УДК 621.372

А.Н. Сычёв, В.А. Шестаков

Оптимальный синтез интегральных СВЧ-устройств на основе замещающего моделирования. Обзор

Рассматриваются базовые алгоритмы оптимального синтеза интегральных СВЧ-устройств на основе замещающего моделирования. Приводятся и обсуждаются основные методы построения замещающих моделей («отображений пространств проектных параметров», линейно-регрессионный, нейросетевой и др.).

Ключевые слова: Микроэлектроника СВЧ, интегральные СВЧ-устройства, оптимальный синтез, замещающая модель.

Постановка задачи. При синтезе (проектировании) интегральных СВЧ-устройств на основе приближённых, например схемных, моделей неизбежны порой весьма существенные отклонения расчётных откликов (частотных характеристик) от экспериментальных результатов или точных электродинамических расчётов (рис. 1).

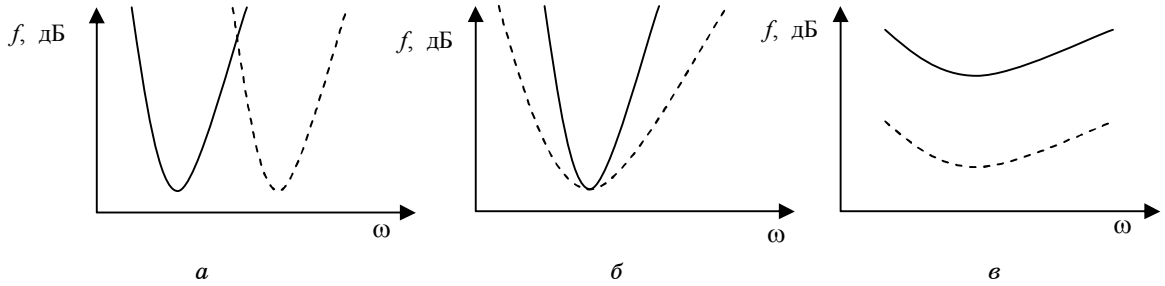

Рис. 1. Типичные рассогласования откликов, полученных по приближённой модели и из эксперимента (или на основе точной электродинамической модели): *а* – смещение по частоте; *б* – растяжение-сжатие; *в* – смещение по уровню

При этом важно отметить, что моделирование и САПР на основе теории цепей, использующие эмпирические модели устройств, в то же время являются наиболее «*быстрыми*». Программы электродинамического моделирования являются «*долгоиграющими*» и обычно используются для проверки (верификации) результатов проектирования. Но если они должны эксплуатироваться в процессе оптимизации, ведь считается, что высшее качество, т.е. точность моделирования обеспечивается более дорогой прямой оптимизацией, то для сложных задач эта стоимость может стать существенным препятствием.

Желательны альтернативные подходы к синтезу микроэлектронных СВЧ-устройств, сочетающие скорость и завершённость программ моделирования цепей и точность электродинамических программ. Методология замещающего (суррогатного) моделирования решает эту проблему.

Методы построения замещающих моделей. Основные понятия в этом подходе следующие: 1) точная электродинамическая модель-эталон (или результаты эксперимента); 2) предварительная грубая (приближённая, идеальная) модель-заготовка, построенная на основе физических и эмпирических соображений; 3) выравнивающая модель-процедура, модернизирующая (подгоняющая) приближённую модель и согласующая её с точной моделью; 4) замещающая (суррогатная) модель-результат, полученная сочетанием приближённой и согласующей моделей. Модель-заместитель (суррогат) должна быть столь же качественна, как точная модель, и столь же быстра, как приближённая модель.

Существует большое количество методик построения замещающих моделей, и настоящий обзор посвящён именно их подробному рассмотрению. Предварительно перечислим ряд дополнительных понятий: а) заданные требования; б) отклик модели $R(x)$; в) проектные параметры $\mathbf{x}$ – это вектор геометрических размеров и параметров материалов $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$, оптимальные проектные параметры – это вектор $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \ldots, x_n^*)$.

Заметим, что замещающая модель является процедурой анализа, и чтобы выполнить по ней синтез, её необходимо дополнить процедурой оптимизации. При этом целевой функцией будет максимальная разность между расчётными характеристиками и задан-

ными требованиями (частотными характеристиками), оптимизируемыми переменными будут проектные параметры $\boldsymbol{x}$.

Создание самой замещающей модели на основе приближённой становится возможным, если последнюю дополнить выравнивающей процедурой, согласующей её с точной моделью. Это также оптимизационная задача, в которой целевая функция – максимальная разность между откликами точной и приближённой моделей $\max\|R_{\text{ТМ}}(x) - R_{\text{ПМ}}(x,p)\|$, оптимизируемые переменные – согласующие (подгоночные, выравнивающие) параметры $\boldsymbol{p}$.

Метод «отображений пространств проектных параметров» (ОП^3, space mapping – SM) [1]. Одним из подходов в методологии замещающего моделирования является метод ОП^3 (SM), позволяющий создавать замещающую модель, более быстродействующую, чем «*точная*» («fine») модель и, по крайней мере, столь же точную, как основная «*грубая*» («coarse») модель. Метод ОП^3 модернизирует замещающую модель до *лучшей аппроксимации* точной модели. Алгоритмы оптимизации на основе метода ОП^3 содержат в основном следующие четыре шага: 1) моделирование с помощью точной модели (верификация); 2) извлечение параметров грубой или замещающей модели; 3) обновление (модернизация, уточнение) замещающей модели; 4) (ре) оптимизация замещающей модели [1].

Метод ОП^3 (SM) был введён в 1994 г. Бандлером и др. [2], где предполагалось линейное отображение между пространствами параметров точной и грубой моделей. Извлечение параметров (ИП, parameter extraction – PE) является ключом при отображении и модернизации замещающей модели. На этом шаге замещающая модель локально выравнивается с данной точной моделью по различным методикам.

С момента разработки концепции оптимального синтеза ОП^3 [2] она успешно применялась к проблемам проектирования в СВЧ-технике [1, 3] и других технических областях. Методика ОП^3 также сочеталась с такими методиками, как искусственные нейронные сети (ИНС) [4], а также линейными регрессионными моделями (ЛРМ).

Среди разработок в области ОП^3 неявные ОП^3 (ISM) являются самой простой в реализации методикой [5]. Здесь не требуется никаких матричных расчётов, и она может легко сочетаться со всеми другими формами ОП^3 и методами.

Метод создания замещающей модели с использованием выравнивающей линейной регрессионной модели (ЛРМ) [6] позволяет строить такие модели, в которых ошибка между приближённой эмпирической и точной электродинамической моделями хорошо скомпенсирована. Предложенные ЛРМ подходы способны заменить методы, основанные на ИНС.

Подход к моделированию СВЧ-устройств на основе **непосредственной** линейно-регрессионной модели (ЛРМ, LRM) (рис. 2), названный в [9] классическим, структурно весьма прост и даже не нуждается в первоначальной эмпирической модели, построенной из физических соображений. Здесь создаётся только одна чисто математическая ЛРМ-модель $R_{\text{ТМ}}(x) \approx R_{\text{ЛРМ}}(x)$, а для поиска ЛРМ-коэффициентов β_i используется отклик точной модели $R_{\text{ТМ}}(x)$. Однако для своей настройки в случае сложных задач этот подход требует весьма большого количества данных, полученных электродинамическим моделированием по точной модели или измерениями, что весьма трудоёмко и затратно по времени.

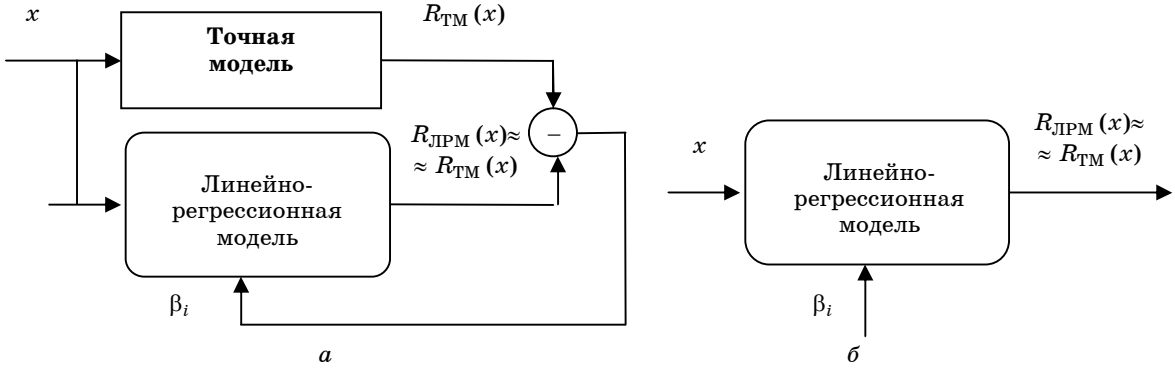

Рис. 2. Непосредственный ЛРМ-подход, в котором приближённая ЛРМ-модель сразу же настраивается под точную. Этапы настройки ЛРМ-модели (*а*) и проектирования (*б*)

Более эффективным является применение **разностного** электромагнитного ЛРМ-метода (ЭМ-ЛРМ, electromagnetic – EM-LRM), в котором аппроксимирующая ЛРМ-модель смещает **выходной** отклик другой первоначальной эмпирической (построенной из

физических соображений) модели $R_{ТМ}(x) \approx R_{ПМ}(x) + R_{ЛРМ}(x)$. При этом для поиска ЛРМ-коэффициентов β_i используется *разность между откликами* точной и приближенной моделей $R_{ЛРМ}(x) \approx \Delta R(x) = R_{ТМ}(x) - R_{ПМ}(x)$ (рис. 3).

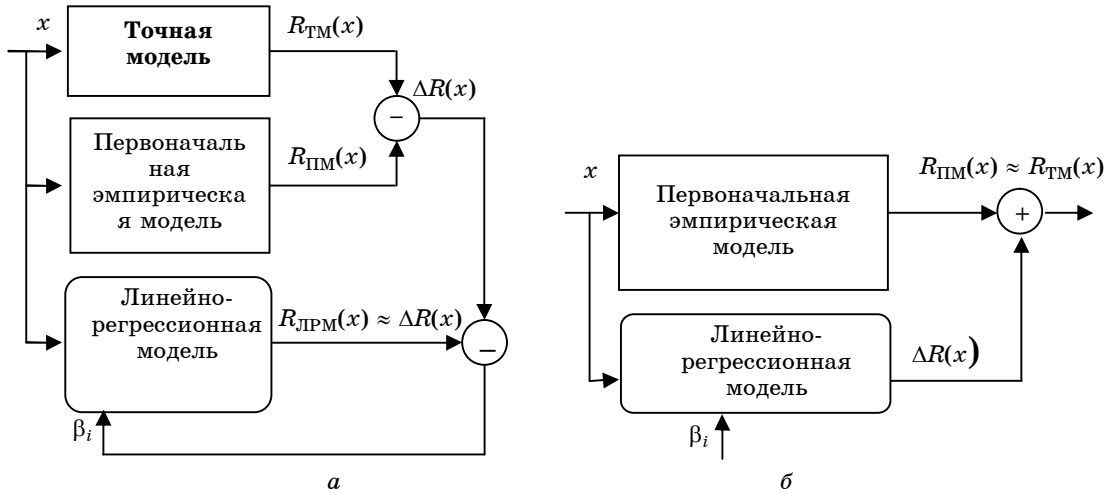

Рис. 3. Разностный электромагнитный ЛРМ-метод моделирования: *а* – этап настройки первоначальной эмпирической модели; *б* – проектирование

Кроме того, приближенная ЛРМ-модель может корректировать и **входные** данные другой приближенной первоначальной модели $R_{ТМ}(x) \approx R_{ПМ}(x') = R_{ПМ}(R_{ЛРМ}(x))$. Этот подход имеет название ЛРМ-модели «с отображением пространств проектных параметров» (ЛРМ-ОП^3, space mapping – SM-LRM) (рис. 4).

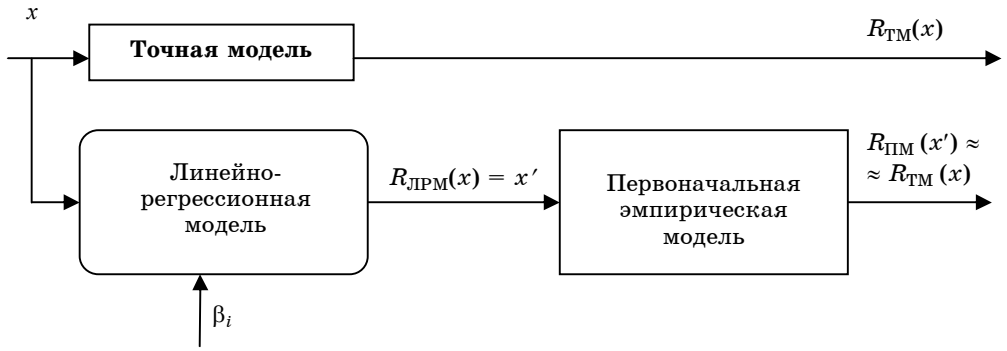

Рис. 4. Метод моделирования ЛРМ «с отображением пространств проектных параметров» (ЛРМ-ОП^3, SM-LRM)

Ещё одна схема метода моделирования на основе ЛРМ-моделей «с априорными знаниями на входе» (ЛРМ-АЗВ, prior knowledge input – PKI-LRM), в котором приближенная ЛРМ-модель корректирует **выходные** результаты другой первоначальной приближенной модели $R_{ТМ}(x) \approx R_{ЛРМ}(x, R_{ПМ}(x))$, показана на рис. рис. 5.

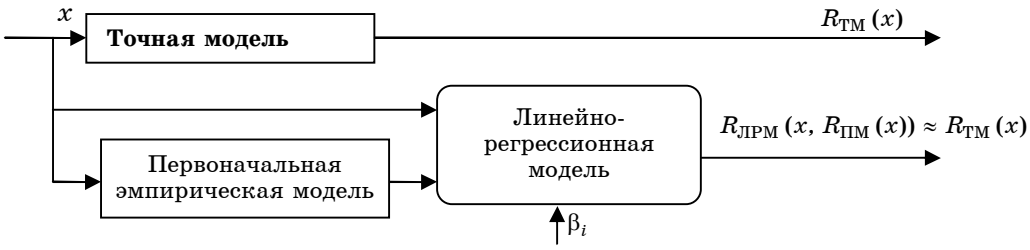

Рис. 5. Метод моделирования ЛРМ «с априорными знаниями на входе» (ЛРМ-АЗВ, PKI-LRM)

Во всех ЛРМ-моделях общий вид полинома (многочлена) записывается следующим образом [9]:

$$R_{\text{ЛРМ}}(x) = \underbrace{\beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i}_{\text{Линейные члены}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^{k} \beta_{ij} x_i x_j}_{\text{Члены взаимодействия}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2}_{\text{Квадратичные члены}} .$$

Обратимся к рассмотрению других публикаций по методам оптимального синтеза (проектирования). Схема проектирования, называемая методом «отображения пространства параметров остаточного отклика» (ОП^{2}О^2, response-residual space-mapping – RRSM) [7], представленная на рис. 6, практически совпадает с показанной выше на рис. 3 схемой разностного электромагнитного метода. Различие заключается лишь в терминологии и обозначениях.

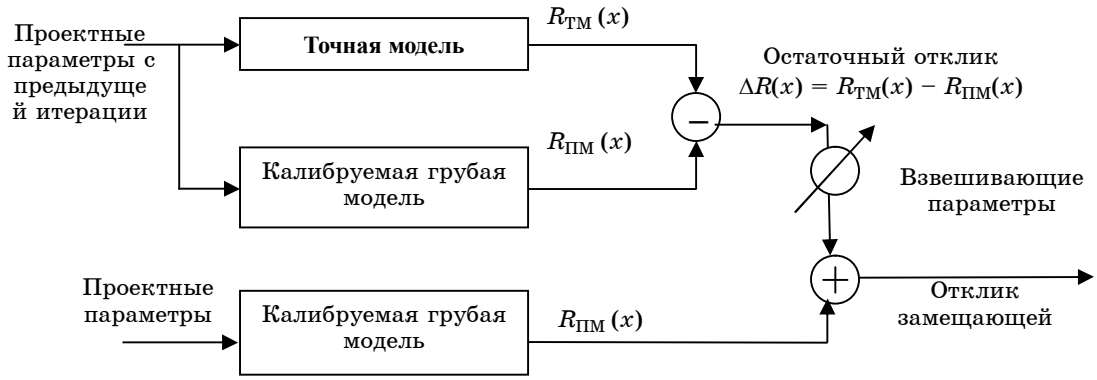

Рис. 6. Иллюстрация метода «отображения пространства параметров остаточного отклика» (ОП^{2}О^2, RRSM)

Ещё одна схема комбинированного подхода замещающего моделирования базируется на сочетании двух методов – метода «неявных отображений пространств проектных параметров» (НОП^3, implicit space mapping – ISM) и метода «выходных отображений пространств проектных параметров» (ВыхОП^3, output space mapping – OSM) [8] и показана на рис. 7. Здесь замещающую модель (обведена штриховой линией) калибруют на основе точной модели с использованием входных предопределённых параметров $\boldsymbol{p}$ (например, диэлектрической постоянной) и отображающих параметров выходного отклика – масштабирующей матрицы α и вектора сдвига β.

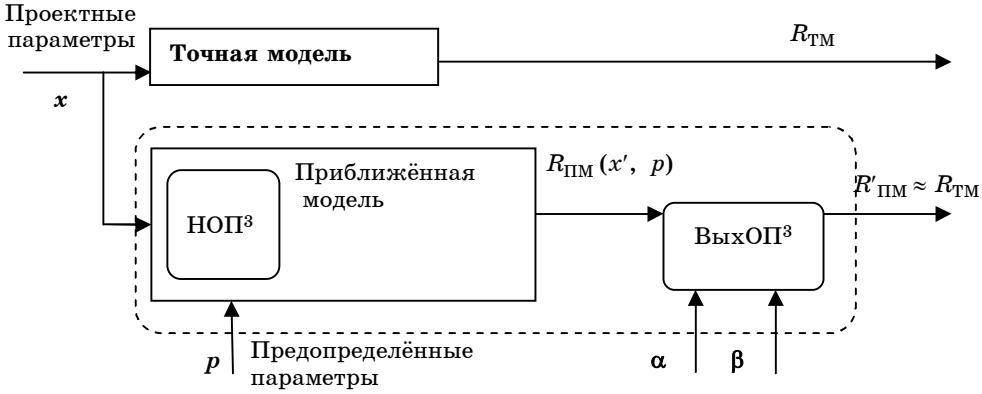

Рис. 7. Концепция неявных ОП^3 (ISM) и выходных ОП^3 (OSM)

Метод нейронных сетей. Методы моделирования СВЧ-устройств с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) [4, 9] сочетают вычислительную эффективность «*грубых*» моделей и высокую адекватность точных моделей. Они снижают стоимость необходимых данных, улучшают общие возможности и годятся для моделирования новых приборов. Однако существуют некоторые аспекты этих подходов, которые требуют существенного опыта: нахождения оптимального набора внутренних параметров ИНС, наиболее подходящего количества итераций, обучающего алгоритма и т.п.

Итак, методы построения замещающих моделей весьма разнообразны – это метод ОП^3 и все его модификации, различные варианты ЛРМ-метода, метод нейронных сетей,

а также различные комбинации всех вышеперечисленных подходов. Наиболее эффективным и достаточно простым видится метод ЛРМ.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., проект П669 «Проведение поисковых НИР по направлению «Микроэлектроника» в рамках мероприятия 1.2.1».

Литература

1. Space mapping: The state of the art / J.W. Bandler, Q.S. Cheng, S.A. Dakroury et al. // IEEE Trans. – 2004. – Vol. MTT-52, № 1. – P. 337–361.

2. Space mapping technique for electromagnetic optimization / J.W. Bandler, R.M. Biernacki, S.H. Chen et al. // IEEE Trans. – 1994. – Vol. MTT-42, № 12. – P. 2536–2544.

3. Cheng Q.S. Combining coarse and fine models for optimal design / Q.S. Cheng, J.W. Bandler, S. Koziel // IEEE Microwave Magazine. – 2008. – Vol. 9, № 1 (February). – P. 79–88.

4. Rayas-Sanchez J.E., Gutierrez-Ayala V. EM-based Monte Carlo analysis and yield prediction of microwave circuits using linear-input neural-output space mapping / J.E. Rayas-Sanchez, V. Gutierrez-Ayala // IEEE Trans. – 2006. – Vol. MTT-54, № 12. – P. 4528–4537.

5. Implicit space mapping optimization exploiting preassigned parameters / J.W. Bandler, Q.S. Cheng, N.K. Nikolova et. al. // IEEE Trans. – 2004. – Vol. MTT-52, № 1. – P. 378–385.

6. Empirical model generation techniques for planar microwave components using electromagnetic linear regression models / G. Domenech, J. Hinojosa, J. Martinez, J. Garrigos // IEEE Trans. – 2005. – Vol. MTT-53, №11. – P. 3305–3311.

7. A space-mapping design framework / J.W. Bandler, Q.S. Cheng, D.M. Hailu, N.K Nikolova. // IEEE Tran. – 2004. – Vol. MTT-52, № 11. – P. 2601–2610.

8. Bandler J.W. TLM-based modeling and design exploiting space mapping / J.W. Bandler, A.S. Mohamed, M.H. Bark // IEEE Tran. – 2005. – Vol. MTT-53, № 9. – P. 2801–2811.

9. Zhang Q.J. Artificial neural networks for RF and microwave design – from theory to practice / Q.J. Zhang, K.C. Gupta, V.K. Devabhaktuni // IEEE Trans. – 2003. – Vol. MTT-51, № 4. – P. 1339–1350.

Сычёв Александр Николаевич
Д-р. техн. наук, ст. науч. сотрудник,
проф. каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа
Тел.: 8 (382-2) 41-44-68
Эл. почта: ans@main.tusur.ru

Шестаков Василий Александрович
Аспирант каф. КСУП ТУСУРа
Эл. почта: semper@vtomske.ru

Sychev A.N., Shestakov V.A.

Optimal synthesis of microwave integrated circuits based on surrogate modeling: The state of the art

The general algorithms of optimal synthesis of microwave integrated circuits based on the surrogate modeling are considered. The main techniques for construction of surrogate models (space mapping, linear regression, artificial neural network, etc.) are given and discussed.

Keywords: microwave microelectronics, microwave integrated circuits (IC), optimal synthesis, surrogate model.