

Синтез топологии интегральных усилительных каскадов СВЧ-диапазона с разделением элементов на функциональные группы

А.С. Сальников^{1,2}, Д.В. Билевич², В.И. Степанов²

¹Томский университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск

²ООО «50ом Технолоджиз», г. Томск

Аннотация: в данной работе представлен алгоритм синтеза топологии усилительного каскада СВЧ-диапазона. Предложен способ, при котором топология разделяется на функциональные группы элементов, которые оптимизируются независимо, и показана его эффективность. Показан результат синтеза топологии однокаскадного усилителя диапазона частот 2-4 ГГц на основе 0,5 мкм GaN pHEMT технологии.

Ключевые слова: СВЧ МИС, синтез топологии, СВЧ-усилитель, усилительный каскад

1. Введение

Проектирование СВЧ интегральных схем — длительный и творческий процесс, во многом зависящий от опыта инженера. Чем выше рабочая частота устройства, тем больше возникает нюансов, которые необходимо учитывать: согласование волнового сопротивления, электромагнитное взаимодействие между элементами, задержка сигнала в линиях передачи, влияние неоднородностей СВЧ-тракта. Тем не менее, современные достижения в области искусственного интеллекта (ИИ), включая методы глубокого обучения, генеративных языковых моделей, распознавание образов и другие, открывают новые возможности автоматизации проектирования СВЧ-схем, которые вполне вероятно появятся в следующих версиях САПР.

В последние несколько лет ИИ интенсивно проникает в сферу проектирования РЧ и СВЧ схем: его применяют для решения задач оптимизации, ускорения расчета характеристик, структурного-параметрического синтеза принципиальных схем, синтеза топологии и автоматизации испытаний [1, 2]. Кроме методов синтеза принципиальных схем, активно разрабатываются подходы к синтезу топологии аналоговых и радиочастотных схем [3]. В качестве существующих методов выделяют шаблонные, оптимизационные, с учетом электрических характеристик, а среди перспективных отмечают применение графовых и генеративно-состязательных искусственных нейронных сетей, генеративные ИИ и большие языковые модели, создание человеко-машинных методов проектирования, обновление моделей в режиме реального времени [4]. В работе [5] задается общая конструкция устройства, однако длины отдельных сегментов топологии варьируются, моделирование ускоряется при помощи суррогатных моделей. В работе [6] для получения топологии используется модель на основе вариационного автокодировщика. В недавно предложенном подходе, названном обратным проектированием, топология не составляется из стандартных элементов, а генерируется произвольным образом и значительно отличается от привычных устройств [7].

Ранее коллектив авторов предложил методы синтеза топологии и применил их для секции ступенчатого аттенюатора [8] и коммутатора [9]. В данной работе исследуется применение разработанных методов и их доработка для применения с целью синтеза топологии усилительных каскадов СВЧ-диапазона.

2. Метод синтеза топологии и разделение элементов на функциональные группы

Метод синтеза топологии подробно описан в работах [8, 10], кратко напомним основные положения. Входными данными для синтеза являются электрическая схема и топологии ее элементов, которые получаются из библиотеки элементов (PDK). Также пользователь задает ограничения, например, минимально допустимое расстояние между элементами, и требования, например, минимизация соединительных линий и площади кристалла. Синтез выполняется в несколько этапов: первое приближение рассчитывается с помощью аналитического алгоритма на основе заданного шаблона устройства, далее топология оптимизируется методом дифференциальной эволюции (ДЭ), далее проводится финальная оптимизация на основе имитации отжига с эффектом памяти (ИОП). После размещения элементов выполняется трассировка модифицированным А* алгоритмом.

В первых применениях разработанного метода [8, 9], число элементов было невелико и не превышало 15, однако время синтеза составляло несколько часов. Проблема заключается в размерности задачи оптимизации, которая растет с числом элементов. Каждый элемент на топологии кодируется тремя переменными: абсциссой, ординатой и геометрическим состоянием (поворот вокруг своей оси и отражение). Значит, размерность задачи равна $3N$, где N – число размещаемых элементов. Число элементов усилительного каскада составляет около 30 (включая сквозные заземляющие отверстия и контактные площадки), и еще больше для многокаскадного усилителя. На рисунке 1 приведены результаты эксперимента по синтезу топологии с разным числом элементов.

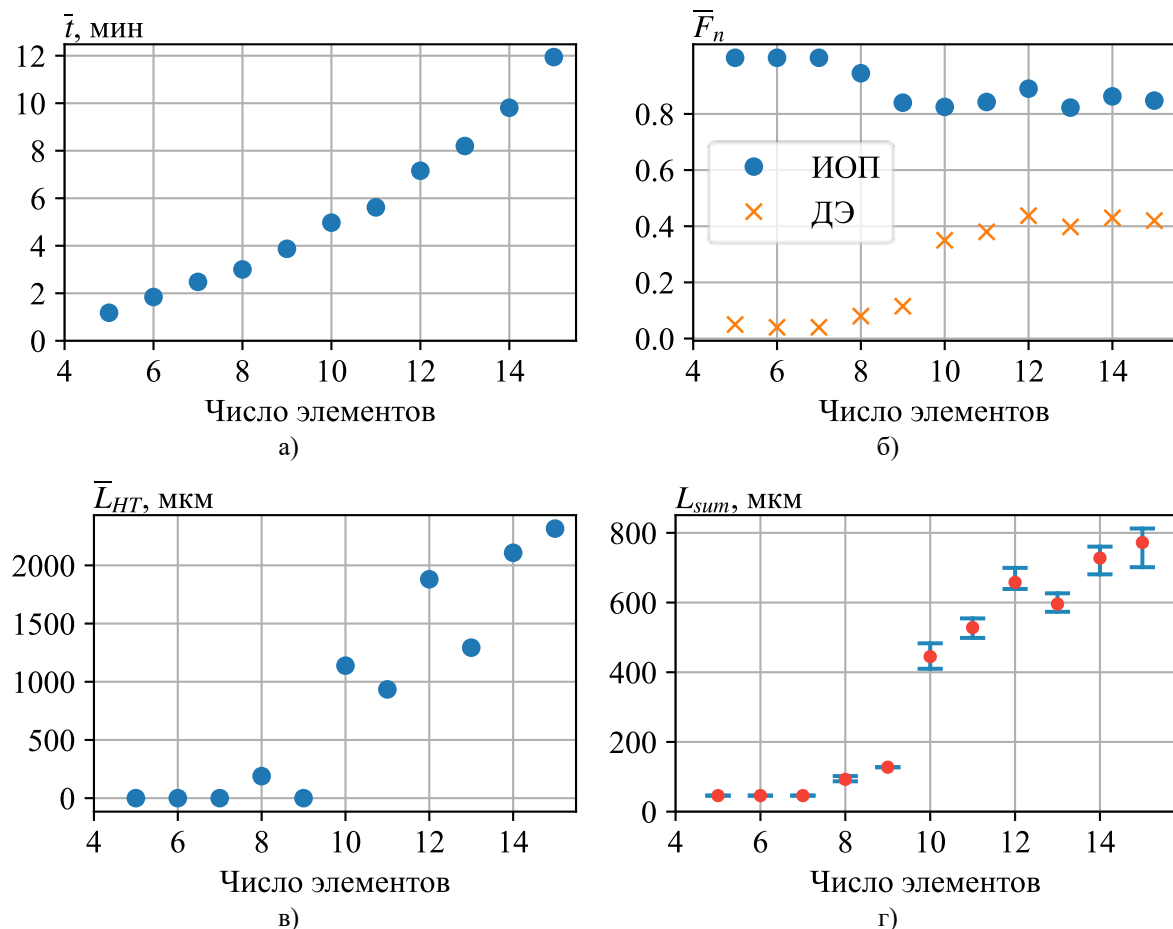


Рисунок 1. Результаты эксперимента по синтезу топологии с разным числом элементов

Для каждого числа элементов проведено 4 эксперимента. Анализ показывает, что

при увеличении числа элементов среднее время синтеза возрастает (рисунок 1а). Нормированное относительно начального приближения значения целевой функции (подразумевается задача минимизации) глобального размещения ДЭ возрастает, значит алгоритм хуже справляется с задачей (рисунок 1б). Алгоритм дополнительной оптимизации ИОП при малом числе не улучшает решения, поскольку найден локальный минимум (рисунок 1б). Увеличивается средняя длина нетрассированных соединений (рисунок 1в). Длина соединительных линий возрастает и появляется разброс значений (рисунок 1г). Результаты подтверждают, что число элементов ухудшает решение, получаемое синтезом топологии.

Для снижения размерности задачи весь усилитель разделяется на функциональные группы, которые могут включать согласующие цепи, цепи обратной связи, цепи питания. Число элементов в каждой группе очевидно меньше и задача решается за приемлемое время. Усовершенствованный метод включает в себя следующие шаги: первое приближение для каждой группы рассчитывается с помощью аналитического алгоритма на основе заданного шаблона устройства, далее топология каждой группы оптимизируется эволюционным алгоритмом, далее группы размещаются относительно друг друга, формируя финальную топологию, далее проводится финальная оптимизация на основе имитации отжига с эффектом памяти. Алгоритм трассировки не меняется при добавлении функциональных групп.

3. Эксперимент

В данном разделе приведены результаты численных экспериментов по синтезу топологии 2-4 ГГц однокаскадного усилителя на основе отечественного 0,5 мкм GaN HEMT технологического процесса (АО «Светлана-Рост», г. Санкт-Петербург). При проектировании учитывались такие параметры, как коэффициент усиления ($|S_{21}|$), коэффициент устойчивости k , коэффициент шума, коэффициенты отражения по входу и выходу ($|S_{11}|$, $|S_{22}|$). Принципиальная электрическая схема усилителя была синтезирована с помощью интеллектуального модуля синтеза 50ohm Tech LNA Designer, она представлена на рисунке 2.

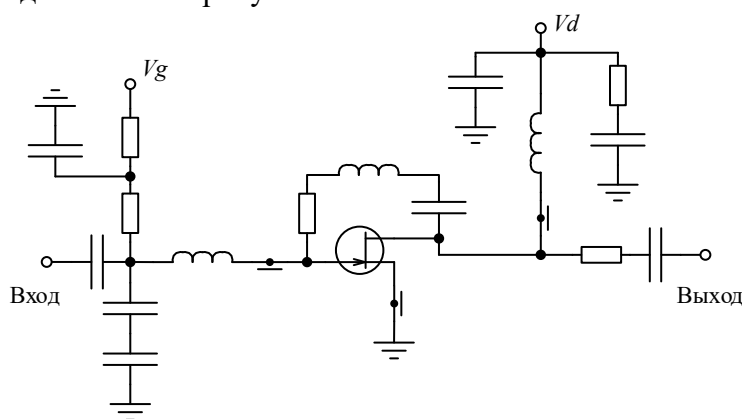


Рисунок 2. Принципиальная электрическая схема усилителя.

Далее запущен разработанный алгоритм синтеза топологии. Получение разнообразия оптимизируемых групп составило около 5 минут, выбор из полученных групп составил около 1 часа, оптимизация топологии с помощью алгоритма ИОП составила 7 часов. Суммарное время работы программы синтеза составило около 8 часов. Синтезированная топология представлена на рисунке 3.

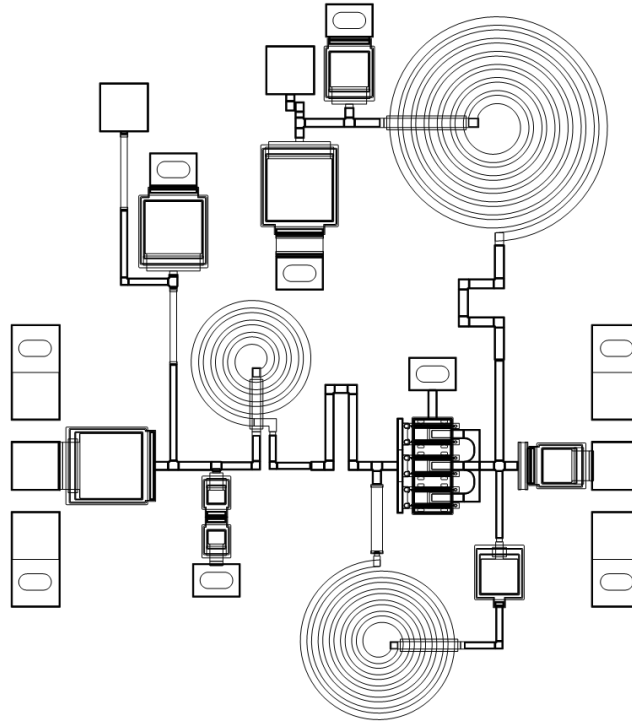


Рисунок 3. Синтезированная топология усилителя.

Полученный результат был экспортирован в САПР и проведено моделирование характеристик с использованием моделей из библиотеки элементов 0,5 мкм GaN НЕМТ технологии АО «Светлана-Рост». Результаты моделирования характеристик электрической схемы и полученной топологии показаны на рисунке 4.

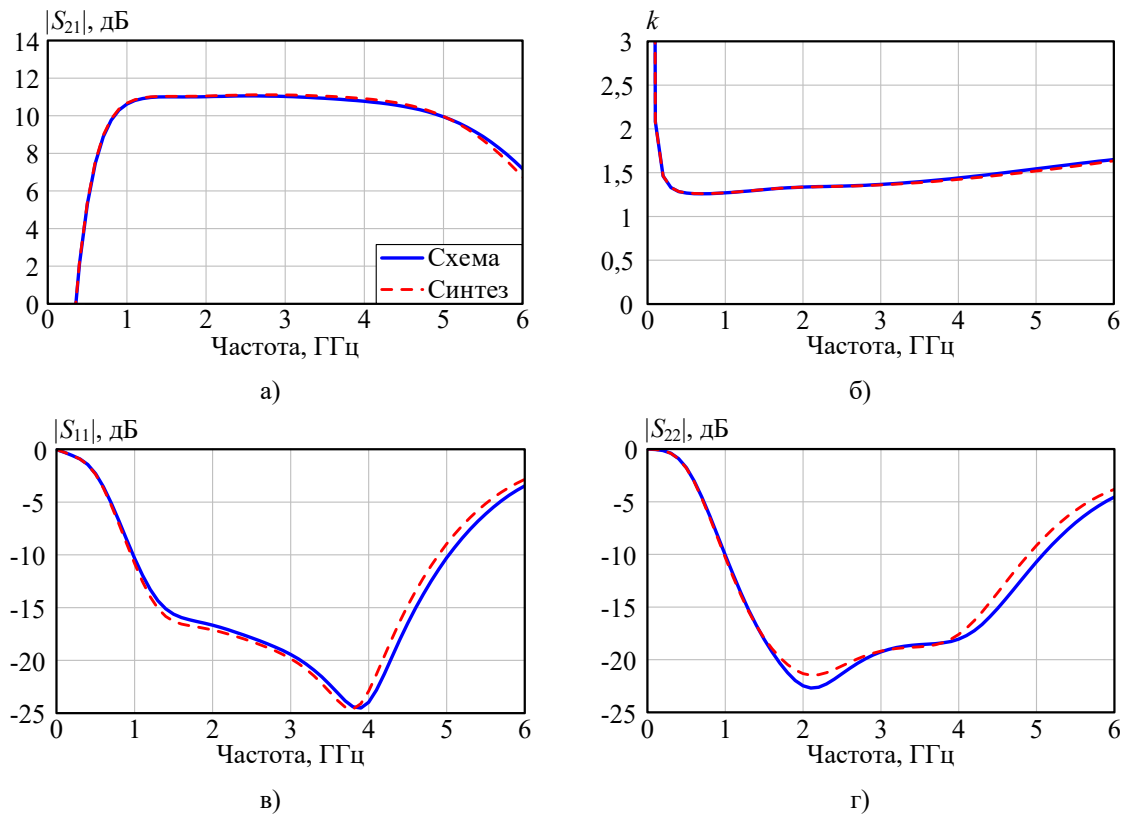


Рисунок 4. Характеристики электрической схемы и синтезированной топологии.

Результаты моделирования показали, что синтезированная топология удовлетворяет поставленным требованиям. Полученное решение отправлено в изготовление.

4. Заключение

Рассмотрен вопрос синтеза топологии СВЧ МИС. Показано, что рост числа элементов быстро приводит к снижению эффективности работы метода. Для преодоления проблемы предложен способ синтеза по функциональным группам элементов с последующим объединением и дополнительной оптимизацией. Был проведен численный эксперимент по синтезу топологии 2-4 ГГц СВЧ-усилителя на основе отечественной 0,5 мкм GaN HEMT технологии. Полученное топологическое решение было отправлено в изготовление.

Список литературы

1. Afacan E. et al. Review: Machine learning techniques in analog/RF integrated circuit design, synthesis, layout, and test // *Integration*. – 2021. – Vol. 77. – P. 113–130.
2. Chae H. et al. ML-Assisted RF IC Design Enablement: The New Frontier of AI for EDA // *30th Asia and South Pacific Design Automation Conference* – Tokyo Japan: ACM, 2025. – P. 683–689.
3. 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* – 2021. – C. 1–4.
4. Wang, C. et al. AI-Enabled Layout Automation for Analog and RF IC: Current Status and Future Directions // *2024 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology*. – Chengdu, China: IEEE, 2024. – C. 1–3.
5. Cai H., Lin W. AI-Assisted Automatic Design Methods for Antennas and RF Circuits Based on Deep Learning // *2024 IEEE International Workshop on Radio Frequency and Antenna Technologies* – Shenzhen, China: IEEE, 2024. – C. 140–142.
6. Wang P.-C. et al. Layout Synthesis of Analog Primitive Cells with Variational Autoencoder // *19th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design*. – 2023. – C. 1–4.
7. Karahan E.A. et al. Deep-learning enabled generalized inverse design of multi-port radio-frequency and sub-terahertz passives and integrated circuits // *Nature Communications*. – 2024. – Vol. 15, No. 1. – P. 10734.
8. Сальников А.С. и др. Автоматизированный синтез схемы и топологии СВЧ МИС на примере секции ступенчатого аттенюатора // *Сборник докладов XII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*. – 2023. – С. 193–197.
9. Сальников А.С. и др. Реализации симметрии и сегментированных линий в алгоритме синтеза топологии СВЧ-коммутаторов // *Сборник докладов XIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*. – 2024. – С. 248–252.
10. Bilevich D.V. et al. Using Genetic Algorithm and Simulated Annealing with Memory to Solve Layout Synthesis Problem for GaAs MMIC // *IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials*. – Novosibirsk, Russian Federation: IEEE, 2023. – P. 310–314.