УДК 621.3.011.73

А.Е. Горяинов

Автоматизированный синтез моделей пассивных СВЧ-компонентов в виде эквивалентных схем на основе оптимального выбора звеньев и прямой экстракции

Представлена новая методика автоматизированного синтеза моделей пассивных дискретных и интегральных СВЧ-компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и др.) в виде эквивалентных схем (ЭС) на сосредоточенных элементах. Преимуществом методики является автоматизированное определение структуры модели, с этой целью осуществляются декомпозиция модели на двухполюсные звенья и оптимальный выбор структуры каждого звена. Значения элементов звеньев находятся на основе прямой экстракции с применением модифицированной статистической медианы. В качестве примеров представлено построение моделей тонкопленочного резистора для GaAs-технологии изготовления СВЧ-интегральных схем и катушки индуктивности для SiGe-технологии.

Ключевые слова: пассивные компоненты, СВЧ, интегральные схемы, GaAs, SiGe, модели, эквивалентные схемы, прямая экстракция, статистическая медиана, структурно-параметрический синтез.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-3-32-41

Одной из важных проблем при разработке СВЧ-устройств является построение точных и быстродействующих моделей пассивных компонентов [1–9, 11, 12]. Такая задача возникает при проектировании устройств, выполняемых в виде гибридных (ГИС) и монолитных (МИС) интегральных схем, а также СВЧ-схем на основе печатных плат и дискретных компонентов. С точки зрения применения в САПР целым рядом преимуществ (простота, быстродействие, физический смысл) обладают компактные модели пассивных компонентов, т.е. модели в виде эквивалентных схем (ЭС-модели).

Задачам построения ЭС-моделей пассивных СВЧ-компонентов посвящено много работ [1–9, 11, 12]. Для определения значений элементов ЭС в настоящее время используются три основных подхода: параметрическая оптимизация [3], прямая экстракция [1, 4–7] и комбинированный подход [1, 5, 7, 8].

Параметрическая оптимизация предполагает применение численных методов для минимизации отклонений электрических характеристик модели компонента (например, параметров рассеяния) от измеренных зависимостей в требуемом частотном диапазоне. Достоинством данного подхода является универсальность, недостатками – зависимость получаемых значений элементов ЭС от начального приближения, а также отсутствие гарантии нахождения величин элементов модели, близких к их реальным физическим значениям (например, не исключено получение отрицательных величин паразитных параметров и т.д.).

При прямой экстракции [1, 4–7] значения элементов рассчитываются непосредственно по результатам измерений компонента с помощью аналитических выражений; последние получаются путем решения системы уравнений, записанной для конкретной структуры ЭС. К преимуществам данного подхода относятся простота и скорость вычислений элементов модели, а также (при достаточной точно-

сти измерений и правильном выборе структуры модели) – физичность значений элементов ЭС. Недостатком является необходимость составления и решения системы уравнений для каждой отдельной модели.

Комбинированный подход [1, 5, 7, 8] сочетает достоинства и недостатки методов параметрической оптимизации и прямой экстракции.

Однако при применении всех рассмотренных подходов остается нерешенной задача выбора оптимальной структуры ЭС, которая должна, с одной стороны, обеспечить необходимый компромисс между сложностью и точностью модели и, с другой стороны, правильно отразить протекающие в пассивном компоненте физические процессы – например, паразитные явления и параметры, имеющие место при изготовлении компонента на основе конкретной технологии, и т.д.

В ряде работ сделаны попытки автоматической или автоматизированной генерации моделей пассивных СВЧ-компонентов по измеренным данным на основе методов классического синтеза [9, 10] или численных подходов [11–13]. В этом случае задачи определения структуры модели и значений элементов ЭС решаются одновременно. Однако получаемые таким образом ЭС пассивного компонента являются, как правило, избыточно сложными, а также формальными, т.е. они не отражают реальных физических процессов и паразитных параметров.

В связи со сказанным в настоящее время задача выбора структуры ЭС решается чаще всего эмпирически при использовании литературных данных, а также метода проб и ошибок.

Во многих работах [1, 2 и др.] представлены структуры моделей (ЭС) СВЧ-пассивных компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, отверстий в подложке, контактных площадок и др.) как в дискретном, так и в интегральном исполнении. При этом обычно для одного и того же

типа компонента (например, резистора) приводится некоторое множество ЭС-моделей разной сложности и с разными структурами. Эти модели различаются как точностью представления компонента, так и отражением особенностей различных технологических процессов изготовления (например, модели пассивных компонентов для полупроводниковых GaAs- и SiGe-технологий производства МИС часто отличаются между собой).

Пользуясь этой информацией, разработчик для моделируемого компонента выбирает некоторое множество возможных структур ЭС. Далее, используя один из представленных выше методов, он находит значения элементов для выбранной структуры ЭС и затем сравнивает характеристики компонента, рассчитанные по полученной модели, с измеренными данными. При недостаточной точности модели разработчик выбирает более сложную структуру ЭС (для этого он иногда корректирует и дополняет исходную модель), далее все действия повторяются. В результате зачастую разработчику приходится выполнять построение нескольких разных моделей одного компонента, чтобы получить модель с нужным сочетанием сложности и точности. Такой процесс весьма трудоемок, так как определить пригодность выбранной структуры ЭС возможно только после расчета значений ее элементов и сравнения характеристик модели с измеренными данными.

В статье предлагается новая методика, которая позволяет выполнить автоматизированный синтез (т.е. определение структуры и значений элементов) ЭС-моделей пассивных дискретных и интегральных СВЧ-компонентов. При этом рассмотрение ограничено только моделями, состоящими из сосредоточенных элементов. Методика основана на оптимальном выборе структуры каждого звена модели, который может быть осуществлен либо автоматически с помощью предложенного алгоритма, либо самим разработчиком с использованием предоставляемой алгоритмом информации. Для автоматического определения величин элементов ЭС разработан другой численный алгоритм, основанный на прямой экстракции элементов в заданном частотном диапазоне и применении модифицированной статистической медианы. Эффективность методики продемонстрирована на примерах построения моделей тонкопленочного резистора и катушки индуктивности для GaAs- и SiGe-технологий изготовления СВЧ МИС.

Морфологический анализ структуры ЭС-моделей пассивных СВЧ-компонентов

Построение моделей в виде эквивалентных схем, как правило, выполняется в два этапа [1, 5]:

- 1) определение структуры (схемы) ЭС-модели;
- 2) определение значений элементов выбранной структуры.

Определение структуры ЭС-модели, как было отмечено ранее, осуществляется на основе анализа конструкции и физических процессов в компоненте, знания особенностей технологии изготовления, литературных данных и опыта разработчика моделей.

В ЭС-модели пассивного СВЧ-компонента обычно присутствуют основной элемент, соответствующий назначению компонента (R для резистора, C для конденсатора, L для индуктивности), и дополнительные элементы, характеризующие паразитные параметры.

В качестве примера на рис. 1 приведены модели пассивных сосредоточенных СВЧ-компонентов в дискретном и интегральном исполнении – резистора, конденсатора и катушки индуктивности [1, 5].

Рис. 1. Примеры ЭС-моделей СВЧ-пассивных компонентов: дискретного резистора в виде двухполюсника (а); в виде четырехполюсника при последовательном (б) и параллельном (в) включении; интегрального GaAs МДМ-конденсатора (г); и интегральной SiGe спиральной катушки индуктивности (д)

Как видно, чаще всего при моделировании пассивные СВЧ-компоненты представляются в виде четырехполюсников, при этом различаются последовательный и параллельный способы включения компонента (см. рис. 1). Однако если в рассматриваемом диапазоне частот можно пренебречь паразитными элементами, отражающими электромагнитные связи между самим компонентом и земляной плоскостью, тогда компонент может быть представлен в виде двухполюсника.

Для автоматизированного синтеза структуры целесообразно выполнить морфологический анализ ЭС-моделей пассивных компонентов СВЧ-схем [14]. Морфологический анализ позволяет представить в систематическом виде все возможные решения для создания технического объекта путем определения так называемого *морфологического множества* – пространства морфологических признаков исследуемого объекта. В случае построения ЭС-моделей такими морфологическими признаками могут выступать тип компонента, технология его изготовления, структура и сложность ЭС-модели и т.д. Таким

образом, в результате морфологического анализа разработчик получает упорядоченное представление множества возможных ЭС для применения их при построении моделей.

В ходе проведенного морфологического анализа в доступной отечественной и зарубежной литературе были рассмотрены состоящие из сосредоточенных элементов ЭС-модели пассивных СВЧ-компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности) как в дискретном исполнении (так называемые компоненты поверхностного монтажа, или SMD-компоненты), так и в интегральном для полупроводниковых технологий GaAs, GaN, Si и SiGe. Полученные схемы были сгруппированы по типу компонента, технологии, типовой структуре и декомпозированы на отдельные звенья. Это позволило выявить наиболее распространенные структуры моделей СВЧ пассивных компонентов (рис. 2 и 3).

На рис. 2 показаны наиболее распространенные структурные схемы ЭС-моделей. Они могут иметь вид либо пассивного двухполюсника (см. рис. 2, а), либо лестничного четырехполюсника, в последовательных и параллельных ветвях которого включены пассивные двухполюсники – звенья (см. рис. 2, б–д). В частности, здесь показаны четырехполюсники, образованные последовательным (см. рис. 2, б) и параллельным (см. рис. 2, в) включением двухполюсного звена, а также Т-образный (см. рис. 2, з) и П-образный (рис. 2, д) четырехполюсники, содержащие по три двухполюсных звена.

Рис. 2. Типовые структурные схемы ЭС-моделей СВЧ-пассивных компонентов

Примеры имеющихся в литературе схем на сосредоточенных элементах, которые могут использоваться в качестве звеньев в моделях СВЧ пассивных компонентов (см. рис. 2), изображены на рис. 3. Схемы звеньев могут представлять собой одиночные сосредоточенные пассивные элементы либо соединения двух, трех и четырех таких элементов. Использование в каждой из структур (см. рис. 2) конкретных схем звеньев, представленных на рис. 3, зависит от типа компонента, технологии изготовления, а также места конкретного звена в структуре. Так, при описании резистора с помощью П-образной структуры (см. рис. 2, д) в качестве звена Y_2 используются схемы рис. 3, а, г, ж, л, схема рис. 3, м предназначена для моделей катушек индуктивности, а

схемы рис. 3, в, е, ж, и часто используются для описания паразитных процессов в подложке.

Рис. 3. Примеры типовых звеньев моделей пассивных компонентов

Полученные в результате морфологического анализа типовые структуры ЭС-моделей СВЧ-пассивных компонентов, примеры которых показаны на рис. 2 и 3, охватывают преобладающее большинство моделей, представленных в литературе. Определение морфологического множества ЭС позволяет формализовать задачу структурного синтеза моделей СВЧ-пассивных компонентов – в частности, на основе перебора структурных схем и звеньев моделей, изображенных на рис. 2 и 3.

Методика автоматизированного синтеза ЭС-моделей СВЧ-компонентов

Предлагаемая новая методика автоматизированного структурно-параметрического синтеза ЭС-моделей СВЧ-компонентов основана на сочетании двух идей: а) свести задачу синтеза моделей со структурными схемами на рис. 2 к синтезу отдельных ветвей (двухполюсных звеньев) [1]; б) организовать автоматизированный расчет элементов сразу для некоторого допустимого множества схем звеньев, например, из числа показанных на рис. 3, и отбор из этого множества тех звеньев, которые в наилучшей степени отвечают необходимому компромиссу между точностью и сложностью модели.

Рассмотрим реализацию этих идей. Для структурных схем моделей на рис. 2, а–в сведение задачи синтеза модели к синтезу двухполюсного звена тривиально – здесь только нужно по измеренным параметрам рассеяния с помощью известных формул найти численные значения Z - или Y -параметров звена в рассматриваемом частотном диапазоне и далее, используя эти значения, решить задачу экстракции элементов звена при известной (заранее выбранной)

его схеме. Решение последней задачи для звеньев, показанных на рис. 3, обычно не очень сложное; в частности, для звеньев на рис. 3, а–ж расчетные формулы, позволяющие определить значения элементов, представлены в литературе [1]. Для схем на рис. 3, и–м и некоторых других формулы экстракции элементов были выведены автором, но из-за ограничения места здесь не приводятся.

Для Т-образного (см. рис. 2, з) и П-образного (см. рис. 2, д) четырехполосников сведение задачи к синтезу отдельных двухполосных звеньев выполняется на основе известных формул, связывающих Z- и Y-параметры четырехполосников соответственно с импедансами и полными проводимостями звеньев [1]. Из этих формул вытекают следующие соотношения:

для Т-образного четырехполосника (рис. 2, з)

$$Z_1 = Z_{11} - Z_{12}, \quad (1)$$

$$Z_2 = Z_{22} - Z_{12}, \quad (2)$$

$$Z_3 = Z_{12} = Z_{21} \quad (3)$$

для П-образного четырехполосника (рис. 2д)

$$Y_1 = Y_{11} + Y_{12}, \quad (4)$$

$$Y_2 = Y_{22} + Y_{12}, \quad (5)$$

$$Y_3 = -Y_{12} = -Y_{21}. \quad (6)$$

Здесь Z_1, Z_2, Z_3 и Y_1, Y_2, Y_3 – соответственно импедансы и полные проводимости звеньев; Z_{ij} и Y_{ij} ($i, j = 1, 2$) – соответственно Z- и Y-параметры четырехполосника.

Это позволяет декомпозировать структуру модели на три отдельных звена и выполнить построение моделей для частей структуры в виде двухполосников независимо друг от друга. Такой подход значительно облегчает задачу прямой экстракции элементов модели, так как вместо весьма сложной задачи определения значений элементов полной модели компонента как четырехполосника решаются три более простые задачи для двухполосных звеньев.

Методика автоматизированного синтеза ЭС-моделей СВЧ-компонентов включает следующие этапы.

1. Выбор структурной схемы модели из числа структур на рис. 2.

2. Получение (измерение) параметров рассеяния пассивного СВЧ-компонента как двухполосника или четырехполосника на фиксированных частотах ω_k ($k = 1, 2, \dots, m$) в заданном диапазоне частот $[\omega_L, \omega_U]$.

3. Для структур рис. 2, а–в – расчет по параметрам рассеяния желаемых численных значений иммитанса $W_d(\omega_k)$ (сопротивления $Z_d(\omega_k)$ или проводимости $Y_d(\omega_k)$) двухполосного звена на частотах $\omega_k \in [\omega_L, \omega_U]$. Для структур рис. 2, з, д – расчет по параметрам рассеяния Z- или Y-параметров и затем с помощью формул (1)–(6) – желаемых численных зависимостей иммитансов $W_{d1}(\omega_k), W_{d2}(\omega_k), W_{d3}(\omega_k)$ (импедансов $Z_{d1}(\omega_k), Z_{d2}(\omega_k), Z_{d3}(\omega_k)$ или проводимостей $Y_{d1}(\omega_k), Y_{d2}(\omega_k), Y_{d3}(\omega_k)$) двухполосных звеньев на частотах $\omega_k \in [\omega_L, \omega_U]$.

4. Определение множества допустимых схем (см. рис. 3) для каждого звена модели выбранной структуры на рис. 2. Решение задачи прямой экс-

тракции (т.е. определения значений элементов на основе аналитических выражений) для каждой из множества допустимых схем первого звена Z_1 модели.

5. Расчет для каждой из множества допустимых схем звена Z_1 частотной зависимости иммитанса $W_c(\omega)$ и абсолютной среднеквадратичной ошибки (СКО) Δ_W воспроизведения желаемой иммитансной характеристики $W_d(\omega_k)$ зависимостью $W_c(\omega)$ на частотах $\omega_k \in [\omega_L, \omega_U]$:

$$\Delta_W = \sqrt{\sum_{k=1}^m |W_d(\omega_k) - W_c(\omega_k)|^2 / m}. \quad (7)$$

6. Определение «наилучших» схем для звена Z_1 модели, которые обеспечивают приемлемый компромисс между сложностью схемы звена и величиной СКО Δ_W .

7. Если модель содержит несколько звеньев, – повторение пп. 5–7 для остальных звеньев (Z_2, Z_3).

8. Составление нескольких различных ЭС-моделей СВЧ-компонента, которые образованы всеми возможными комбинациями «наилучших» схем для каждого звена.

9. Расчет параметров рассеяния полученных ЭС-моделей СВЧ-компонента в диапазоне $[\omega_L, \omega_U]$, сравнение с измеренными параметрами и определение относительной СКО δ_S параметров рассеяния моделей:

$$\delta_S = \sqrt{\sum_{k=1}^m \delta_k^2 / p^2 n}; \quad (8)$$

$$\delta_k = \sum_{i=1, j=1}^p \delta S_{ij}(\omega_k)^2; \quad (9)$$

$$\delta S_{ij}(\omega_k) = \frac{|S_{ijMeas}(\omega_k) - S_{ijModel}(\omega_k)|}{|S_{ijMeas}(\omega_k)|}, \quad (10)$$

где p – количество портов СВЧ-компонента.

10. Параметрическая оптимизация элементов полученных ЭС-моделей (при необходимости).

11. Выбор наилучшей модели.

При автоматизированном построении моделей СВЧ-компонентов на основе предложенной методики разработчик должен самостоятельно выполнить пп. 1, 2, остальные пункты могут быть реализованы автоматически компьютерным алгоритмом. В случае необходимости разработчик может также взять на себя принятие решений на этапах пп. 4, 6, 8 и 11.

Остановимся более подробно на определении множества допустимых схем для каждого звена модели (п. 4). При выборе такого множества, помимо литературных данных и результатов морфологического анализа, здесь нужно еще учитывать допустимую сложность схем звеньев, а также физические соображения, включая импедансы звеньев на нулевой и бесконечной частотах. Например, модель резистора должна обладать чисто активным (резистивным) сопротивлением на нулевой частоте, это нужно учитывать при выборе схем последовательных и параллельных звеньев в Т-образной (см. рис. 2, з) и П-образной (см. рис. 2, д) структурах модели и т.д.

Алгоритм автоматического определения значений элементов ЭС

Одним из недостатков метода прямой экстракции является то, что расчет значений (параметров) элементов ЭС с помощью аналитических выражений обычно выполняется на основании данных измерений СВЧ-компонента в одной или двух частотных точках. При этом значения элементов ЭС, рассчитанные для разных частотных точек, могут значительно отличаться. Это связано, во-первых, с ошибками измерений и, во-вторых, с тем, что выбранная схема ЭС-модели не всегда способна точно описать поведение компонента во всем рассматриваемом частотном диапазоне.

Поэтому на практике экстракция каждого из элементов ЭС часто проводится на некотором множестве точек, расположенных во всем заданном диапазоне частот. После этого определяется частотный поддиапазон, где экстрагированная величина элемента ЭС изменяется мало (т.е. график зависимости значения элемента от частоты близок к прямой линии, параллельной оси абсцисс). Средняя величина элемента в указанном частотном поддиапазоне и выбирается в качестве окончательного экстрагированного значения.

Определить частотный поддиапазон, соответствующий постоянству значений элемента ЭС, разработчик может достаточно просто визуальным способом, построив частотную зависимость экстрагированного параметра. Однако при компьютерной реализации предложенной методики автоматизированного синтеза ЭС-моделей СВЧ-компонентов задача экстракции значений элементов должна решаться автоматически без участия человека. Заметим, что в известной литературе по построению моделей СВЧ-компонентов не приведены надежные способы автоматического решения такой задачи.

В основе предлагаемого нами алгоритма лежит сведение проблемы выбора оптимального значения элемента из определенного множества к задаче оценки числовой выборки, относящейся к математической статистике. Выборка – это некоторый набор числовых данных, например значений элемента ЭС, полученных в результате прямой экстракции. Оценка выборки – это некоторое число, которое характеризует всю выборку в целом. Например, это может быть максимальное или минимальное значение в наборе числовых данных. Однако чаще в качестве оценки выборки подразумевают некоторое число, преобладающее в конкретном наборе значений. Стоит отметить, что оценка как число необязательно входит в выборку, но рассчитывается на её основе. Так, среднее значение является оценкой преобладающего числа в числовом множестве, однако необязательно содержится в нём.

Применительно к рассматриваемой задаче экстракции элементов ЭС с точки зрения оценки выборки преимуществом перед средним значением обладает статистическая медиана. Медиана – это число, характеризующее выборку таким образом,

что ровно половина элементов выборки больше медианы, а другая половина меньше. В общем случае медиану можно вычислить, упорядочив элементы выборки по возрастанию или убыванию и взяв средний элемент. Понятие медианы используется в математической статистике благодаря лучшей устойчивости к различного рода выбросам и помехам в выборке по сравнению с усредненной величиной.

Рис. 4. Сравнение среднееквдратичного значения и медианы: *а* – на равномерной выборке; *б* – на выборке со значительным случайным выбросом

На рис. 4 приведено сравнение среднееквдратичного значения (СКЗ) и медианы для двух характерных случаев изменения некоторого параметра. Как видно, медиана даёт схожую со средним значением оценку параметра, если числа в наборе лежат в относительно небольшом интервале значений (рис. 4, *а*). Однако если в выборке присутствуют числа, значительно отличающиеся от других – так называемые «случайные выбросы», СКЗ существенно изменяется, тогда как медиана остается практически неизменной и гораздо ближе к оценке постоянной величины параметра, которую получил бы человек визуальным способом (рис. 4, *б*).

Ситуация, когда экстрагированные на разных частотах значения элемента ЭС имеют случайные выбросы (см. рис. 4, *б*), характерна при наличии случайных ошибок измерений исходных параметров рассеяния компонента. Однако достаточно часто при решении задачи экстракции наблюдается и другой случай, когда зависимость получаемого значения элемента ЭС от частоты имеет регулярный характер. Пример показан на рис. 5, где приведены частотные зависимости экстрагированных значений паразитных элементов R_{sub} и C_{sub} модели GaAs тонкопленочного резистора (рис. 5, *а*) в диапазоне от 0 до 50 ГГц.

Такая ситуация характерна, если используемая схема ЭС-модели не может с одинаковой точностью воспроизвести поведение компонента во всем заданном частотном диапазоне. При этом, например, в

результате экстракции в нижней части частотного диапазона получаются одни значения элементов ЭС, а в верхней части – другие. В рассматриваемом случае применение классической медианы неэффективно и неспособно получить результат, близкий к оценке постоянного значения параметра человеком (см. рис. 5).

Рис. 5. ЭС-модель GaAs тонкопленочного резистора (а) и сравнение различных способов определения значений паразитных элементов: сопротивления (б) и ёмкости (в)

Для надежного определения постоянных значений элементов ЭС в ситуациях случайных выбросов и регулярных частотных зависимостей экстрагированных параметров предлагается следующий алгоритм, основанный на модификации понятия статистической медианы (далее кратко – «модифицированная статистическая медиана»):

1. Получение значений $e_k \equiv e(\omega_k)$ ($k = 1, 2, \dots, m$) элемента e звена ЭС, экстрагированных из численных зависимостей иммитанса звена $W_d(\omega_k)$ на всех частотах $\omega_k \in [\omega_L, \omega_U]$.
2. Упорядочение выборки e_k ($k = 1, 2, \dots, m$) по возрастанию значений элемента e .
3. Разделение выборки e_k на равные поддиапазоны D_1, D_2, D_3, D_4 по значениям элемента e .
4. Расчёт разности Δe_n между последним (максимальным) и первым (минимальным) значениями элемента e в каждом поддиапазоне D_n ($n = 1, 2, 3, 4$).
5. Среди поддиапазонов D_n определение поддиапазона D_J ($J = 1, 2, 3, 4$) с наиболее постоянными

значениями элемента e (т.е. с наименьшей разностью Δe_n): $\Delta e_J = \min(\Delta e_1, \Delta e_2, \Delta e_3, \Delta e_4)$.

6. Определение результирующей экстрагированной величины e_{extr} элемента e как медианы значений e_k в поддиапазоне D_J .

Разделение выборки на равные поддиапазоны по значениям элемента обусловлено поиском участка выборки с постоянным частотонезависимым значением элемента. Для определения участка с наименьшей частотной зависимостью выполняется расчет разности между первым и последним значением элемента каждого поддиапазона. Количество поддиапазонов, равное 4, объясняется имеющимся опытом построения моделей – если в выборке значений элемента, полученной с помощью прямой экстракции, нет поддиапазона частот, занимающего четверть и более исходного диапазона частот, где величина экстрагированного элемента ЭС меняется мало, высока вероятность неправильного выбора структуры ЭС-модели (т.е. эту структуру необходимо изменить).

На рис. 5 представлено сравнение различных способов выбора значения элемента при прямой экстракции паразитных сопротивления R_{sub} и ёмкости C_{sub} в модели тонкопленочного резистора – с применением усреднения, статистической медианы и предложенного алгоритма (модифицированная статистическая медиана). Здесь же показана оценка постоянного значения элемента, сделанная визуальным способом экспертом-разработчиком модели. Очевидно, что оценка, найденная с помощью предложенного алгоритма, очень близка к экспертной оценке разработчика модели. Это свидетельствует о возможности применения алгоритма для автоматического решения задач экстракции моделей.

Предложенная методика построения моделей и алгоритм автоматического определения значений элементов ЭС реализованы в программе *Extraction-P* [6], предназначенной для построения моделей сосредоточенных пассивных СВЧ компонентов.

Ниже приведены примеры применения разработанных методики, алгоритмов и ПО для построения моделей интегральных пассивных сосредоточенных элементов, изготовленных на основе GaAs и SiGe монокристаллических технологий.

Построение модели интегрального тонкопленочного резистора

Рассмотрим построение модели тонкопленочного резистора величиной 375 Ом, изготовленного по 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии СВЧ МИС. Измерения параметра рассеяния S_{11} компонента были выполнены с одним заземленным выводом (т.е. как двухполюсника) в диапазоне частот 2–50 ГГц с шагом 0,48 ГГц. С этой целью на полупроводниковой пластине был изготовлен специальный тестовый элемент, который измерялся на зондовой станции.

Очевидно, в данном случае следует выбрать структуру модели резистора в виде двухполюсника (см. рис. 2, а). Множество допустимых схем единственного двухполюсного звена ограничим цепями

(см. рис. 2, а, з, ж, к). Далее для каждой цепи была выполнена автоматическая прямая экстракция значений элементов с использованием предложенного алгоритма, основанного на модифицированной статистической медиане. При этом аналитические формулы для экстракции были либо взяты из литературы, либо выведены самостоятельно.

В качестве примера на рис. 6 приведены результаты прямой экстракции значений элементов из исходных параметров рассеяния для цепи рис. 3, ж. С помощью алгоритма оценки выборки были получены значения элементов R и C – соответственно 375,34 Ом и 5,72 фФ (показаны на рис. 6 штриховыми линиями).

Рис. 6. Результат прямой экстракции значений элементов модели резистора в виде параллельной RC -цепочки

На следующем шаге необходимо выполнить моделирование каждой цепи с рассчитанными значениями элементов и оценить СКО импеданса модели относительно измеренных данных. Сравнение импедансов $Z_l \equiv Z_{l1}$, рассчитанных из результатов измерений S_{11} и полученных путём моделирования, для двух цепей представлено на рис. 7.

Рис. 7. Частотные зависимости модуля и фазы желаемого импеданса звена и импеданса схем

Информация, характеризующая построенные таким образом различные модели тонкопленочного резистора, дана в табл. 1. Здесь для каждой модели приведены:

- 1) значения элементов ЭС-модели;
- 2) значение абсолютной СКО Δ_Z воспроизведения желаемой частотной характеристики импеданса звена $Z_d(\omega_k)$ в частотном диапазоне 2–50 ГГц, вычисляемой по формуле (7);

- 3) значение относительной СКО δ_S воспроизведения моделью измеренного параметра рассеяния S_{11} резистора, вычисляемой по формуле (8).

Таблица 1

Значения элементов и СКО для различных моделей тонкопленочного резистора

Цепь, рис.	R , Ом	L , нГн	C , фФ	Δ_Z , Ом	δ_S , %
3, а	372,1	–	–	0,051	7,41
3, з	372,1	Н/з	–	–	Н/з
3, ж	375,3	–	5,72	0,0031	0,335
3, к	375,6	0,254	7,54	0,0032	0,337

Примечание. *Н/з – нет значения. В результате экстракции не удалось рассчитать значение элемента.

Из табл. 1 видно, что наименьшие погрешности импеданса $Z_l \equiv Z_{l1}$ и параметра рассеяния S_{11} обеспечивают модели резистора на рис. 3, ж и рис. 3, к. Однако модель рис. 3, ж в виде параллельной RC -цепочки содержит наименьшее число элементов. Поэтому ее целесообразно использовать в качестве модели интегрального резистора в САПР.

Следует также отметить, что прямая экстракция для модели резистора в виде последовательной RL -цепочки (см. рис. 3, з) приводит к нефизичным отрицательным значениям элемента L во всем частотном диапазоне. Это означает, что данная ЭС является неподходящей для описания поведения тонкопленочного резистора.

На рис. 8 представлено сравнение измеренных значений модуля и фазы коэффициента отражения S_{11} тонкопленочного GaAs-резистора с рассчитанными по полученной модели (см. рис. 3, ж). Данные табл. 1 и рис. 8 свидетельствуют о высокой точности модели.

Рис. 8. Сравнение измеренных значений модуля и фазы коэффициента отражения S_{11} тонкопленочного GaAs-резистора с рассчитанными по модели рис. 3, ж

Построение модели интегральной спиральной катушки индуктивности

Выполним построение модели интегральной квадратной спиральной катушки индуктивности величиной 1 нГн, изготовленной по технологии 0,25 мкм SiGe BiCMOS. Модель катушки в четырехполюсном включении строится на основе результатов зондовых измерений компонента в диапазоне частот 0,3–17 ГГц с шагом 0,1 ГГц. Следует отметить, что частота 1-го резонанса катушки индуктивности находится выше указанного частотного диапазона.

В соответствии с проведенным морфологическим анализом для модели были выбраны следующие структурные ограничения:

1. П-образная типовая структура (см. рис. 2, д).
2. Цепи рис. 3, б, г, д, к для звена Z_2 (Y_2).
3. Цепи рис. 3, в, е, ж, и для звеньев Z_1 (Y_1) и Z_3 (Y_3) с целью описания паразитных сопротивлений и ёмкостей кремниевой подложки.

При оценке моделей оказалось более удобным оперировать с импедансами звеньев $Z_l = 1/Y_l$ ($l = 1, 2, 3$ – номер звена). На рис. 9 показаны частотные зависимости модуля и фазы для желаемых импедансов всех звеньев, а также импедансов некоторых из указанных выше схем звеньев, элементы которых были найдены с помощью прямой экстракции.

В табл. 2–4 для всех исследованных схем, используемых в звеньях модели, представлены абсолютные СКО Δ_{Zl} [формула (7)], максимальные относительные ошибки модуля $\max\delta(|Z_{dl}| - |Z_{cl}|)$ и максимальные абсолютные ошибки фазы $\max\Delta(\varphi(Z_{dl}) - \varphi(Z_{cl}))$ импедансов Z_l в частотном диапазоне 0,3–17 ГГц.

Рис. 9. Частотные зависимости модуля и фазы для желаемых импедансов звеньев Z_1 , Z_2 , Z_3 и импедансов рассчитанных схем звеньев

В соответствии с данными табл. 2–4 для звена Z_2 выбрана схема рис. 3, г, а для звеньев Z_1 и Z_3 – схема рис. 3, и. В результате получена ЭС-модель

интегральной спиральной катушки индуктивности на основе технологии SiGe, показанная на рис. 10. Следует отметить, что ЭС является несимметричной (значения паразитных элементов, моделируемых цепями в звеньях Z_1 и Z_3 , отличаются между собой, хотя и близки). Это естественно, так как конструкция катушки индуктивности также несимметрична.

Таблица 2

Погрешности импеданса Z_1 для схем звена Z_1

Цепь, рис.	$\max\delta(Z_{d1} - Z_{c1})$, %	$\max\Delta(\varphi(Z_{d1}) - \varphi(Z_{c1}))$, град	Δ_{Z1} , Ом
3, в	1,6	40,3	0,1
3, е	1,2	40,5	0,019
3, жс	54,9	120,7	0,015
3, и	38,6	49,1	0,004

Таблица 3

Погрешности импеданса Z_2 для схем звена Z_2

Цепь, рис.	$\max\delta(Z_{d2} - Z_{c2})$, %	$\max\Delta(\varphi(Z_{d2}) - \varphi(Z_{c2}))$, град	Δ_{Z2} , Ом
3, б	11,7	28,47	0,11
3, г	3,18	13,13	0,057
3, д	11,4	21,1	0,10
3, к	н/з	н/з	н/з

Таблица 4

Погрешности импеданса Z_3 для схем звена Z_3

Цепь, рис.	$\max\delta(Z_{d3} - Z_{c3})$, %	$\max\Delta(\varphi(Z_{d3}) - \varphi(Z_{c3}))$, град	Δ_{Z3} , Ом
3, в	1,8	26,7	0,095
3, е	1,3	25,9	0,018
3, жс	56,9	101,5	0,016
3, и	41,1	44,3	0,004

Рис. 10. Полученная ЭС-модель катушки индуктивности на основе технологии SiGe

Рисунок 11 иллюстрирует сравнение параметров рассеяния катушки индуктивности, полученных в результате измерения, с рассчитанными по модели. В табл. 5 приведены максимальные погрешности модели для модулей и фаз всех S-параметров, рассчитанные в диапазоне 0,3–17 ГГц.

На частотах выше 2 ГГц максимальные относительные ошибки параметров рассеяния по модулю не превышают 3,1%, а максимальные абсолютные ошибки по фазе находятся в пределах 4,0°. На частотах ниже 1 ГГц максимальные погрешности фаз параметров S_{11} и S_{22} достигают соответственно 11,3 и 11,2°. Однако это не имеет большого значения, так как в указанном частотном диапазоне величины $|S_{11}|$, $|S_{22}| < -25$ дБ, т.е. входной и выходной импедансы

катушки индуктивности в стандартном тракте близки к 50 Ом независимо от фаз S_{11} и S_{22} .

Рис. 11. Сравнение измеренных параметров рассеяния катушки индуктивности с рассчитанными по модели

Таблица 5

Ошибки модели интегральной квадратной спиральной катушки индуктивности

Ошибка	Значение ошибки	
	0,3–2 ГГц	2–17 ГГц
$\max \delta S_{11} , \%$	0,5	3,1
$\max \delta S_{12} , \%$	0,4	2,6
$\max \delta S_{22} , \%$	0,5	2,6
$\max \Delta \varphi(S_{11}), \text{град}$	11,3	2,9
$\max \Delta \varphi(S_{12}), \text{град}$	0,3	4,0
$\max \Delta \varphi(S_{22}), \text{град}$	11,2	2,9

При разработке моделей конденсаторов и катушек индуктивности важно также воспроизведение добротности компонента. На рис. 12 приведены частотные зависимости добротности катушки, рассчитанные по измеренным S -параметрам и по модели.

Рис. 12. Частотные зависимости добротности катушки, рассчитанные по измеренным S -параметрам и по модели

Из рис. 11, 12 и табл. 5 следует, что построенная модель интегральной катушки индуктивности с

достаточной для практики точностью описывает ее характеристики.

Приведенные примеры показывают, что рассмотренная методика позволяет решить задачу структурно-параметрического синтеза ЭС-моделей различных пассивных СВЧ-компонентов, обеспечивая одновременно приемлемую точность моделей.

Заключение

Представленная методика по сравнению с существующими методами построения моделей пассивных СВЧ-компонентов имеет ряд преимуществ. В отличие от традиционных подходов (параметрическая оптимизация, прямая экстракция и комбинированный подход), она дает возможность определять не только значения элементов, но и структуру (схему) ЭС-модели. В отличие от приводящих к формальным моделям методов структурного синтеза ЭС, основанных на классической теории цепей [9, 10] либо итерационных стохастических и интеллектуальных алгоритмах [11–13], она позволяет контролировать структуру модели путем задания множества допустимых цепей в звеньях. Благодаря этому, во-первых, можно добиться необходимого компромисса между сложностью и точностью модели; во-вторых, сохраняется физичность ЭС-модели, т.е. отражение свойств конструкции реального компонента (паразитные элементы и др.). Использование алгоритма, основанного на декомпозиции модели, оптимальном выборе звеньев и прямой экстракции, в комбинации с предложенным алгоритмом определения значений элементов ЭС на базе модифицированной статистической медианы обеспечивает автоматизацию построения моделей при значительном выигрыше во времени по сравнению с традиционными подходами.

Литература

1. Bahl I.J. Lumped elements for RF and microwave circuits / I.J. Bahl. – Boston; London: Artech House, 2003. – 488 p.
2. Noyan K. Modern Microwave Circuits / K. Noyan, M.I. Aksun. – Boston; London: Artech House, 2005. – 604 p.
3. Extraction of Passive Device Model Parameters Using Genetic Algorithms / I. Yun, L.A. Carastro, R. Poddar, M.A. Brooke, G.S. May, H. Kyung-Sook, K.E. Pyun // ETRI Journal. – 2000. – Vol. 22, № 1. – P. 38–46.
4. Accurate Systematic Model-Parameter Extraction for On-Chip Spiral Inductors / H.-H. Chen, H.-W. Zhang, S.-J. Chung, J.-T. Kuo, T.-C. Wu // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2008. – Vol. 55, № 11. – P. 3267–3273.
5. Добуш И.М. Построение моделей пассивных элементов и автоматизированное проектирование СВЧ-монокристаллических усилителей с учетом влияния температуры: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. – Томск, 2012. – 199 с.
6. Добуш И.М. Программа экстракции эквивалентных схем пассивных СВЧ-компонентов в среде символьных вычислений / И.М. Добуш, М.В. Черкашин, Л.И. Бабак // Электронные средства и системы управления: матер. докладов междунар. науч.-практ. конф. – Томск: В-Спектр, 2011. – С. 161–168.
7. Горяинов А.Е. Программа для экстракции параметров эквивалентных схем пассивных компонентов СВЧ-монокристаллических интегральных схем / А.Е. Горяинов, А.В. Степачева, И.М. Добуш, Л.И. Бабак // 22-я Междунар. Крым-

ская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: сб. трудов. – Севастополь: Вебер, 2012. – Т. 1. – С. 129–130.

8. Durev V. Parameter Extraction of Geometry Dependent RF Planar Inductor Model / V. Durev, E. Gadjeva, M. Hristov // 17th International Conference: Mixed Design of Integrated Circuits and Systems: proceedings. – Wroclaw, 2010. – P. 420–424.

9. Choi K.L. Development of Model Libraries for Embedded Passives Using Network Synthesis / K.L. Choi, M. Swaminathan // IEEE Trans. on Circuits and Systems – II: Analog and Digital Signal Processing. – 2000. – Vol. 47, №4. – P. 249–260.

10. Mangold T. Full-wave modeling and automatic equivalent-circuit generation of millimeter-wave planar and multilayer structures / T. Mangold, P. Russer // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 1999. – Vol. 47, №6. – P. 851–858.

11. Baden Fuller A.J. Computer optimization of circuits applied to the modelling of microwave IC passive components / A.J. Baden Fuller // IEE Microwaves, Antennas and Propagation: Proceedings. – 1986. – Vol. 133, №5. – P. 411–418.

12. Gadjeva E. Analysis, model parameter extraction and optimization of planar inductors using MATLAB / E. Gadjeva, V. Durev, M. Hristov // Matlab – Modelling, Programming and Simulations – InTech, 2010. – P. 277–301.

13. Koza J.R. Automated synthesis of analog electrical circuits by means of genetic programming / J.R. Koza, F.H. Bennett // IEEE Trans. on Evolutionary Computation. – 1997. – Vol. 1, № 2. – P. 109–128.

14. Акимов С.В. Анализ проблемы автоматизации структурно-параметрического синтеза // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2, ч. 2. – С. 204–211.

Горяинов Александр Евгеньевич

Мл. науч. сотр. лаборатории интеллектуальных компьютерных систем ТУСУРа

Тел.: +7-913-841-24-29

Эл. почта: goryainov.alex@gmail.com

Goryainov A.E.

Automated synthesis of passive microwave component models represented as equivalent circuit and based on optimal choice of subcircuits and direct extraction

A new technique for automated synthesis of passive microwave components (resistors, capacitors, inductors, etc.) models in the form of equivalent circuits (EC-models) is presented. An advantage of the technique is an automated definition of EC structure by model decomposition into one port subcircuits and optimal choice of each subcircuit. Elements' values are determined by direct extraction and modified statistical median. As an example, GaAs thin-film resistor and SiGe BiCMOS inductor models constructing is presented.

Keywords: passive components, microwave, GaAs, SiGe, model constructing, EC-models, direct extraction, statistical median, structural-parametric synthesis.