотная зависимость погонной индуктивности КПЛ, рассчитанная по экспериментальным данным о матрице рассеяния S

Анализ графиков C_0 и L_0 показывает существенную зависимость погонных параметров от частоты. Можно выделить несколько причин, влияющих на этот результат. Первое, переход от экспериментально полученной матрицы передачи \hat{a} к ее модели (1) основывается на предположении их полной идентичности. Но это не так, потому что частотные характеристики зависят от всех неоднородностей как по длине отрезка КПЛ, так и на входе и выходе, особенно на коаксиально-полосковых переходах. Второе, сами первичные параметры определяются в предположении распространения поперечной волны и независимости параметров материала подложки от частоты. Полученные зависимости C_0 и L_0 от частоты, безусловно, отражают такую зависимость. Вопрос лишь в том, насколько эта составляющая маскируется влиянием неоднородностей. Третье, существует аппаратная погрешность измерения S-параметров с помощью векторного анализатора цепей. Тем не менее, полученные результаты позволяют сформулировать вывод о применимости предложенного подхода для оценки первичных параметров полосковых линий передачи.

Представленный алгоритм решения задачи восстановления первичных параметров КПЛ показывает значительное расхождение значений C_0 и L_0 по отношению к значениям, полученным методом конформных отображений. Моделирование позволило установить, что причина этого – наличие существенного отражения из-за неоднородностей на входе и выходе макета КПЛ, особенно на коаксиально-полосковых переходах.

Снижение влияния погрешностей, возникающих на входе и выходе измеряемого отрезка полосковой линии, было достигнуто путем анализа рефлектограммы. Был применен метод исключения участков рефлектограммы, которые соответствуют коаксиально-полосковым переходам и нагрузке. На рис. 7 показана рефлектограмма отрезка КПЛ, нагруженного на сопротивление 50 Ом при воздействии импульса пикосекундной длительности. Анализ рефлектограммы показывает, что основной вклад в коэффициент отражения вносят коаксиально-полосковые переходы и нагрузка. Модуль коэффициента отражения регулярной части КПЛ определяется путем переноса плоскости отсчета и, как следует из анализа рефлектограммы, коэффициент отражения уменьшился от значения 0,16 в 6 раз.

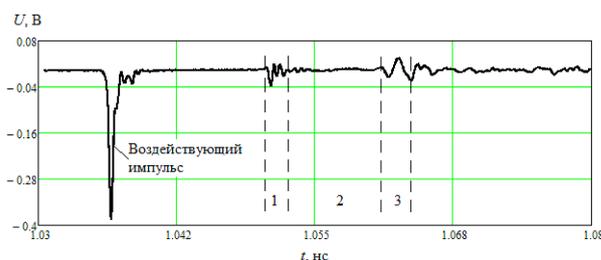


Рис. 7. Рефлектограмма отрезка КПЛ: 1 – участок отражения от входного коаксиально-полоскового перехода; 2 – участок регулярной части КПЛ; 3 – участок отражения от выходного коаксиально-полоскового перехода и нагрузки

На этом основании проведен уточняющий численный эксперимент по определению погонных параметров. На рис. 8 и 9 показаны результаты расчета погонных параметров после применения уточнения на основе анализа рефлектограммы, а также приведены значения погонных параметров, полученные методом конформных отображений.

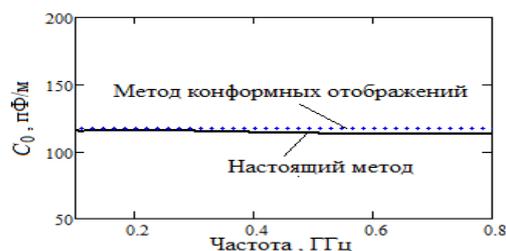


Рис. 8. Частотная зависимость погонной емкости КПЛ



Рис. 9. Частотная зависимость погонной индуктивности КПЛ

Рисунки показывают незначительную зависимость погонной емкости C_0 и погонной индуктивности L_0 от частоты. Отклонение C_0 и L_0 от значений, рассчитанных методом конформных отображений, составляет в среднем для емкости 2,9%, а для индуктивности 2,5%.

На основе описанного выше алгоритма были разработаны две программы в среде математического моделирования MathCAD и на языке программирования C++.

Был проведен эксперимент по экстракции параметров КПЛ с размещенным кристаллом ниобата лития (см. рис. 2). Результаты измерения показаны на рис. 10 в виде частотных зависимостей модуля и фазы коэффициентов матрицы рассеяния $|S_{21}(f)|$ и $\arg(S_{21}(f))$. Синим цветом показаны зависимости $|S_{21}(f)|$ и $\arg(S_{21}(f))$ для линии без кристалла, а красным графики $|S_{21}(f)|$ и $\arg(S_{21}(f))$ для КПЛ с установленным кристаллом LiNbO₃.

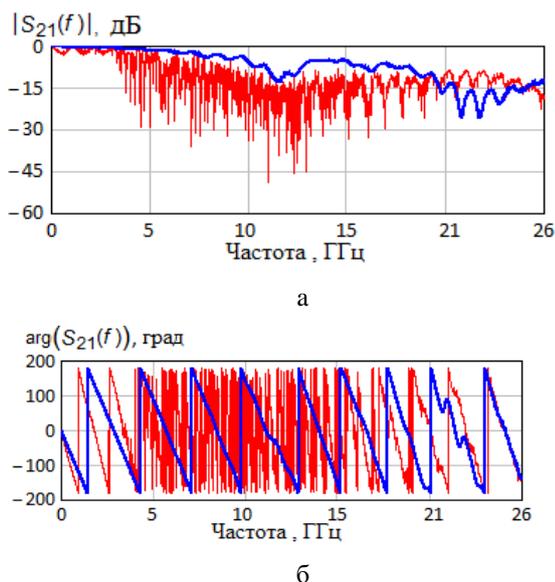


Рис. 10. Частотные характеристики $|S_{21}(f)|$ (а) и $\arg(S_{21}(f))$ (б), полученные для КПЛ с кристаллом ниобата лития

Необычный вид частотных характеристик существенно затруднил экстракцию параметров полосковой структуры, прежде всего кристалла ниобата лития. Тем не менее была решена задача экстракции частотной зависимости эффективной диэлектрической проницаемости кристалла. Для этого осуществлены следующие действия.

Получена частотная зависимость $\arg(S_{21}(f))$ в виде развернутой фазы (рис. 11).

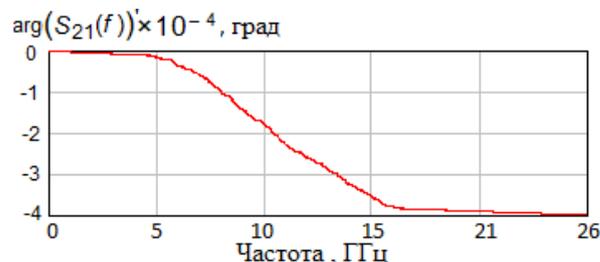


Рис. 11. Частотная зависимость развернутой фазы для КПЛ с кристаллом

Анализ $\arg(S_{21}(f))'$ показал, что алгоритм определения развернутой фазы, заложенный в основу опции векторных анализаторов цепей, учитывает все переходы через ноль $\arg(S_{21}(f))'$ в пределах периодов. При измерениях параметров отклика модуля на импульсное воздействие было выяснено, что зависимость $\arg(S_{21}(f))'$ (рис. 11) не отвечает реальным физическим процессам в устройстве. Поэтому данные, отраженные на графике рис. 11, были обработаны путем исключения «ложных» переходов от $-\pi$ к π через ноль графика функции $\arg(S_{21}(f))'$ при котором к фазе добавляется -2π . Введено понятие порога релаксации, под которым понимается интервал по частоте от последнего примененного добавления -2π на частоте f_{down} до какого-то следующего i -того значения по частоте $f_{\text{relax}} = f_{\text{down}} + \text{relax}$. Значение relax является константным, определяемым в результате численного эксперимента. Добавка -2π выполняется если $f_i \geq f_{\text{relax}}$. Таким образом, модифицированный алгоритм для определения частотной зависимости группового времени запаздывания τ_{gd} в широком диапазоне частот не учитывает возникающие в кристалле резонансы, приводящие формально к выбросам τ_{gd} , но несущественно влияющие на передачу энергии по волноведущей полосковой структуре. Это позволило получить частотную зависимость полного фазового сдвига, не противоречащую физическому смыслу работы устройства. Разработанная процедура получила название «установление порога релаксации». В результате получен график полной фазы $\arg(S_{21}(f))''$ (рис. 12), что позволило перейти к вычислениям группового времени запаздывания τ_{gd} по формуле (7), а затем определить эффективную диэлектрическую проницаемость по методике, изложенной в [13].

$$\tau_{\text{gd}} = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial [\arg(S_{21}(f))'']}{\partial f}. \quad (7)$$

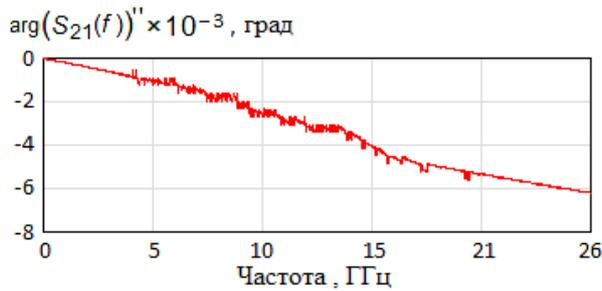


Рис. 12. Частотная зависимость развернутой фазы для модуля на КПЛ, подвергнутой обработке

III. ЭКСТРАКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЯЗАННЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ

В отличие от выше рассмотренной задачи, в отношении связанных полосковых линий (СПЛ) получение аналитических решений восстановления даже части параметров весьма затруднено. Далее мы рассмотрим решение частной задачи определения отношения фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных линиях. Этот параметр, как показано в ряде работ [15, 16], имеет большое значение в формировании частотных характеристик разных устройств СВЧ диапазона, например, фильтров, направленных ответвителей, делителей и др.

Рассмотрим схему секции, показанную на рис. 13.

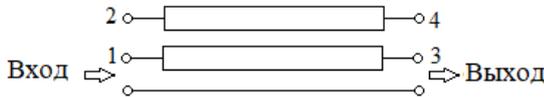


Рис. 13. Схема секции на связанных полосковых линиях, одна из полосок которой под «плавающим» потенциалом

Одна полоска в секции находится под «плавающим» потенциалом. Если фазовые скорости синфазных v_c и противофазных волн v_π одинаковые, секция имеет всепропускающие свойства. В противном случае секция теряет это свойство. Фазовые скорости определяются эффективной диэлектрической проницаемостью ϵ_{eff} полосковой структуры [15]. Для синфазной волны $v_c = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{effc}}}$, для противофазной $v_\pi = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff\pi}}}$, где c – скорость света, ϵ_{effc} , $\epsilon_{eff\pi}$ – относительные эффективные диэлектрические проницаемости синфазной и противофазной мод.

Была поставлена в качестве основной задача экстракции отношения фазовых скоростей v_c/v_π на основе экспериментальных данных о частотной зависимости коэффициентов матрицы рассеяния S . Было изготовлено несколько макетов секций, внешний вид которых показан на рис. 14. Поперечное сечение секций связанных полосковых линий, использованных при моделировании и в процессе эксперимента, показано на рис. 15.

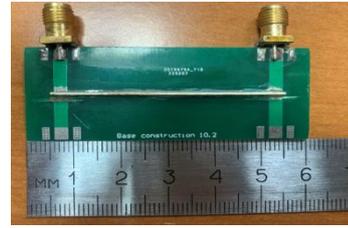


Рис. 14. Макет секция на связанных полосковых линиях

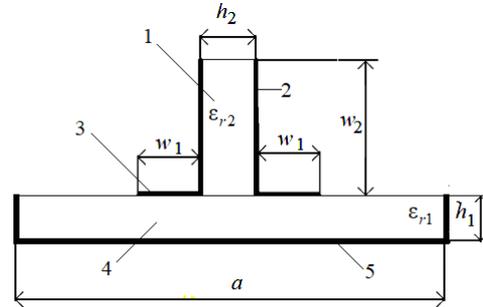


Рис. 15. Поперечное сечение связанных полосковых линий

В качестве базовой взята конструкция секции СПЛ со следующими физико-геометрическими параметрами: $w_1=0,7$; $w_2=2$; $h_1=1,6$; $h_2=0,635$; $a=24$; длина отрезка линий $l=48$ (размеры в мм); $\epsilon_{r1}=4,5$. Вертикальная подложка выполнена из материалов с ϵ_{r2} , указанными в табл. 1.

Таблица 1

Материалы вертикальной подложки

Макет	Материал вертикальные подложки	h_2 , мм	ϵ_{r2}
1	RO-3003	0,635	3,0
2	RO-4003C	0,813	3,38
3	RO-4360G2	0,61	6,15
4	RO-60110LM	0,64	10,2

Проведены измерения коэффициентов матриц рассеяния всех образцов в диапазоне частот до 8 ГГц. Экспериментально получены зависимости коэффициентов передачи $S_{31}(f)$, в которых обнаруживается несколько периодически повторяющихся резонансов на частотах f_{ri} . Существование f_{ri} объясняется неравенством фазовых скоростей синфазной и противофазной волн. Была поставлена задача определения отношения v_c/v_π и значений эффективных диэлектрических проницаемостей ϵ_{effc} , $\epsilon_{eff\pi}$. Предложен и реализован следующий алгоритм.

1) Задаются геометрические размеры и относительные диэлектрические проницаемости подложек. Затем проводится расчет первичных параметров СПЛ методом сеток [17] и расчет частотных характеристик с определением f_{ri} .

2) Измеряются частотные характеристики $|S_{31}(f)|$ и $\varphi = \arg(S_{31}(f))$, определяются экспериментальные значения резонансных частот f_{riexp} .

3) Задается функция цели при поиске решения задачи определения первичных параметров, при которых выполняется условие (8)

$$\min(|f_{riexp} - f_{ri}| \cdot f_{riexp}^{-1}) \leq \delta. \quad (8)$$

4) Проводится оптимизационный процесс совмещения каждого экспериментально полученного значения f_{riexp} и расчетного значения f_{ri} , затем определяются v_c/v_π , v_c , v_π , ϵ_{effc} , $\epsilon_{eff\pi}$.

На рис. 16 показана экспериментальная частотная зависимость модуля коэффициента передачи $|S_{31}(f)|$ секции (красный цвет), в которой в качестве вертикально расположенной подложки использован материал RO-4360G2 с номинальной проницаемостью $\epsilon_{r2}=6,15$. Там же показана частотная зависимость $|S_{31}(f)|$ (синий цвет) для рассчитанной методом сеток системы первичных параметров. Черным цветом показан график $|S_{31}(f)|$, полученный в результате вариации первичных параметров исходя из условия $\min(|f_{riexp} - f_{ri}| \cdot f_{riexp}^{-1}) \leq 0.001$ на частоте самого высокочастотного резонанса.

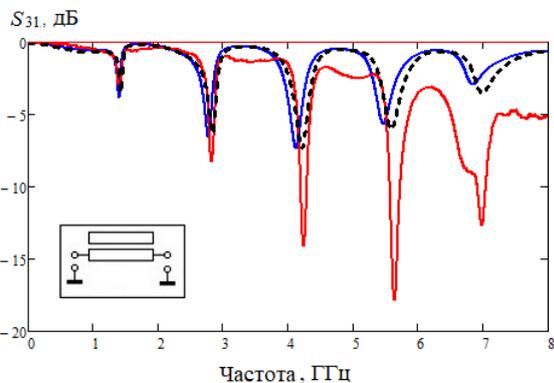


Рис. 16. Расчетные и экспериментальные частотные зависимости коэффициента передачи секции при $\epsilon_{r2} = 6.15$

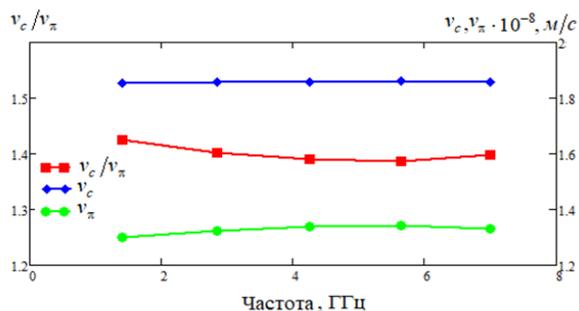


Рис. 17. Экстрагированные параметры секции

Расхождение амплитуд рассчитанных и экспериментальных зависимостей представляет определенную проблему, решение которой зависит от

параметров, определяющих потери в проводниках и подложках. Результаты экстракции вторичных параметров секции СПЛ по предложенному алгоритму показаны на рис. 17. Получены также матрицы погонных емкостей и индуктивностей. Их изменение в процессе вариации по условию $\min(|f_{riexp} - f_{ri}| \cdot f_{riexp}^{-1}) \leq 0.001$ составило до 5% относительно рассчитанных методом сеток. Проведенная экстракция параметров СПЛ на основе экспериментальных данных позволяет увеличить точность расчетов устройств на основе исследованной конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные примеры экстракции параметров полосковых структур показывают целесообразность такого пути получения недостающих данных для успешного проектирования устройств. Это справедливо, с одной стороны, по причине резкого сокращения времени для получения необходимой информации при наличии разработанных методик и измерительной аппаратуры; с другой стороны, получение экспериментальных данных, так или иначе, более надежный способ проверки достижения заданных условий технического задания. Еще один вывод на основе проведенных нами работ показывает необходимость параллельного или одновременного проведения исследований в частотной и временной областях, так как это позволяет избежать неопределенностей, связанных с условной применимостью методов анализа или большим объемом вычислений непосредственно в процессорах измерительной техники. Широко распространенная практика создания виртуальных опций требует дополнительных измерений для верификации получаемых данных. Был приведен пример с развернутой фазой, который показал наличие определенной проблемы и путь ее преодоления.

Наличие отечественных разработок измерительной техники, например, векторных анализаторов цепей (ВАЦ), позволяет решить многие задачи экстракции параметров разных устройств, в том числе полосковых структур. Для этого потребуется создание методов решения актуальных задач и дополнительного аппаратного обеспечения. С учетом высокого достигнутого уровня в создании ВАЦ [18–20] следует ожидать прогресс в обсуждаемой теме.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Малютину Н.Д. за полезное обсуждение при подготовке рукописи и методическую помощь в подготовке материалов.

ПОДДЕРЖКА

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ проект № FEWM-2020-0039. Измерения проведены на оборудовании ЦКП «Импульс».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Evseev V. Measurement of Intrinsic Parameters of Electronic Components in Strip-Line Transmission Line by Analyzer P4226 / V. Evseev, G. Kun, E. Lupanova [et al.] // Proceedings - 2020 7th All-Russian Microwave Conference, RMC 2020 : 7, Moscow, 2020. – P. 279-281.
- [2] Beyene, W. T. An Accurate Transient Analysis of High-Speed Package Interconnects Using Convolution Technique / W. T. Beyene, Ch. Yuan // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. – 2003. – Vol. 35. – No 2-3. – P. 107-120.
- [3] Jianmin Zhang, Koledintseva M.Y., Drowniak J.L., Antonini G., Orlandi A. Extracting R, L, G, C parameters of dispersive planar transmission lines from measured S-parameters using a genetic algorithm // 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (IEEE). – P. 572–576.
- [4] Добуш И.М. Экстракция параметров эквивалентных схем пассивных компонентов свч мис в копланарном тракте. Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2011. № 1. С. 57-62.
- [5] Темнов А.М. Гибридно-монокристалльные интегральные схемы СВЧ. Дисс. на соиск. ученой степени доктора технических наук, 2020. 303 с.
- [6] Торхов Н.А. Экстракция параметров линейной модели кристалла диода шоттки ТГц-диапазона / Н. А. Торхов, Л. И. Бабак, А. А. Коколов, И. И. Петров // Мокеровские чтения : 9-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. Сборник трудов, Москва, 23 мая 2018 года. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2018. – С. 126-127.
- [7] Гурарий М.М. Генерация компактных моделей для систем с распределенными параметрами // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2021. Выпуск 1. С. 17-23. doi:10.31114/2078-7707-2021-1-17-23
- [8] Андронов, Е. В. Теоретический аппарат измерений на СВЧ / Е. В. Андронов, Г. Н. Глазов ; Е. В. Андронов, Г. Н. Глазов. – Томск : ТМЛ-Пресс, 2010. – 802 с. – (Методы измерений на СВЧ / Науч.-произв. фирма "МИКРАН"). – ISBN 978-5-91302-110-6.
- [9] Суровцев Р.С. Методика предварительного моделирования целостности сигналов в межсоединениях печатных плат бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата в системе talgat Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2013. № 3 (29). С. 165-169.
- [10] Ханян Г.С. Сравнительный анализ теорем отсчетов во временной и частотной областях // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2021. Выпуск 1. С. 87-94. doi:10.31114/2078-7707-2021-1-87-94
- [11] Щучкин Е.Ю. Решение задачи размещения элементов на печатной плате на основе упрощенной модели микрополосковой линии // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2021. Выпуск 3. С. 43-49. doi:10.31114/2078-7707-2021-3-43-49
- [12] Влостовский Е.Г. К теории связанных линий передачи // Радиотехника. – 1967. – Т. 22, № 4. – С. 28–35.
- [13] Малютин Г.А., Поздняков В.С. Определение погонных параметров полосковых линий передачи по измеряемым параметрам матрицы рассеяния в задачах измерения комплексной диэлектрической проницаемости подложек // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2020. № 1-1. С. 139 – 143.
- [14] Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ. М.: Связь, 1971. 352 с.
- [15] G.I. Zysman, A.K. Jonson. Coupled transmission line networks in an inhomogeneous dielectric medium. IEEE Trans. on MTT. 1969. Vol. MTT-17, № 10. – P. 753–759.
- [16] Sychev A.N. A novel trans-directional coupler based on vertically installed planar circuit / A.N. Sychev, S.M. Struchkov, V.N. Putilov, N.Y. Rudyi // European Microwave Week 2015: Freedom Through Microwaves (EuMW – 2015). – Conference Proceedings; 2015 45th European Microwave Conference Proceedings, EuMC: 45, Freedom Through Microwaves, Paris, 07–10 sept. 2015. – Paris: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2015. – P. 283–286. – DOI: 10.1109/EuMC.2015.7345755.
- [17] Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование. М.: Радио и связь, 1990. 286 с.
- [18] Горевой А.В. Решения в области характеристики фазовой и частотной стабильности сигналов СВЧ / А. В. Горевой, М. В. Алтухов, Е. И. Панимаскин // Метрология в радиоэлектронике : Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции, Менделеево, 2021. – С. 279-284
- [19] Жохов К.С. Аппаратно-программный комплекс для автоматизированного измерения параметров усилителей мощности / К. С. Жохов, А. В. Димаки, М. В. Синогин // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2022. – Т. 1. – С. 15-20.
- [20] Заостровных С. Мы готовы обеспечить всю отечественную промышленность анализаторами цепей / С. Заостровных, Е. Сучков // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2022. – № 3(214). – С. 20-25.

The Extraction Problems of Strip Lines Parameters

Loschilov A.G., Malyutin G.A, Trinh T.T

lag@main.tusur.ru, mr.mageorge@yandex.ru, thanhvodoi1995@gmail.com

Abstract —The problems of extraction of strip structure parameters related to the solution of a set of problems using experimental data, mathematical models and measuring instruments are discussed. Algorithms for reconstructing the parameters of single and coupled strip lines based on

experimental data are considered. Examples of extraction of primary parameters, phase velocities of propagating waves and effective permittivity are given. Along with the use of data in the frequency domain, experimental characteristics of the response to impulse action are taken into account. The

question about creation of devices for the effective solution of parameter extraction problems is raised.

Keywords —extraction of parameters, strip transmission lines, linked strip lines, primary parameters, phase velocities of in-phase and antiphase waves, extraction algorithms

REFERENCES

- [1] Evseev V. Measurement of Intrinsic Parameters of Electronic Components in Strip-Line Transmission Line by Analyzer P4226 / V. Evseev, G. Kun, E. Lupanova [et al.] // Proceedings - 2020 7th All-Russian Microwave Conference, RMC 2020: 7, Moscow, 2020. – P. 279-281.
- [2] Beyene, W. T. An Accurate Transient Analysis of High-Speed Package Interconnects Using Convolution Technique / W. T. Beyene, Ch. Yuan // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. – 2003. – Vol. 35. – No 2-3. – P. 107-120.
- [3] Jianmin Zhang, Koledintseva M.Y., Drewniak J.L., Antonini G., Orlandi A. Extracting R, L, G, C parameters of dispersive planar transmission lines from measured S-parameters using a genetic algorithm // 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (IEEE) – P. 572–576.
- [4] Dobush I.M. Extraction of parameters of equivalent circuits of passive components of microwave mis in the coplanar path. Electronic means and control systems. Materials of reports of the International Scientific and Practical Conference. 2011. No. 1. pp. 57-62.
- [5] Temnov A.M. Hybrid-monolithic microwave integrated circuits. Diss. on the job. degree of Doctor of Technical Sciences, 2020. 303 p.
- [6] Torkhov N.A. Extraction of parameters of a linear model of a THz-band Schottky diode crystal / N. A. Torkhov, L. I. Babak, A. A. Kokolov, I. I. Petrov // Moker readings: 9th International Scientific and Practical Conference on Physics and Technology of Nanoheterostructural microwave Electronics. Collection of works, Moscow, May 23, 2018. – Moscow: National Research Nuclear University "MEPhI", 2018. – pp. 126-127.
- [7] Gourary M.M. Compact model generation for distributed parameter systems // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2021. Issue 1. P. 17-23. doi:10.31114/2078-7707-2021-1-17-23
- [8] Andronov, E. V. Theoretical apparatus for microwave measurements / E. V. Andronov, G. N. Glazov ; E. V. Andronov, G. N. Glazov. – Tomsk : TML-Press, 2010. – 802 p. – (Microwave measurement methods / Scientific-proc. the company "MIKRAN"). – ISBN 978-5-91302-110-6.
- [9] Surovtsev R.S. Method of preliminary modeling of the integrity of signals in the interconnections of printed circuit boards of the onboard electronic equipment of the spacecraft in the talgat system Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics. 2013. No. 3 (29). pp. 165-169.
- [10] Khanyan G.S. Comparative Analysis of the Time and Frequency Domain Sampling Theorems // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2021. Issue 1. P. 87-94. doi:10.31114/2078-7707-2021-1-87-94
- [11] Shchuchkin E.Yu. The Problem of Element Placement on a Printed Circuit Board: the Solution Based on a Simplified Model of a Microstrip Line // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2021. Issue 3. P. 43-49. doi:10.31114/2078-7707-2021-3-43-49
- [12] Vlostovsky E.G. To the theory of connected transmission lines // Radio Engineering. - 1967. – Vol. 22, No. 4. – pp. 28-35.
- [13] Malyutin G.A., Pozdnyakov V.S. Determination of linear parameters of strip transmission lines by the measured parameters of the scattering matrix in the problems of measuring the complex dielectric permittivity of substrates // Collection of selected articles of the scientific session of TUSUR. 2020. No. 1-1. pp. 139 – 143.
- [14] Feldstein A.L., Yavich L.R. Synthesis of four-pole and eight-pole microwave devices. M.: Svyaz, 1971. 352 pp.
- [15] Zysman G.I., Jonson A.K. Coupled transmission line networks in an inhomogeneous dielectric medium. IEEE Trans, on MTT. 1969. Vol. MTT-17, № 10. – P. 753–759.
- [16] Sychev A.N. A novel trans-directional coupler based on vertically installed planar circuit / A.N. Sychev, S.M. Struchkov, V.N. Putilov, N.Y. Rudyi // European Microwave Week 2015: Freedom Through Microwaves (EuMW – 2015). – Conference Proceedings; 2015 45th European Microwave Conference Proceedings, EuMC: 45, Freedom Through Microwaves, Paris, 07–10 sept. 2015. – Paris: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2015. – P. 283-286. – DOI: 10.1109/EuMC.2015.7345755.
- [17] Fusco V. Microwave circuits. Analysis and computer-aided design. Moscow: Radio and Communications, 1990. 286 p.
- [18] Gorevoy, A.V. Solutions in the field of characterization of phase and frequency stability of microwave signals / A.V. Gorevoy, M. V. Altukhov, E. I. Panimaskin // Metrology in Radio electronics : Materials of the XII All-Russian Scientific and Technical Conference, Mendeleevo, 2021. – pp. 279-284
- [19] Zhokhov, K. S. Hardware and software complex for automated measurement of parameters of power amplifiers / K. S. Zhokhov, A.V. Dimaki, M. V. Sinogin // Electronics and microelectronics of microwave. – 2022. – Vol. 1. – pp. 15-20.
- [20] Zaostrovnykh, S. We are ready to provide the entire domestic industry with circuit analyzers / S. Zaostrovnykh, E. Suchkov // Electronics: Science, Technology, Business. – 2022. – № 3(214). – Pp. 20-25.