

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ КОНФОРМНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА МИКРОПОЛОСКОВЫХ СТРУКТУР

Сычёв А. Н., Чекалин М. А.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

пр. Ленина, 40, г. Томск, 634050, Россия

тел.: +7-3822414468, e-mail: ans@main.tusur.ru

Аннотация — Развиваются новые аспекты компьютерной реализации методики анализа полосковых структур, базирующейся на использовании численных конформных преобразований. Изложенный подход отличается высокой численной эффективностью и достаточной для практики точностью.

I. Введение

Одним из базовых элементов быстродействующих цифровых и аналоговых СВЧ интегральных микросхем являются полосковые линии передачи, которые выполняют функции гальванического межсоединения и электромагнитного направленного ответвления энергии. Их характерными особенностями являются сложность геометрии поперечного сечения, многопроводность, слоистость и неоднородность диэлектрической среды заполнения. Успешное проектирование современных интегральных микросхем невозможно без реализации точных и вычислительно эффективных методов их анализа.

В настоящее время нет единого универсального удовлетворяющего всем критериям подхода к анализу полосковых структур. Трёхмерные и двумерные электродинамические методы, имея достаточную точность, отличаются длительным временем счёта. Отсюда квазистатические методы (граничных элементов, конечных разностей, интегральных уравнений и др.) видятся довольно привлекательными, и среди них наиболее высокоскоростным при компьютерной реализации, безусловно, является метод конформных отображений (МКО).

МКО стал применяться для анализа полосковых структур одним из первых более полувека назад и до сих пор не утратил своего значения. Причинами его живучести являются [1–4]:

а) наивысшая вычислительная эффективность алгоритмов и программ, для которых не требуется существенных компьютерных ресурсов (производительности процессора, объёмов памяти), что позволяет создавать быстродействующие САПР;

б) лёгкость встраивания в программы многовариантного анализа, оптимизации и синтеза сложных полосковых структур;

в) возможность сочетания с другими аналитическими и численными методами электродинамического моделирования.

г) возможность с помощью интеграла Кристоффеля–Шварца (ИКШ) для односвязных многоугольных областей получать точные аналитические решения, являющиеся надёжными эталонами при численном тестировании других методов;

д) высокая наглядность, обусловленная возможностью визуализации структуры полей путём построения сети эквипотенциальных и силовых линий.

МКО, базирующийся на использовании ИКШ, продолжает оставаться в области активных исследований. Для практической реализации ИКШ-отображений создаются специализированные численные процедуры и компьютерные программы, так

например в 1980г. Треффесеном была создана фор-тран-программа SCPACK, на базе которой в 1994г. Дрисколл [5] разработал первую версию специализированного пакета SC-Toolbox для MATLAB со свободно распространяемыми открытыми исходными кодами (последняя версия этого пакета появилась в 2007 г.). Этот пакет, реализующий численные конформные преобразования, использован в качестве инструментария в данной работе.

II. Шаги процедуры анализа

В силу того, что исходная область поперечного сечения сложных полосковых структур по определению многопроводная и многослойная, то её моделирование выполняется с применением декомпозиционных операций с помощью электрических (проводящих) и магнитных (непроницаемых) стенок, исходя из следующих принципов: а) принципа симметрии структуры (метод зеркальных отображений); б) типа модального возбуждения для двух- и многопроводных структур; в) свойства периодичности для многопроводных структур; г) типа границы раздела диэлектриков в слоистых структурах.

Итак, процедура анализа полосковых линий состоит из следующих основных шагов:

1. Поперечное сечение структуры подвергается предварительной декомпозиции, например, вводится плоскость симметрии, в которой в зависимости от режима возбуждения устанавливается либо магнитная, либо электрическая стенки, соответственно.

2. В полученных частичных областях поперечного сечения, которые в случае двух- и многопроводных структур являются многосвязными, с целью снижения порядка связности до единицы, вводятся магнитные разрезы, соединяющие внешнюю границу области с внутренними электродами. При этом эвристически введённые разрезы не должны нарушать структуры поля для заданного режима возбуждения (что возможно, если разрез проходит вдоль силовых линий). Этот этап весьма важен и существенно определяет точность методики.

3. Полученные односвязные многоугольные области с помощью ИКШ конформно отображаются на первичные канонические области, каковыми являются или верхняя полуплоскость или внутренность единичного круга. При этом реализуются как прямое и так обратное отображения.

4. Далее, эти канонические области отображаются на финальные прямоугольные области плоского конденсатора при различных режимах возбуждения, в которых строятся образы линий раздела диэлектриков, соответствующие поверхностям подложек в исходной структуре.

5. В итоге, в финальных прямоугольных областях плоского конденсатора с учётом режимов возбуждения и неоднородности диэлектрического заполнения вычисляются соответствующие модальные ёмкости, в частности C_{0e} для чётного и C_{0o} нечётного возбуждений.

III. Пример моделирования

Для тестирования предложенной методики анализа взяты связанные микрополосковые линии (СМПЛ), которые могут иметь следующие модификации – двухслойную подложку или диэлектрическую накладку (рис. 1)

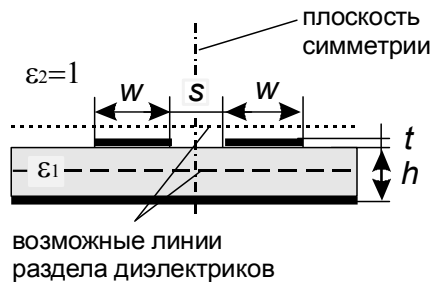


Рис. 1. Связанные микрополосковые линии с обозначением возможных линий раздела диэлектриков.

Fig. 1. Coupled microstrip lines with a designation of possible lines between dielectrics

Конформные отображения половины СМПЛ при чётном и нечётном режимах возбуждения показаны на рис. 2 и рис. 3, соответственно (шаги 2–4).



Рис. 2. Конформные отображения половины СМПЛ при чётном возбуждении.

Fig. 2. Conformal mapping for half-structure of CMSL for the even mode

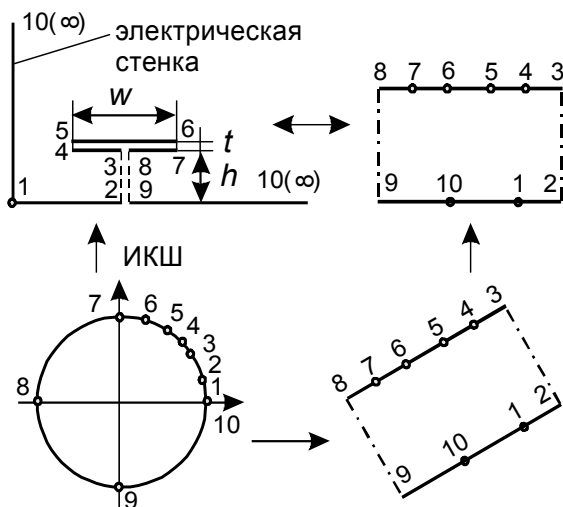


Рис. 3. Конформные отображения половины СМПЛ при нечётном возбуждении.

Fig. 3. Conformal mapping for half-structure of CMSL for the odd mode

Если выполняется обратное конформное отображение — с финального прямоугольного конденсатора на исходную область с однородным диэлектрическим заполнением, то сгенерирован сетку силовых и эквипотенциальных линий в прямоугольной области, можно рассчитать карту поля в исходной области (рис. 4), которая позволяет убедиться в адекватности предварительно введённого редуцирующего разреза (см. рис. 2 и 3).

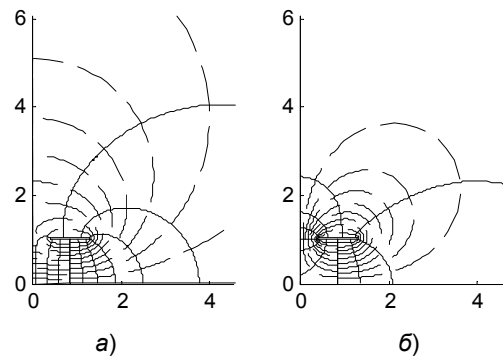


Рис. 4. Карты силовых и эквипотенциальных линий электрического поля для половин СМПЛ при чётном (а) и нечётном (б) режимах возбуждения.

Fig. 4. Distributions of the force and equipotential lines of the electric field for half-structures of CMSL for even (a) and odd (b) modes

И наоборот, если выполняется прямое отображение исходной области на каноническую область, то в этой области (т.е. в прямоугольном плоском конденсаторе) появляется возможность построить линии раздела диэлектриков (рис. 5) и выполнить анализ структуры с неоднородным (слоистым) диэлектрическим заполнением (шаг 5).

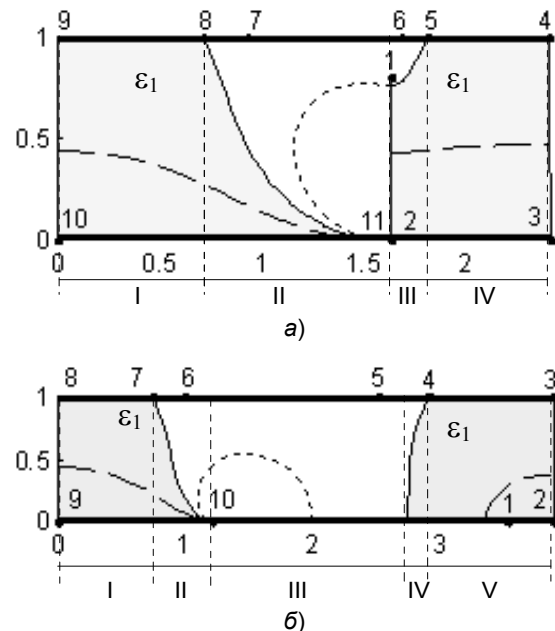


Рис. 5. Финальные прямоугольные области для половин СМПЛ при чётном (а) и нечётном (б) возбуждениях с обозначением возможных линий раздела диэлектриков (для слоистых структур).

Fig. 5. Final rectangular regions of the half-structures of CMSL for even (a) and odd (b) modes with a designation of possible lines between dielectrics (for layered structures)

Подробнее рассмотрим содержание 5-го шага анализа. Вся прямоугольная область с электродами, расположенными на верхней и нижней границах (см. рис.5), разбивается вертикальными магнитными стенками на параллельные подобласти – четыре для чётного возбуждения и пять для нечётного (см. рис. 5, а и 5, б), соответственно.

Из этих подобластей 1-я и 4-я для чётного, а также 1-я, 3-я и 5-я подобласти для нечётного возбуждений заполнены однородным диэлектриком. Это позволяет сразу же рассчитать их погонные ёмкости как отношение ширины электродов к расстоянию между ними умноженное на величину диэлектрической проницаемости.

Оставшиеся 2-я и 3-я подобласти для чётного, а также 2-я и 4-я для нечётного возбуждений имеют неоднородное диэлектрическое заполнение, поэтому подвергаются последующему разбиению вертикальными магнитными стенками. Это позволяет получить подобласти-«столбики» количеством в несколько десятков, в которых линия раздела диэлектриков аппроксимируется наклонной прямой (рис.6).

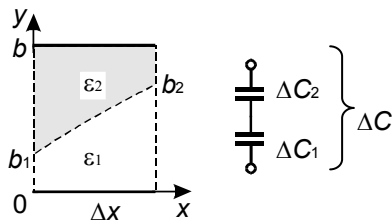


Рис. 6. Прямоугольный конденсатор с наклонной линией раздела диэлектриков.

Fig. 6. The rectangular capacitor with an inclined interface line between dielectrics

Ёмкость такого «столбика» вычисляется с использованием интегральной методики Зеегнера [6], согласно которой «столбик» подвергается дальнейшему измельчению вертикальными магнитными стенками. В каждом элементарном «столбике» линия раздела диэлектриков предполагается уже горизонтальной, и его ёмкость вычисляется по формуле последовательного соединения двух конденсаторов (см. рис.6). Далее выполняется интегрирование по горизонтальной координате x в аналитическом виде, и получается следующая формула для ёмкости ΔC «столбика» с шириной электродов Δx (см. рис.6)

$$\Delta C = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \cdot \Delta x}{\Delta \varepsilon (b_2 - b_1)} \ln \left[\frac{\Delta \varepsilon b_2 + \varepsilon_1 b}{\Delta \varepsilon b_1 + \varepsilon_1 b} \right].$$

Здесь, диэлектрик первого конденсатора — это подложка с проницаемостью ε_1 , диэлектрик второго конденсатора — воздушное заполнение над подложкой с проницаемостью $\varepsilon_2 = 1$, при этом $\Delta \varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$

В итоге, по найденным ёмкостям четного C_{oe} и нечётного C_{oo} возбуждений при воздушном и реальном диэлектрическом заполнениях формируются матрицы погонных ёмкостей \mathbf{C} и индуктивностей \mathbf{L} .

Моделирование выполняется в среде MATLAB. Численное прямое и обратное отображения Кристоффеля–Шварца реализуются с помощью свободно распространяемого компьютерного пакета SC Toolbox для MATLAB [5].

В качестве тестовой структуры были выбраны связанные МПЛ (см. рис. 1) со следующими физико-геометрическими параметрами: $w = 0,9$ мм; $t = 0,05$ мм; $s = 0,8$ мм; $h = 1$ мм; $\varepsilon_1 = 10$; $\varepsilon_2 = 1$. Расчет их электрических параметров по предложенной методике дал

следующие результаты: модальные проницаемости $\varepsilon_{oe} / \varepsilon_{oo} = 6,45 / 5,25$, волновые сопротивления $Z_{oe} / Z_{oo} = 61,3 / 42,2$ Ом (т.е. $Z_o = 51$ Ом, $k = 15$ дБ). Те же параметры, полученные программой AWR / TXLINE, оказались следующими: $\varepsilon_{oe} / \varepsilon_{oo} = 7,21 / 5,85$, $Z_{oe} / Z_{oo} = 57,2 / 41,4$ Ом (т.е. $Z_o = 49$ Ом, $k = 16$ дБ). Отсюда видим, что расхождение результатов по волновому сопротивлению составляет около 4%, по проницаемости – 10%. Однако, предложенная методика позволяет анализировать более сложные структуры с вертикальными подложками [4], что пока недоступно системе планарного моделирования AWR.

IV. Заключение

Использование свободного компьютерного пакета SC Toolbox для MATLAB позволило реализовать численные конформные преобразования для довольно сложных областей поперечного сечения полосковых структур. В качестве примера выполнен анализ связанных микрополосковых линий. Результаты анализа хорошо согласуются с расчётными данными, полученными другими методами.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., «Проведение поисковых научно-исследовательских работ по направлению «Микроэлектроника» в рамках мероприятия 1.2.1».

V. Список литературы

- [1] Сычёв А. Н. Комбинированный метод частичных ёмкостей и конформных отображений для анализа многомодовых полосковых структур. Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. 138 с.
- [2] Ghione G., Goano M. Revisiting the partial-capacitance approach to the analysis of coplanar transmission lines on multilayered substrates // IEEE Trans. 2003. V.MTT-51. No. 9. P. 2007–2014.
- [3] Wan C. Analytically and accurately determined quasi-static parameters of coupled microstrip lines // IEEE Trans. 1996.V.MTT-44. No. 1. P. 75–80.
- [4] Сычёв А. Н., Долгушин М. Е. Анализ линий с лицевой связью на вертикальной подложке с использованием между численных конформных преобразований // 20-я Международ. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникац. технологии» (Крымико'2010): материалы конф. (Севастополь, 13–17 сент. 2010 г.). Севастополь: Вебер, 2010. С. 636–638.
- [5] Driscoll T. A. Algorithm 843: Improvements to the Schwarz–Christoffel Toolbox for MATLAB // ACM Trans. on Mathem. Soft. June 2005. Vol. 31. No. 2. P. 239–251.
- [6] Zehntner J. Characteristic impedance and effective permittivity of modified microstrip line for high power transmission // IEEE Trans. 1987. Vol. MTT-35. No. 7. P. 615–620.

NUMERICAL CONFORMAL TRANSFORMATIONS TECHNIQUE FOR ANALYSIS OF THE MICROSTRIP STRUCTURES

Sychev A. N., Chekhalin M. A.
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics
40, Lenin Ave., Tomsk, 63450, Russia
Ph.: +7-3822-414-468, e-mail: ans@main.tusur.ru

Abstract — New aspects of computer realization of the stripline structures analysis technique based on using numerical conformal transformations are developed. The stated approach is characterized by high numerical efficiency and sufficient accuracy for practice.