

# МЕТОД ОТОБРАЖЕНИЙ ПРОСТРАНСТВ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СВЧ-УСИЛИТЕЛЕЙ

Шестаков В. А., Шеерман Ф. И., Сычев А. Н.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

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

тел.: +7-3822-414717, e-mail: v.a.shestakow@gmail.com

*Аннотация* — Изложен подход к модификации метода отображений пространств проектных параметров, заключающийся в его совместном применении с методом преобразования моделей для оптимизации СВЧ-устройств. Приведены и подробно рассмотрены средства разработки и результаты оптимизации СВЧ-усилителя (2...10) ГГц.

## I. Введение

В настоящее время для проектирования различных СВЧ-устройств широко используются разнообразные методы оптимизации. Одной из основных сложностей в использовании этих методов является достаточно продолжительное время расчета выходных характеристик цепи с помощью методов электромагнитного анализа. В связи с тем, что эти вычисления необходимо проводить каждую итерацию, весьма обоснованно встает вопрос об использовании альтернативных подходов к оптимизации таких устройств.

Достаточно удачным решением этой задачи является применение метода отображений пространств проектных параметров (ОППП — ОП<sup>3</sup>), называемого на Западе методом Space Mapping (SM). Его оригинальный алгоритм был введен в 1994 г. Д. Бандлером и др. в [1], где изначально предполагалось линейное отображение между пространствами параметров точной и приближенной (грубой) моделей.

## II. Алгоритм оптимизации

Моделирование и оптимизация СВЧ устройств на основе теории цепей, а также САПР, использующие эмпирические модели устройств, являются «быстрыми», т.к. аналитические решения или доступные точные производные могут обеспечивать быструю сходимость оптимизации.

Программы ЭМ моделирования являются «долгоиграющими». Обычно они используются для проверки результатов проектирования, однако в рассматриваемом случае они должны эксплуатироваться в процессе оптимизации. Естественно, что лучшее качество (точность) моделирования обуславливает более дорогую прямую оптимизацию. Для сложных проблем эта стоимость может быть существенным препятствием.

Метод ОП<sup>3</sup> решает эту проблему. С помощью создания пространственного отображения получается подходящая замещающая модель («суррогат»). Эта замещающая модель более быстродействующая, чем «точная» («fine») модель и, по крайней мере, столь же точна, как основная «грубая» («coarse») модель. Метод ОП<sup>3</sup> модифицирует замещающую модель до лучшей аппроксимации точной модели.

Алгоритмы оптимизации на основе метода ОП<sup>3</sup> содержат в основном следующих четыре шага [1]: 1) моделирование с помощью точной модели (верификация); 2) извлечение параметров грубой или замещающей модели; 3) уточнение (обновление, модификация) замещающей модели; 4) (ре-) оптимизация замещающей модели.

Извлечение параметров (parameter extraction) является ключевым средством при отображении и уточнении замещающей модели. На этом шаге замещающая модель локально выравнивается с данной точной моделью по различным методикам.

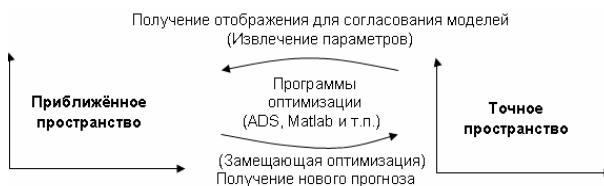


Рис. 1. Реализация концепции отображений пространств проектных параметров.

Fig. 1. Space Mapping techniques realization

С момента разработки концепции оптимального проектирования — концепции отображений пространств проектных параметров [1] (рис. 1) — она успешно применялась к проблемам проектирования в СВЧ технике, а также в других технических областях. В это время было выполнено множество исследований по различным методикам ОП<sup>3</sup> и смежным областям. Методология ОП<sup>3</sup> также сочеталась с такими методиками, как нейронные сети [2].

В данном исследовании использовался компьютерный пакет Space Mapping Toolbox [3] для среды MATLAB. Описание алгоритмов, функций и их параметров подробно изложено в [4]. Пакет содержит шесть основных вариантов реализации метода ОП<sup>3</sup>. Два алгоритма — **smo** и **smon** — основаны на классическом методе ОП<sup>3</sup>. Три алгоритма **smh**, **smho** и **smhc** являются так называемыми гибридными ОП<sup>3</sup>. Последний алгоритм **smis** базируется на ОП<sup>3</sup> с интерполяцией замещающей модели.

Ключевой вопрос при использовании методики ОП<sup>3</sup> — выбор грубой и точной моделей. Понятным и логичным является подход, согласно которому в качестве грубой модели выбирается схема проектируемого устройства на идеальных элементах, а в качестве точной модели — эквивалентная схема, соответствующая физической топологии на монолитных элементах.

Проблема заключается в том, что параметрами идеальной схемы являются значения идеальных элементов — сопротивления, индуктивности, емкости ( $R, L, C$ ), а свойства реальных монолитных элементов, как правило, определяются геометрическими размерами.

Использование методики преобразования моделей (ПМ) позволяет связать между собой две эти группы параметров [6]. Полученные таким образом грубая и точная модели могут использоваться для оптимизации и синтеза схем с использованием ОП<sup>3</sup>, что в конечном итоге позволяет существенно улучшить эффективность проектирования.

Для проверки представленной методики была взята схема (рис. 2) монолитного СВЧ-усилителя с

полосой пропускания (2...10) ГГц, разработанного в [5].

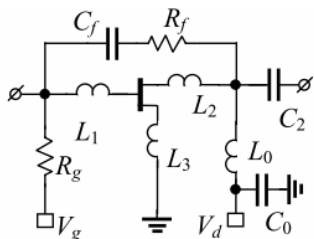


Рис. 2. Схема-прототип СВЧ-усилителя (2...10) ГГц.

Fig. 2. The master diagram of the microwave amplifier 2–10 GHz

Математические модели компонентов схем были реализованы в среде MATLAB. При моделировании полной схемы использовалась матричная теория многополюсников [6].

При оптимизации в диапазоне частот (2...10) ГГц целевая функция формировалась с учетом удовлетворения следующих требований: 1)  $|S_{11}| < -10$  дБ, 2)  $|S_{21}| > 10$  дБ; 3)  $|S_{22}| < -10$  дБ.

Приведем результаты сравнения методов ОП<sup>3</sup> и прямой классической оптимизации **classic**. В табл. 1 приведены полученные значения целевой функции для каждого из исследуемых алгоритмов оптимизации, а на рис. 3 – результаты оптимизации СВЧ-усилителя в частотном диапазоне (0...12) ГГц с использованием алгоритма **smho**.

Табл. 1. Значения целевой функции после оптимизации

Table 1. Objective function after optimization

| classic               | sno                  | smon                 | smh                  | smho | smhc                 |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------|----------------------|
| $5.792 \cdot 10^{-6}$ | $3.25 \cdot 10^{-5}$ | $2.86 \cdot 10^{-5}$ | $1.90 \cdot 10^{-6}$ | 0    | $1.62 \cdot 10^{-5}$ |

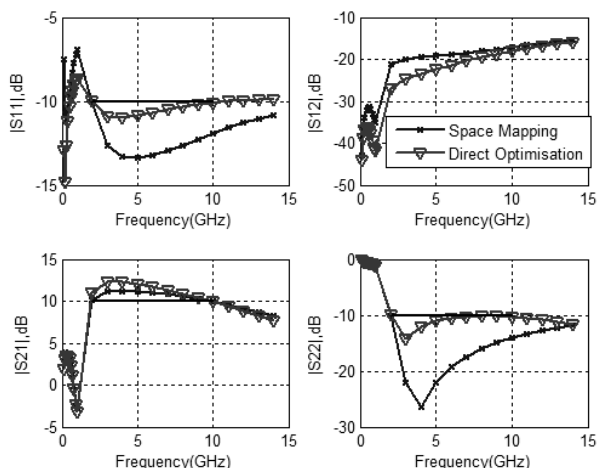


Рис. 3. Частотные зависимости S-параметров усилителя после оптимизации.

Fig. 3. S-parameter frequency response of the amplifier after optimization

Для проверки точности построенных моделей и алгоритмов оптимизации, результаты моделирования сравнивались с результатами, полученными в среде AWR Microwave Office. Полученные характеристики оказались практически идентичными.

Численные исследования показали, что применение ОП<sup>3</sup> позволяет сократить количество моделируемых точной модели в 3–8 раз без существенного ухудшения получаемого решения. Также при определенных начальных условиях сочетание двух методик — ОП<sup>3</sup> и преобразования моделей — позволяет получить лучшие результаты, чем в случае использования только одной классической оптимизации.

### III. Заключение

В результате данной работы с использованием комбинированного подхода, сочетающего метод ОП<sup>3</sup> и методику преобразования моделей был выполнен параметрический синтез СВЧ-усилителя с полосой пропускания (2...10) ГГц. Полученные частотные характеристики S-параметров удовлетворили всем заданным требованиям по усилению и согласованию.

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», а также грантом РФФИ.

### IV. Список литературы

- [1] Space mapping technique for electromagnetic optimization / J. W. Bandler, R. M. Biernacki, S. H. Chen et al. // IEEE Trans. 1994. Vol. MTT-42. No. 12. P. 2536–2544.
- [2] Сычев А. Н., Шестаков В. А. Оптимальный синтез интегральных СВЧ-устройств на основе замещающего моделирования. Обзор // Доклады Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2010. № 2(22). Ч. 1. С. 81–85.
- [3] Madsen K. Space Mapping Toolbox [Technical University of Denmark]. URL: <http://www2.imm.dtu.dk/~km/SpaceMappingToolbox.html> (дата обращения: 18.05.2011).
- [4] Madsen K., Søndergaard J. Convergence of hybrid Space Mapping algorithms // Optimization and Engineering. 2003.
- [5] Design of a 2-10 GHz feedback MMIC LNA using "visual" technique / M. V. Cherkashin, D. Eyllier, L. I. Babak, L. Billonnet, et al. // Proc of 35th European Microwave Conf. (Paris, October 2005). P. 1153–1156.
- [6] Шейрман Ф. И. Проектирование СВЧ монолитных интегральных устройств на основе преобразования моделей элементов: дис. ... канд. техн. наук. Томск: ТУСУР, 2007. 250 с.

## SPACE MAPPING TECHNIQUE AND ITS APPLICATION FOR OPTIMIZATION OF THE MICROWAVE AMPLIFIERS

Shestakov V. A., Sheyerman F. I., Sychev A. N.  
Tomsk State University of Control Systems  
and Radioelectronics  
40, Lenin Ave., Tomsk, 63450, Russia  
Ph.: +7-3822-414717,  
e-mail: v.a.shestakow@gmail.com

**Abstract** — The approach for modification of the Space Mapping and its joint application with the model transformation method for optimization of microwave devices is presented. The development tools and the results of the optimization of the microwave amplifier of 2÷10 GHz are presented and discussed in details.