

Реализации симметрии и сегментированных линий в алгоритме синтеза топологии СВЧ-коммутаторов

А.С. Сальников, Д.В. Билевич, А.А. Метель, А.А. Калентьев

Томский университет систем управления и радиоэлектроники, 50ohm Lab

Аннотация: в данной работе представлен алгоритм синтеза топологии СВЧ-коммутатора. Особенности алгоритма являются симметрия топологии и широкий диапазон варьирования топологии длинных линий. Показан результат синтеза топологии СВЧ-коммутатора диапазона частот 20-30 ГГц на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии.

Ключевые слова: СВЧ МИС, синтез топологии, СВЧ-коммутатор, SPDT

1. Введение

Синтез СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) позволяет ускорить проектирование, повысить производительность труда и расширить разнообразие схем. В данной работе будет рассмотрен синтез топологии. Активно исследуются методики синтеза топологии кремниевых аналоговых и радиочастотных схем [1], однако для GaAs СВЧ-схем потребуется, как минимум, значительная доработка данных подходов.

В данной работе рассматривается синтез топологии СВЧ-коммутатора — устройства, в котором управляющее напряжение задает путь распространения СВЧ-сигнала. Ограничим рассмотрение коммутаторами с одним входом и двумя выходами (SPDT, он англ. Single Pole Double Throw), а также симметричной структурой устройства.

Обзор литературы показывает, что в СВЧ-коммутаторах длинные линии передачи часто используются для согласования. В качестве примера на рисунке 1 приведена принципиальная схема СВЧ-коммутатора диапазона частот 24-27 ГГц с возвратными потерями не более минус 20 дБ и вносимыми потерями не более 1,5 дБ из работы [2].

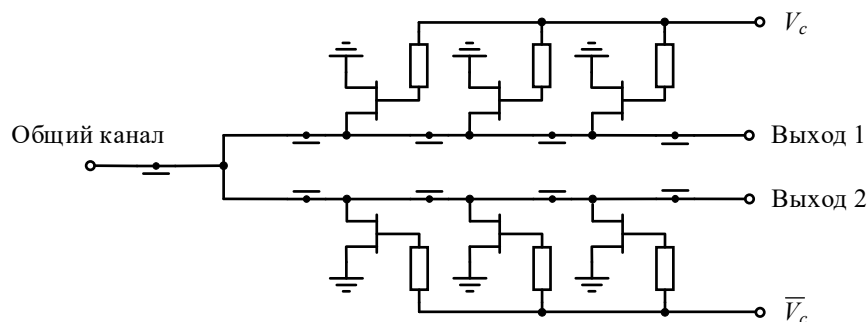


Рисунок 1. Пример электрической схемы коммутатора [2].

Таким образом, предлагаемая методика должна обеспечить синтез симметричной топологии и гибкую настройку длинных линий. Для синтеза симметричной топологии широко используется подход, при котором симметрия заданных элементов указывается в целевой функции при оптимизации [3]. Другой метод заключается в синтезе только одной половины схемы и отражении результата [4]. Для определения симметричных элементов схемы может использоваться искусственная нейронная сеть на основе графа [5]. При работе с длинными линиями можно синтезировать произвольную топологию, но задать ограничение на длины

линий в целевой функции при оптимизации [6]. Также шаблоны линий с изгибами используют в оптимизации с помощью генетического алгоритма: тип шаблона и длины сегментов выступают оптимизируемыми параметрами [7].

2. Разработка методики синтеза топологии

Ранее авторами настоящей статьи была предложена методика синтеза топологии и верифицирована на примере секции ступенчатого аттенюатора [8]. Синтез топологии выполняется по заданной электрической схеме, информация о топологии отдельных элементов извлекается из библиотеки элементов (PDK), также задаются ограничения на размещение, например, минимальные расстояния между элементами. Методика основана на комбинации алгоритмов: генетического, имитации отжига и имитации отжига с эффектом памяти. Для ускорения синтеза генерируется первое приближение по шаблону. Подробно методика описана в работе [9]. В данном разделе описаны модификации ранее предложенной методики.

А Синтез симметричной топологии

Для синтеза симметричной топологии элементы вручную делятся на две группы. Каждый из симметричных элементов имеет пару, которая расположена зеркально от него относительно оси симметрии. Несимметричные элементы размещаются на оси симметрии. На рисунке 1 несимметричные элементы — входной порт общего канала и длинная линия, подключенная к нему, а симметричные элементы находятся в плечах коммутатора.

Размещение выполняется в три этапа. На 1-м этапе размещается половина симметричных элементов, все элементы размещаются строго справа от оси симметрии. Для данных элементов выполняется синтез топологии. На 2-м этапе генерируется зеркальная копия ранее полученной топологии, координаты элементов фиксируются. На 3-м этапе размещаются только несимметричные элементы.

В реализованном подходе вычислительная сложность алгоритма уменьшается за счет сокращения поискового пространства на каждом из этапов. Это повышает сходимость алгоритма и вероятность найти решение, удовлетворяющее критериям.

Б Вариация длинных соединительных линий

В СВЧ-цепях длинные линии могут использоваться в качестве элементов согласования, поэтому при разработке топологии необходимо сохранить их длину. В первой версии методики для длинных линий использовались шаблоны. Шаблоны имеют низкую вариативность и не позволяют вписать линии при плотном размещении элементов.

Чтобы повысить вариативность топологии длинных линий, применен метод сегментации линий. Каждая длинная линия представляется в виде последовательности сегментов. Пусть некоторая линия имеет длину l_{TL} и разбивается на набор сегментов $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, где n — число сегментов. Чтобы оценить n , зададимся минимальной длиной сегмента $l_{S_{min}}$, меньше которой разбивать линию нецелесообразно. Тогда максимально возможное число сегментов:

$$n_{max} = \left\lceil \frac{l_{TL}}{l_{S_{min}}} \right\rceil. \quad (1)$$

Алгоритм варьирует число сегментов от 1 до n_{max} . Обозначим длину сегмента S_i как l_{Si} . Длины всех сегментов могут варьироваться. Однако, чтобы суммарная длина линии сохранялась, для последнего сегмента длина рассчитывается:

$$l_{Sn} = l_{TL} - \sum_{i=1}^{n-1} l_{Si}. \quad (2)$$

Обозначим точку начала сегментированной линии как (x_0, y_0) . Далее введем множество направлений линий $D = \{\leftarrow, \uparrow, \rightarrow, \downarrow\}$, направление каждого сегмента d_i принимает одно из значений этого множества. Тогда для кодирования сегментированной линии потребуется множество значений $SL = \{l_{TL}, x_0, y_0, d_1, l_{S1}, d_2, l_{S2}, \dots, d_n\}$. Визуально данные параметры представлены на рисунке 2.

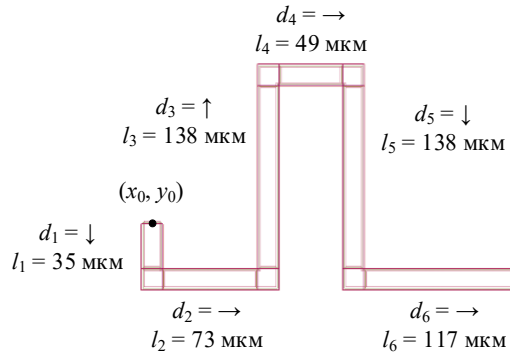


Рисунок 2. Пример сегментированной линии и ее параметров.

Далее кодирующее сегментированную линию множество SL преобразуется в хромосому и используется в генетическом алгоритме, выполняющем синтез топологии. Сегментированные линии позволяют более эффективно использовать площадь кристалла, добавляют вариативность получаемых решений, однако увеличивают поисковое пространство и повышают вычислительную сложность.

3. Эксперимент

В данном разделе приведены результаты численных экспериментов по синтезу топологии 20-30 ГГц SPDT СВЧ-коммутатора на основе отечественной 0,25 мкм GaAs рНЕМТ технологии (АО «Светлана-Рост», г. Санкт-Петербург). При проектировании учитывались такие параметры, как вносимые потери (IL), возвратные потери выходов (RL) и общего канала (RL_{com}), развязка (ISO) и уровень входной мощности в точке однодецибельной компрессии (IP_{1dB}). Электрическая схема СВЧ-коммутатора представлена на рисунке 3.

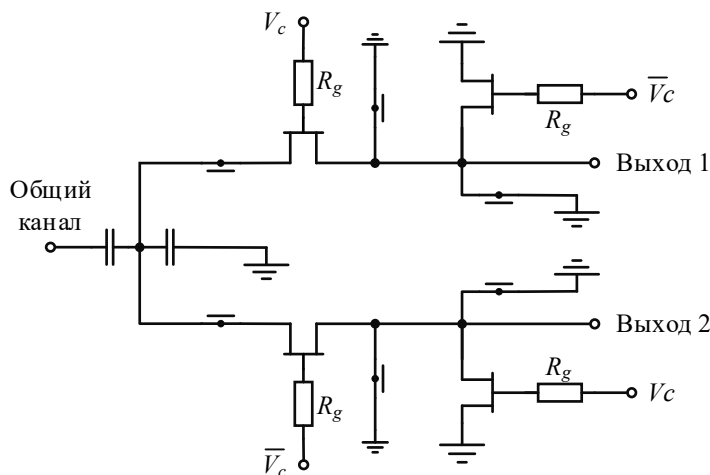


Рисунок 3. Принципиальная электрическая схема СВЧ-коммутатора.

Далее запущен разработанный алгоритм синтез топологии. Время работы алгоритма составило около четырех часов. Полученный результат был экспортирован в САПР и проведено моделирование характеристик с использованием моделей из

библиотеки элементов 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии АО «Светлана-Рост». Результаты моделирования показали, что синтезированная топология не удовлетворяет поставленным требованиям, однако небольшая доработка позволила это исправить. Оба варианта топологии представлены на рисунке 4.

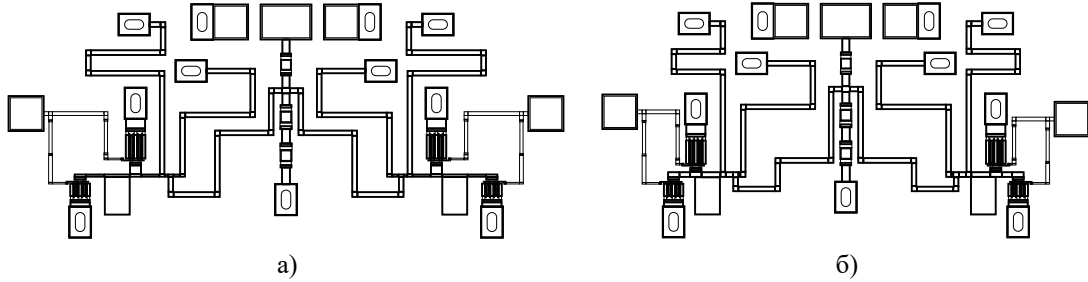


Рисунок 4. Сравнение синтезированной (а) и доработанной (б) топологий.

Результаты моделирования характеристик электрической схемы, синтезированной и доработанной топологий показаны на рисунке 5.

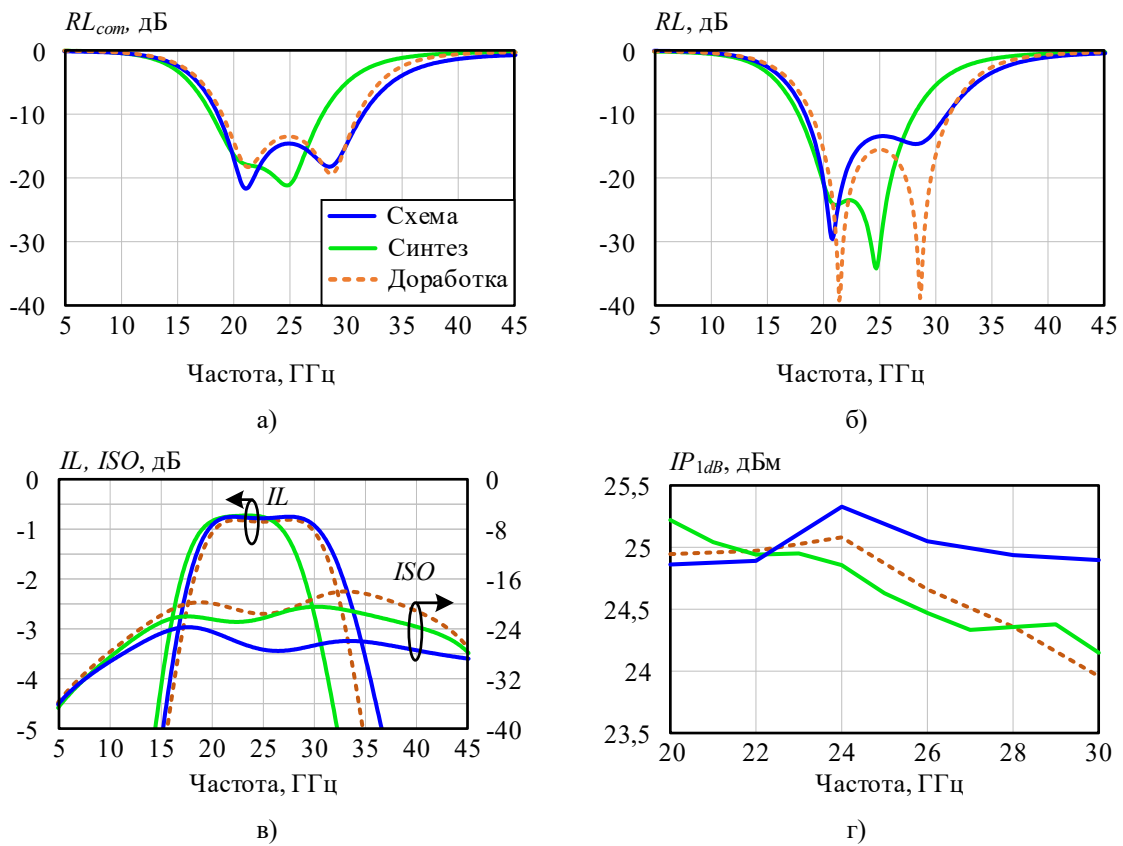


Рисунок 5. Характеристики электрической схем, синтезированной и доработанной топологий.

Сравнение результатов моделирования характеристик электрической схемы, синтезированной и доработанной топологии с требованиями приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики двухпозиционного коммутатора

Параметр	Требования	Электрическая схема	Синтез	Доработка	Единица измерения
Частотный диапазон	20-30	20-30	20-30	20-30	ГГц
Вносимые потери	-1	-0,9	-2,7	-1	дБ
Возвратные потери общего канала	-10	-14,7	-5	-13,5	дБ
Возвратные потери выходов	-10	-13,5	-5	-15,5	дБ
Развязка	-20	-24	-21	-19	дБ
Входная мощность в точке однодецибельной компрессии	24	24,8	24	24	дБм

Результаты моделирования показали, что доработанное решение удовлетворяет поставленным требованиям.

4. Заключение

Ранее предложенная методика синтеза топологии была доработана: добавлена возможность синтеза симметричной топологии и более гибкое варьирование длинных линий. Был проведен численный эксперимент по синтезу топологии 20-30 ГГц SPDT СВЧ-коммутатора на основе отечественной 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии. Характеристики полученного коммутатора были улучшены в процессе ручной доработки. Дальнейшие исследования направлены на совместное применение синтеза схемотехнического решения и топологии СВЧ-коммутатора, что позволит выполнить полный цикл автоматического проектирования устройства.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда № 19-79-10036, <https://rscf.ru/project/22-79-41023/>**

Список литературы

1. Martins R. et al. An Essay on the Next Generation of Performance-driven Analog/RF IC EDA Tools: The Role of Simulation-based Layout Optimization // International Conference on SMACD and 16th Conference on PRIME. – VDE, 2021. – С. 1-4.
2. Zhang L. et al. Design of K/Ka-band passive HEMT SPDT switches with high isolation // China Semiconductor Technology International Conference. – IEEE, 2017. – С. 1-3.
3. Lin Y. et al. Are analytical techniques worthwhile for analog IC placement? // Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition. – IEEE, 2022. – С. 154-159.
4. Xiao L. et al. Practical placement and routing techniques for analog circuit designs // International Conference on Computer-Aided Design. – IEEE, 2010. – С. 675-679.
5. Gao X. et al. Layout symmetry annotation for analog circuits with graph neural networks // Proceedings of the 26th Asia and South Pacific Design Automation Conference. – 2021. – С. 152-157.
6. Ou H. C., Chien H. C. C., Chang Y. W. Nonuniform Multilevel Analog Routing With Matching Constraints // Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems. – 2014. – Т. 33, № 12. – С. 1942–1954.
7. Martins R., Lourenco N., Horta N. LAYGEN II—Automatic layout generation of analog integrated circuits // Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems. – 2013. – Т. 32. – №. 11. – С. 1641-1654.
8. Сальников А. С. и др. Автоматизированный синтез схемы и топологии СВЧ МИС на примере секции ступенчатого аттенюатора // Сборник статей XII Всероссийской научно-технической конференции “Электроника и микроэлектроника СВЧ”. – 2023. – С. 193–197.
9. Bilevich D. V. et al. Using Genetic Algorithm and Simulated Annealing with Memory to Solve Layout Synthesis Problem for GaAs MMIC // International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials. – IEEE, 2023. – С. 310-314.