

# Автоматизированный синтез схемы и топологии СВЧ МИС на примере секции ступенчатого аттенюатора

А.С. Сальников, И.М. Добуш, А.А. Калентьев, А.Е. Горяинов, Д.В. Билевич, Т.Н. Файль

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**Аннотация:** В статье представлены методики синтеза схемы и топологии GaAs СВЧ МИС на примере секции ступенчатого аттенюатора. Для синтеза схемотехнического решения используется подход на основе генетического алгоритма. Основной методикой синтеза схемных решений является формирование модели морфологического множества секций СА и применение дубликата библиотеки элементов. Для синтеза топологии используется комбинация генетического алгоритма и метода имитации отжига с эффектом памяти. Трассировка полученного решения осуществляется с использованием A\* алгоритма. Работа предлагаемых методик проверена при решении задачи синтеза секции ступенчатого аттенюатора с ослаблением 2 дБ в диапазоне частот 0,5-20 ГГц. Синтезированное решение было изготовлено. Измерение параметров устройства показало, что полученное решение удовлетворяет поставленным требованиям.

**Ключевые слова:** ступенчатый аттенюатор, синтез топологии, синтез схемотехнического решения, генетический алгоритм, СВЧ МИС

## 1. Введение

Объем рынка средств беспроводной связи постоянно растет за счет развития таких технологий как сотовая связь, Wi-Fi, Bluetooth, интернет вещей, автомобильные радары и др. В связи с этим сокращается время, отводимое на разработку новых устройств и запуск их в серийное производство. СВЧ монолитные интегральные схемы (МИС) широко используются в качестве компонентной базы таких устройств. Соответственно, востребованы новые методы и средства их проектирования.

Перспективным направлением является автоматизированный синтез электронных устройств [1-5]. Синтез подразумевает получение схемы или топологии электронного устройства по заданным требованиям. Для решения этой задачи широко применяются эволюционные алгоритмы. В частности, в работах [6-8] предложены методики синтеза схемных решений для различных пассивных и активных устройств СВЧ-диапазона. Методы синтеза топологических решений для ВЧ и СВЧ-схем также рассмотрены в литературе [9-12], однако преимущественно ориентированы на кремниевые технологии и в них недостаточно рассмотрены такие элементы СВЧ тракта, как СВЧ-усилители, коммутаторы, ступенчатые аттенюаторы и фазовращатели.

Ступенчатые аттенюаторы являются важным элементом СВЧ-тракта [13]. В таких аттенюаторах ослабление устройства задается внешним управляющим сигналом, что востребовано в автоматизированных измерителях параметров СВЧ-трактов, системы автоматической регулировки уровня мощности, амплитудные модуляторы, формирователях диаграммы направленности и др.

В настоящей работе описан предложенный алгоритм автоматизированного синтеза схемы и топологии СВЧ-устройства. Представленный алгоритм синтеза продемонстрирован на примере разработки СВЧ МИС секции ступенчатого аттенюатора на основе GaAs технологии.

## 2. Методика синтеза схемотехнического решения

МИС ступенчатого аттенуатора (СА) представляет собой каскадное соединение нескольких секций. Наиболее встречаемые решения интегральных СА включают от четырех до семи секций. Под секцией понимается совокупность коммутационных и пассивных элементов (КЭ и ПЭ), обеспечивающих заданный уровень вносимого ослабления. При построении секции можно использовать как единичный КЭ, так и набор КЭ. ПЭ в составе секции выполняют функции ослабления уровня сигнала, согласования, а также минимизации паразитной фазовой конверсии.

Основной созданием методики синтеза схемных решений является формирование модели морфологического множества секций СА, основы подхода подробно описаны в работах [2, 3]. Такая модель позволяет разумно сократить теоретически бесконечное разнообразие схемных решений разрабатываемого устройства.

Методика синтеза секций интегральных СВЧ СА включает следующие основные этапы:

1. Задание требований к комплексу электрических характеристик секции СА.
2. Задание количества используемых коммутационных элементов.
3. Выбор используемых моделей элементов для учета особенностей конкретного технологического процесса на этапе синтеза.
4. Задание количества итераций алгоритма синтеза.
5. Получение структуры и параметров отдельных элементов секции СА.

При расчете характеристик используется дубликат библиотеки элементов [14], что позволяет учесть в синтезе характеристики элементов и иные особенности технологического процесса, на котором будет изготавливаться разрабатываемая интегральная схема. Результатом работы алгоритма является схемотехническое решение секции СА.

## 3. Методика синтеза топологии

Синтезированное схемотехническое решение вместе с основной информацией о топологии отдельных элементов СВЧ МИС является входными данными для синтеза топологии. Кроме того, задаются такие общие параметры, как минимальное расстояние между элементами и соединительными линиями, типовая ширина линии. Задачей методики является получение реализуемой топологии СВЧ-устройства, удовлетворяющей требованиям к электрическим характеристикам. На данном этапе это транслировалось в следующие ограничения целевой функции (ЦФ): отсутствие пересечений элементов, минимальная длина соединительных линий передачи, минимальное число неоднородностей (изгибов и мостов) в соединительных линиях. Эксперименты показали, что с помощью одного метода не удастся эффективно решить данную задачу, поэтому применялась их комбинация.

В предлагаемой методике размещение и трассировка выполняется последовательно. Рассмотрим этап размещения. В качестве первого приближения используется шаблон, который использует априорно известную блок-схему синтезируемого устройства. Размещение выполняется на основе генетического алгоритма (ГА). Хромосома задает набор координат и состояний (угол поворота и отражение по обеим осям) элементов топологии. Эксперименты показали, что ГА уже через 40 поколений теряет разнообразие особей, а снижение ЦФ сильно замедляется. Для решения данной проблемы после ГА запускался алгоритм имитации отжига с эффектом памяти [15]. Его отличие от стандартного алгоритма в том, что сопоставляется информация об изменениях схемы и их влияние на ЦФ, и повышается приоритет изменений, улучшающих решение.

Выполнение описанных алгоритмов позволяет получить качественное решение с точки зрения поставленных выше критериев, что упрощает этап трассировки. Для

трассировки использовался A\* алгоритм [16, 17]. Отличие от стандартного алгоритма заключается в применении окрестности Фон-Неймана (разрешены только вертикальные и горизонтальные соединительные линии), а изгиб линии является менее приоритетным действием.

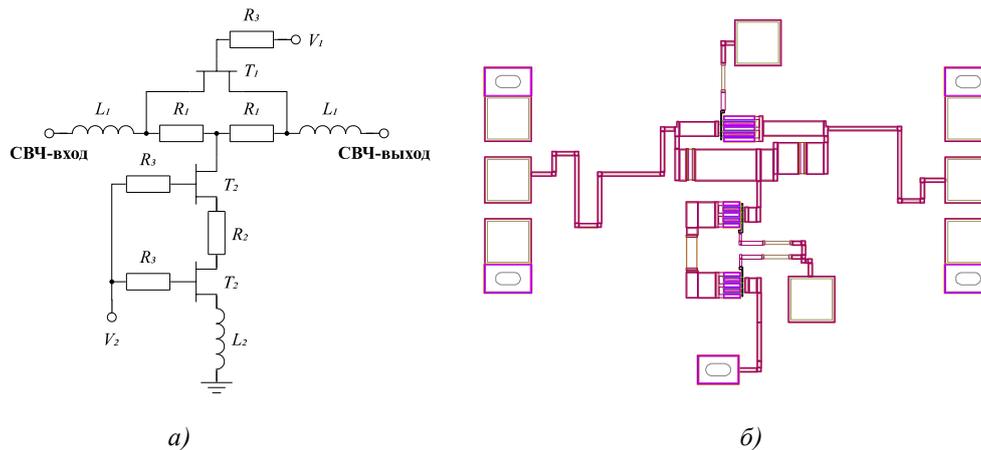
Выходными данными синтеза являются координаты всех элементов, соединительные линии передачи и их неоднородностей (тройников и изгибов). Данная информация передается в САПР для расчета параметров схемы с помощью электродинамического моделирования.

#### 4. Эксперимент

С помощью предлагаемых методик синтеза была разработана и изготовлена широкополосная 2 дБ секция СА диапазона частот 0,5–20 ГГц с компенсацией фазовой ошибки между опорным состоянием и состоянием вносимого ослабления. Проектирование проводилось на библиотеке моделей элементов 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии (АО «Светлана-Рост», г. Санкт-Петербург).

На первом этапе проводился синтез схемотехнического решения для разрабатываемой секции СА. В результате работы алгоритма синтеза схемотехнического решения были получены структуры и параметры элементов для секции СА. Время синтеза секции составило не более 10 минут.

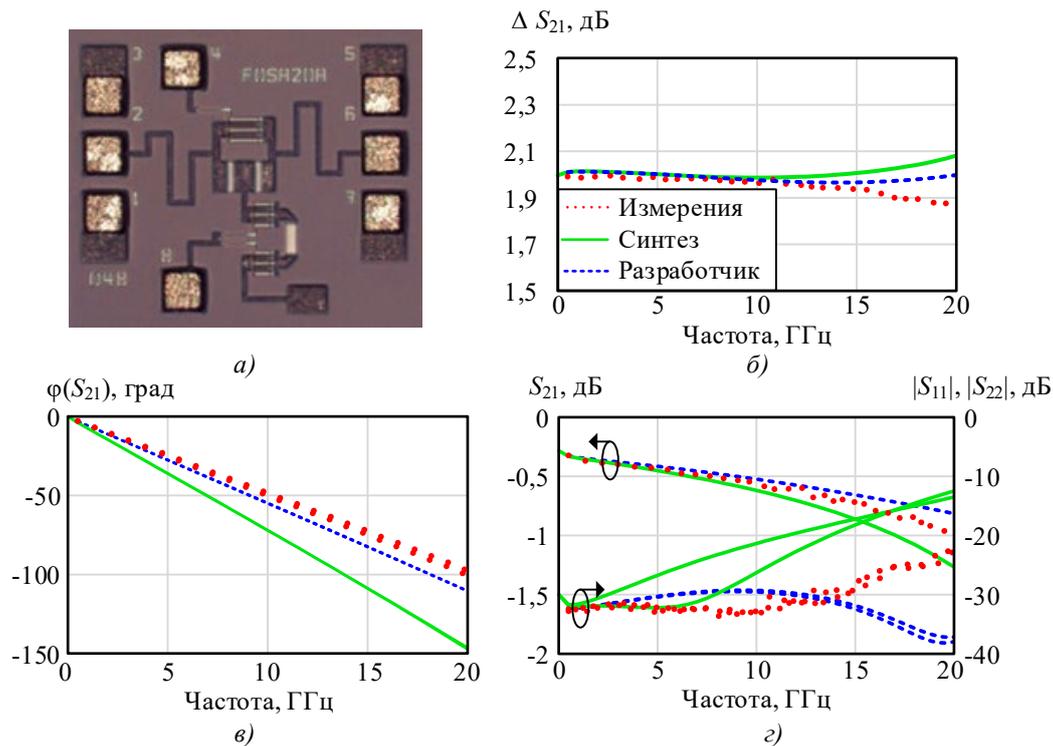
Затем был проведен синтез топологии секции СА. Время синтеза составило около 2 часов. На рисунке 1 представлены результаты работы алгоритма.



**Рисунок 1.** Синтезированное схемотехническое решение (а) и синтезированная топология (б) секции СА с вносимым ослаблением 2 дБ.

Полученная после синтеза топология была доработана инженером вручную, чтобы уменьшить габариты и приблизить характеристики к полученным изначально при схемотехническом синтезе. Например, для синтезированной топологии были характерны высокие уровни возвратных потерь, что не наблюдалось в изначальном схемотехническом решении. Инженеру удалось исправить этот недостаток.

После ручной доработки вносимое ослабление и коэффициент передачи в опорном состоянии стали ближе к изначальным требованиям. Доработанная топология обладает также в 1,5 раза меньшей площадью. Окончательный вариант секции СА после доработки был изготовлен, а ее характеристики измерены. Микрофотография и характеристики полученного решения показаны на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Микрофотография (а), ослабление (б), сдвиг фазы (в), коэффициенты передачи и отражения в опорном состоянии и состоянии ослабления (г) разработанной 2 дБ секции СА.

Результаты сравнения смоделированных характеристик синтезированной топологии, доработанной топологии и результаты измерений изготовленной секции СА 2 дБ с требованиями представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Сравнение результатов моделирования и измерения характеристик секции СА 2 дБ с требованиями

Характеристика	Требования	Синтез схемы	Синтез топологии	Ручная доработка	Измерения
Диапазон рабочих частот, ГГц	0,5 – 20	0,5 – 20	0,5 – 20	0,5 – 20	0,5 – 20
Вносимое ослабление, дБ	2	1,95...2,05	2...2,1	1,95...2,05	1,85...2
Коэффициент передачи в опорном состоянии, дБ	$\leq -1$	-0,8	-1,3	-0,85	-1
Ошибка по фазе, град.	$\leq 5$	2,5	1	0,5	3
Коэффициент отражения по входу, дБ	$-20 \leq$	-20	-13	-20	-19
Коэффициент отражения по выходу, дБ	$-20 \leq$	-21	-12	-21	-20

Измерения показали, что изготовленная структура удовлетворяет заданным требованиям.

## 5. Заключение

Были реализованы методики синтеза схемотехнического решения и топологии СВЧ МИС на основе GaAs. Применимость методик продемонстрирована на примере синтеза секции СА с вносимым ослаблением 2 дБ в диапазоне 0,5-20 ГГц. Синтез схемы занимает менее 10 минут, а топологии – около 2 часов. Таким образом, применением инструментов синтеза позволяет значительно сократить время на

разработку. Характеристики секции СА были улучшены в процессе ручной доработки. Итоговое решение было изготовлено, результаты измерения показывают соответствие поставленным требованиям.

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

#### Список литературы

1. Vye D. Network Synthesis Wizard Automates Interactive Matching Circuit Design //Microwave Journal. – 2018. – Т. 61. – №. 11. – С. 96-102.
2. Kalentyev A. A., Babak L. I., Garays D. V. Genetic-algorithm-based sythesis of low-noise amplifiers with automatic selection of active elements and DC biases //2014 9th European Microwave Integrated Circuit Conference. – IEEE, 2014. – С. 520-523.
3. Акимов С. В. Анализ проблемы автоматизации структурно-параметрического синтеза //Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – №. 2-2 (24). – С. 204-211.
4. Zebulum R. S., Pacheco M. A., Vellasco M. M. B. Evolutionary electronics: automatic design of electronic circuits and systems by genetic algorithms. – CRC press, 2018.
5. Koza J. R. et al. Evolutionary design of analog electrical circuits using genetic programming //Adaptive Computing in Design and Manufacture: The Integration of Evolutionary and Adaptive Computing Technologies with Product/System Design and Realisation. – Springer London, 1998. – С. 177-192.
6. Метель А. А. и др. Автоматизированное проектирование линейных интегральных СВЧ-усилителей с распределенным усилением //Вопросы радиоэлектроники. – 2021. – №. 3. – С. 40-48.
7. Сальников А. С. и др. Автоматизация проектирования блоков для построения СВЧ многофункциональных интегральных схем на основе отечественной 0, 25-мкм GaAs pHEMT-технологии //Наноиндустрия. – 2021. – Т. 14. – №. S7. – С. 413-414.
8. Brito L. C., de Carvalho P. H. P. A general and robust method for multi-criteria design of microwave oscillators using an evolutionary strategy //Proceedings of the 2003 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference-IMOC 2003.(Cat. No. 03TH8678). – IEEE, 2003. – Т. 1. – С. 135-139.
9. Nishino T., Itoh T. Evolutionary generation of microwave line-segment circuits by genetic algorithms //IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2002. – Т. 50. – №. 9. – С. 2048-2055.
10. Vancorenland P. et al. A layout-aware synthesis methodology for RF circuits //IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design. ICCAD 2001. IEEE/ACM Digest of Technical Papers (Cat. No. 01CH37281). – IEEE, 2001. – С. 358-362.
11. Lin M. P. H., Chang Y. W., Hung C. M. Recent research development and new challenges in analog layout synthesis //2016 21st Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC). – IEEE, 2016. – С. 617-622.
12. Afacan E. et al. Machine learning techniques in analog/RF integrated circuit design, synthesis, layout, and test //Integration. – 2021. – Т. 77. – С. 113-130.
13. Кочемасов В., Белов Л. Аттеноаторы с электронным управлением-производители и характеристики //Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2017. – №. 4. – С. 82-95.
14. Novichkova Y. A. et al. Approach to Integration of a Synthesis Tool and PDK for Commercial EDA //2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2021. – С. 24-27.
15. Skaggs R. L., Mays L. W., Vail L. W. Simulated annealing with memory and directional search for ground water remediation design 1 //JAWRA Journal of the American Water Resources Association. – 2001. – Т. 37. – №. 4. – С. 853-866.
16. Khalid A. et al. Improved Global Routing By Using A-Star Algorithm. – 2020.
17. Clow G. W. A global routing algorithm for general cells //21st Design Automation Conference Proceedings. – IEEE, 1984. – С. 45-51.