

УДК 621.375.4

А.Е. Горяинов, Т.Н. Файль, Ю.А. Новичкова, А.А. Калентьев, А.С. Сальников

Применение генетического алгоритма в задаче синтеза линейных интегральных СВЧ-усилителей с распределенным усилением

Описан синтез структуры СВЧ-усилителя с распределенным усилением (УРУ) при помощи генетического алгоритма. Выполнена верификация работы алгоритма и проведено сравнение качества полученных решений с решением, полученным проектировщиком вручную, на задаче синтеза СВЧ УРУ на основе технологии 0,15 мкм GaAs-pHEMT для диапазона частот 1–20 ГГц.

Ключевые слова: СВЧ-усилитель с распределенным усилением, применение генетического алгоритма, структурно-параметрический синтез, синтез СВЧ-усилителей, GaAs-pHEMT.

СВЧ-усилитель с распределенным усилением (УРУ) относится к классу широкополосных усилителей, необходимых в системах высокоскоростной передачи данных и формирования изображений с высоким разрешением, оптоэлектронных и измерительных системах [1]. На рис. 1 представлена обобщенная структурная схема СВЧ УРУ, ее подробное описание приведено в [2]. Количество секций на практике может варьироваться от 2 до 10.

Задачу проектирования усилителей подобной структуры можно свести к комбинаторной задаче, где каждый элемент структуры выбирается из predetermined дискретного набора компонентов. Под набором компонентов в данном случае подразумевается набор схемных решений с известными электрическими характеристиками, которые могут использоваться в одном из блоков обозначенной базовой структуры усилителя. Электрические характеристики таких решений могут быть получены путем моделирования в САПР на основе библиотеки компонентов выбранного технологического процесса.

При классическом подходе к проектированию СВЧ УРУ инженеру необходимо определить из множества вариантов транзистор, используемый в каждом активном блоке (АБ), подобрать входные и выходные согласующие цепи (СЦ), определить параметры линий передач (ЛП). Так как проектирование предполагает перебор различных структур, задачу нельзя свести к обычной параметрической оптимизации. Количество вариантов делает ручной перебор неэффективным, не позволяя определить оптимальное решение.

Так, для четырехсекционного СВЧ УРУ при варьировании 10 транзисторов и 10 вариантов согласующих входных и выходных цепей комбинаторная сложность составляет 10^8 . При добавлении варьирования длин и ширины ЛП между секциями, которое необходимо для обеспечения требуемых характеристик, комбинаторная сложность возрастает многократно. Такая задача слишком велика для перебора и моделирования всех возможных решений, однако может быть решена с помощью генетического алгоритма (ГА).

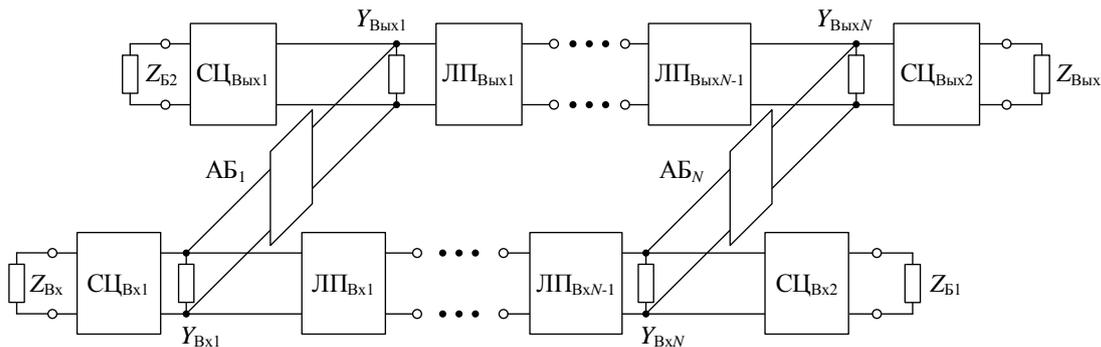


Рис. 1. Обобщенная структурная схема СВЧ УРУ

В [3, 4] описывается применение ГА для синтеза как отдельных СЦ, так и для МШУ. Описанные в работах подходы могут быть применены и к синтезу СВЧ УРУ.

Ключевыми задачами при применении ГА в синтезе устройств являются: представление структуры и параметров цепи для моделирования и кодирования в хромосомах ГА, составление целевой функции для сравнения решений ГА в ходе синтеза, выбор настроек ГА, таких как операции кроссовера, мутации и т.п.

Представление цепи в ГА

Для математического моделирования СВЧ УРУ используется базовая структура, представленная на рис. 1 [5]. Данная структура позволяет представить СВЧ УРУ как каскадное соединение восьмиполусных блоков (рис. 2). Восьмиполусные блоки могут быть нескольких типов: АБ, ЛП, СЦ и балластные нагрузки (Z_B).

Элементы внутри блоков представляются в виде четырехполусников и описываются S-параметрами пассивных и активных компонентов в целевом диа-

пазоне частот. На основе S -параметров четырехполосных элементов составляются A -параметры восьмиполосных блоков. S -параметры всей цепи рассчитываются путем перемножения A -параметров блоков, после чего происходит преобразование восьмиполосных A -параметров цепи в четырехполосные S -параметры.

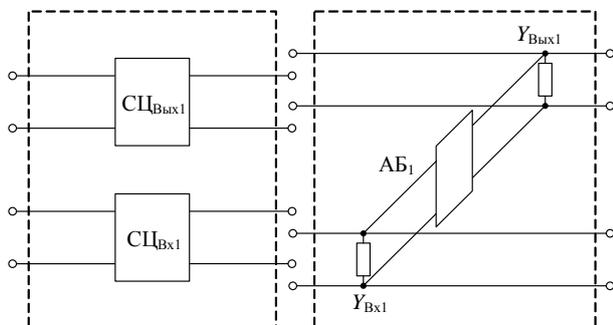


Рис. 2. Представление структуры СВЧ УРУ в виде восьмиполосников

На основе S -параметров рассчитываются целевые характеристики, такие как коэффициент усиления, модули коэффициентов отражения по входу и выходу, коэффициент устойчивости), и осуществляется расчет целевой функции (ЦФ). В качестве исходных S -параметров элементов, используемых внутри блоков цепи, могут быть применены табличные модели в формате файлов Touchstone. Стоит отметить, что в синтезе могут использоваться иные виды моделей, применение табличных моделей обусловлено их быстродействием.

Таким образом, для каждого блока необходимо определить набор табличных моделей, которые допустимы для данного блока. Набор исходных данных полностью определяется пользователем.

Все элементы базовой структуры (см. рис. 1) в ходе синтеза могут варьироваться, также может быть принято решение о том, что компонент, используемый в АБ (транзистор), может быть один и тот же во всех секциях. В зависимости от варьируемых элементов можно по-разному составить хромосому, описывающую структуру и параметры СВЧ УРУ. Длина хромосомы зависит от числа секций. Каждый варьируемый элемент каждой секции записывается в хромосому в виде последовательности генов, которая хранит информацию о номере табличной модели в наборе, используемом для данного блока. Гены представлены в виде двоичной последовательности чисел. Декодирование хромосомы происходит в два этапа: на первом этапе происходит конвертация наборов генов каждого варьируемого элемента в целое число, на втором этапе полученное число преобразуется в порядковый номер загруженных параметров декодируемого компонента цепи. Данную процедуру можно увидеть на рис. 3.

Целевая функция

Все целевые характеристики СВЧ УРУ могут быть рассчитаны на основе S -параметров цепи, это: коэффициент усиления ($|S_{21}|$), модули коэффициентов отражения по входу ($|S_{11}|$) и по выходу ($|S_{22}|$) и

коэффициент устойчивости (k). К каждой характеристике предъявляется требование в виде целевого значения. Расчет значений целевых характеристик происходит в диапазоне частот.

Закодированная хромосома:

$$\{ \underbrace{101010100000}_{СЦ_{Вх}} \underbrace{111101010010}_{Z_{Б1}} \dots \underbrace{11101011\dots1111}_{ЛП_{Вх1}} \dots \underbrace{11101011\dots1111}_{ЛП_{ВхN}} \dots \underbrace{11101011\dots1111}_{ЛП_{Вых1}} \dots \underbrace{11101011\dots1111}_{ЛП_{ВыхN}} \}$$

Этап 1. Преобразование генов в целые десятичные числа:

$$\{ \underbrace{10}_{АБ}; \underbrace{10}; \underbrace{0}; \underbrace{15}; \underbrace{5}; \underbrace{2}; \dots \underbrace{14}; \underbrace{11}; \dots \underbrace{15} \}$$

Этап 2. Преобразование полученных целых чисел в номера, использующихся в схемном решении, компонентов:

$$\{ \underbrace{4}; \underbrace{15}; \underbrace{0}; \underbrace{75}; \underbrace{23}; \underbrace{8}; \dots \underbrace{40}; \underbrace{33}; \dots \underbrace{90} \}$$

Рис. 3. Этапы декодирования бинарной хромосомы

Для каждого значения характеристики на заданном диапазоне частот рассчитываются штрафы. Штраф – это отклонение рассчитанного значения целевой характеристики от её целевого значения на заданной частоте. Таким образом, получаем множества значений штрафов, которые должны быть объединены в единый количественный параметр, значение которого является значением ЦФ текущего схемного решения. Объединение (или свертка) множества штрафов в единое число происходит при помощи так называемых функций свертки, таких как среднее квадратическое отклонение (СКО), минимаксная функция (минимакс), среднее арифметическое значение. Для того чтобы отразить значимость целевой характеристики в целевой функции, вводятся весовые коэффициенты ($W_{|S_{21}|}$, $W_{|S_{11}|}$, $W_{|S_{22}|}$, W_k). С точки зрения проектирования СВЧ УРУ, наибольшую значимость имеют коэффициент усиления и коэффициент устойчивости, в связи с чем их весовые коэффициенты должны быть больше, чем у других характеристик. Выбор весовых коэффициентов влияет на сходимость ГА и остается на усмотрение проектировщика.

Ниже приведена общая формула расчета штрафов с учетом весов.

$$s = |N_{рас}(f_i) - N_{тр}(f_i)| \cdot W, \quad (1)$$

s – значение штрафа характеристики на заданной частоте; f_i – частота расчета из целевого диапазона; где $i \in \{1, n\}$; $N_{рас}$ – рассчитанное значение характеристики; $N_{тр}$ – требуемое значение характеристики; W – коэффициент веса характеристики.

Целью ГА является поиск схемного решения, обеспечивающего наименьшие штрафы по всем целевым характеристикам во всем целевом диапазоне частот. Другими словами, ГА направлен на поиск решения, ЦФ которого равна нулю.

Проведение синтеза

В реализации данного алгоритма использовались следующие настройки ГА: равновероятная му-

тация с коэффициентом мутации 0,1, одноточечный кроссовер, элитарная селекция, минимаксная функция свертки, размер популяции 100, условие останки синтеза по достижении 5 000-й итерации.

Для верификации алгоритма была поставлена задача синтеза четырехсекционного СВЧ УРУ со следующими характеристиками: $|S_{21}| = (11 \pm 0,5)$ дБ, $|S_{11}| < (-10)$ дБ, $|S_{22}| < (-10)$ дБ и $k > 1$. Значения усиления и коэффициентов отражения по входу и выходу должны удовлетворять заданным условиям в диапазоне от 1 до 20 ГГц, а коэффициент устойчивости – во всем имеющемся частотном диапазоне. В ходе синтеза выполняется варьирование элементов в схеме (рис. 4), в частности, варьирование 10 рабочих токов транзисторов T_N , варьирование длины и ширины у ЛП TL_N (90 комбинаций) и СЦ C_N и R_N (10 комбинаций). Элементы представлены табличными моделями в виде Touchstone-файлов, по 600 частотных точек (от 0,1 до 60 ГГц), которые были получены путем моделирования в САПР на основе библиотеки компонентов 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии. В ходе текущей верификации во всех секциях для активного блока использовался один транзистор. Для оценки качества результата синтеза полученные решения будут сравниваться с решением, полученным проектировщиком вручную (используя аналогичные наборы элементов).

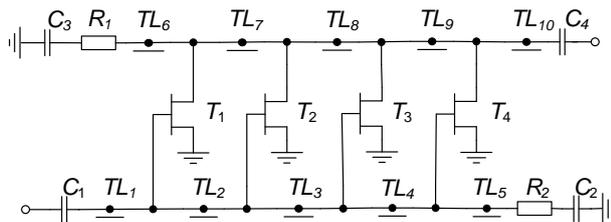


Рис. 4. Принципиальная схема УРУ по СВЧ-сигналу

В ходе верификации работы алгоритма было осуществлено 100 запусков по 5 000 итераций в каждом. Каждый запуск в среднем длился 13 мин. В результате 100 запусков 12 запусков дали положительный результат, все целевые характеристики удовлетворяют заданным требованиям. 34 запуска дали результат, значения целевых характеристик которого близки к требованиям. На 54 запусках ожидаемое решение не было получено. Стоит отметить, что полученные положительные решения не повторяют друг друга – алгоритм находит различные решения, что даёт проектировщику возможность дальнейшего выбора наилучшего решения с точки зрения критериев физической реализуемости. На рис. 5–7 приведены характеристики некоторых из полученных решений, при которых удалось получить требуемый результат, а на рис. 8–10 приведено решение, полученное проектировщиком. Как можно заметить, качество решений, полученных с помощью ГА, не уступает решению проектировщика. Градациями серого на графиках 5–7 отмечены графики характеристик различных схемных решений.

Также был проведен численный эксперимент с синтезом СВЧ УРУ с разным набором весовых ко-

эффициентов. Для каждого набора выполнялось по 15 запусков. Цель эксперимента – определить значения весовых коэффициентов, обеспечивающих наилучшую сходимость. В таблице приведены результаты эксперимента, в котором для пары весовых коэффициентов ($W_{|S_{21}|}$, W_k) подсчитано среднее значение ЦФ.

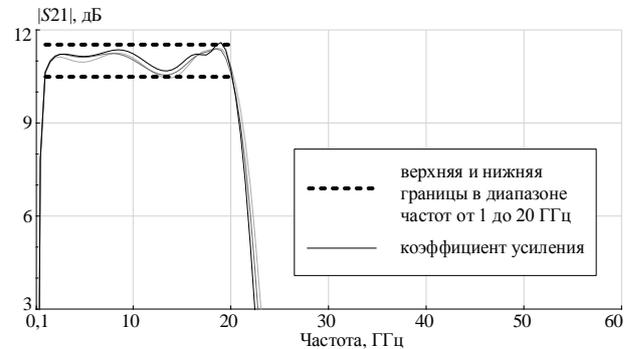


Рис. 5. График коэффициента усиления трёх полученных схемных решений

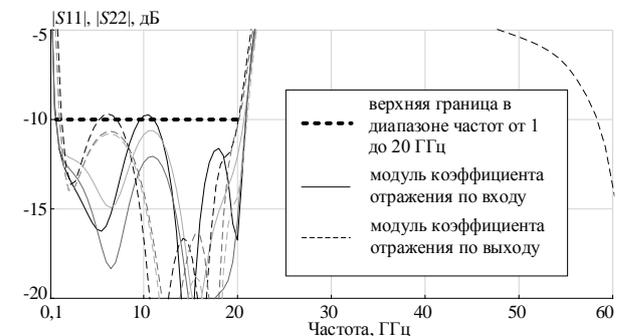


Рис. 6. График модулей коэффициентов отражения по входу и по выходу трёх полученных схемных решений

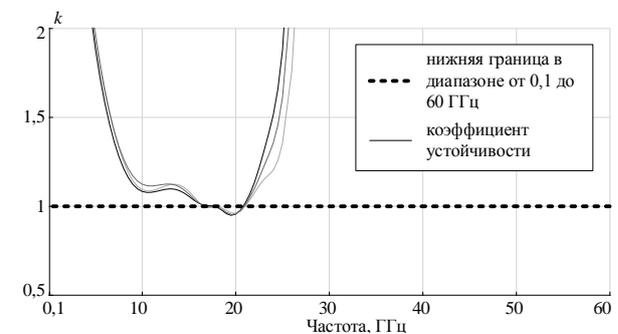


Рис. 7. График коэффициентов устойчивости трёх полученных схемных решений

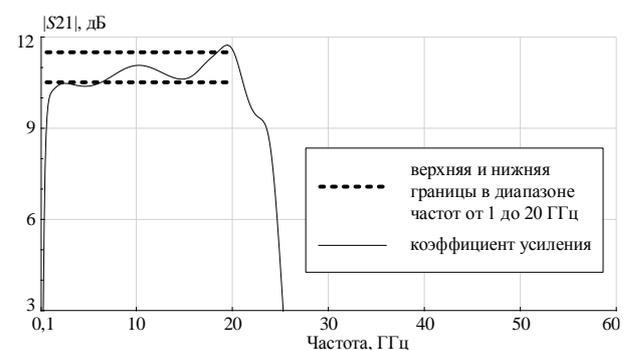


Рис. 8. График коэффициента усиления схемного решения, полученного разработчиком

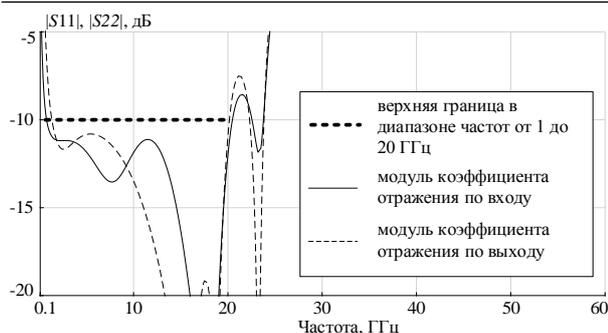


Рис. 9. График модулей коэффициентов отражения по входу и по выходу схемного решения, полученного разработчиком

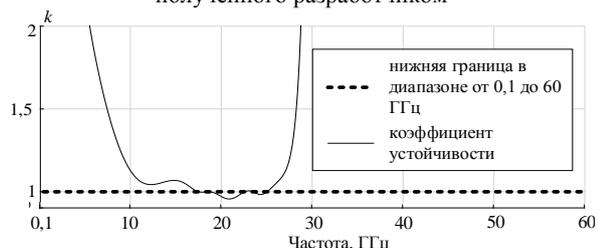


Рис. 10. График коэффициентов устойчивости схемного решения, полученного разработчиком

В результате эксперимента установлено, что наиболее удачными комбинациями весов для синтеза являются те, для которых вес коэффициента устойчивости в разы больше веса коэффициента усиления. Это объясняется наблюдениями за процессом синтеза – наиболее сложной для обеспечения требований характеристик для синтеза является именно коэффициент устойчивости. Повышение веса данной характеристики в ЦФ приводит к поиску решений, в первую очередь обеспечивающих устойчивость во всём частотном диапазоне.

Заключение

Применение генетического алгоритма в задачах структурно-параметрического синтеза линейных СВЧ-усилителей с распределенным усилением позволяет получить схемные решения устройств с заданными требованиями к характеристикам. Описанный подход даёт преимущества в скорости проектирования, количестве полученных решений для дальнейшей доработки проектировщиком.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10036).

Значения ЦФ при различных весовых коэффициентах

Весовые коэффициенты		Значение ЦФ							
$W_{ S21 }$	W_k	1	2	3	...	7	14	15	Среднее
20	1	-1,373	-1,896	-0,581	...	-1,826	-0,758	-0,469	-1,516
20	20	-3,563	-3,482	-0,532	...	-3,257	-3,196	-2,804	-2,375
20	10	-0,059	-3,979	-3,016	...	-1,707	-2,817	-0,564	-1,669
20	5	-1,566	-1,589	-2,798	...	-0,534	-3,453	-1,475	-2,061
10	20	-2,163	-3,348	-1,579	...	-0,813	-2,759	-0,946	-1,593
5	10	-0,487	-1,948	-1,110	...	-0,801	-0,405	-1,492	-0,989
10	15	-0,268	-1,666	-0,519	...	-1,757	-3,016	-1,665	-1,254

Литература

- Метель А.А., Добуш И.М., Горяинов А.Е., Файль Т.Н. Анализ схемных решений и разработка СВЧ-интегрального усилителя с распределённым усилением на основе 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии // XV Междунар. науч.-практ. конференция «ЭССУ». – 2019. – Ч. 1. – С. 42–45.
- Добуш И.М., Калентьев А.А., Метель А.А., Горяинов А.Е. Морфологический анализ интегральных СВЧ-усилителей с распределенным усилением // Вопросы радиоэлектроники. – 2020. – № 6. – С. 40–46.
- Калентьев А.А., Гарайс Д.В., Добуш И.М., Бабак Л.И. Структурно-параметрический синтез СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с использованием моделей монолитных элементов // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 2 (26), ч. 2. – С. 104–112.
- Калентьев А.А., Добуш И.М., Бабак Л.И., Гарайс Д.В., Горяинов А.Е. Автоматизированное проектирование монолитного малошумящего усилителя для приемника ГНСС на основе генетического алгоритма // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 4(30). – С. 45–53.
- Метель А.А., Горяинов А.Е., Добуш И.М., Сальников А.С. Разработка алгоритма математического моделирования линейных интегральных СВЧ-усилителей с распределенным усилением // Матер. XVI Междунар. науч.-практ. конф. «ЭССУ»: в 2 ч., 2020. – Ч. 1. – С. 61–63.

Горяинов Александр Евгеньевич

Канд. техн. наук, доцент каф. КСУП ТУСУРа
ул. Красноармейская, д. 147, г. Томск, Россия, 634034
ORCID: 0000-0003-3363-407X
Тел.: +7-913-841-24-29
Эл. почта: goryainov.alex@gmail.com

Файль Тимур Николаевич

Магистрант каф. КСУП ТУСУРа
ул. Красноармейская, д. 147, г. Томск, Россия, 634034
ORCID: 0000-0003-2773-5149
Тел.: +7-923-433-19-65
Эл. почта: timafayl@gmail.com

Новичкова Юлия Александровна

Магистрант каф. КСУП ТУСУРа
ул. Красноармейская, д. 147, г. Томск, Россия, 634034
ORCID: 0000-0002-7987-7192
Тел.: +7-952-159-93-50
Эл. почта: yulya.novichkova21@gmail.com

Калентьев Алексей Анатольевич

Канд. техн. наук, доцент каф. КСУП ТУСУРа
ул. Красноармейская, д. 147, г. Томск, Россия, 634034
ORCID: 0000-0001-7829-5345
Тел.: +7-923-408-0408
Эл. почта: Alexey.Kalentyev@gmail.com

Сальников Андрей Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. КСУП ТУСУРа
ул. Красноармейская, д. 147, г. Томск, Россия, 634034
ORCID: 0000-0002-5827-9556
Тел.: +7-913-866-44-65
Эл. почта: ansalnikov@gmail.com