

УДК 621.375.4

И.М. Добуш, А.А. Калентьев, Д.А. Жабин, Д.С. Гарайс, Л.И. Бабак

Разработка МШУ диапазона 1–2 ГГц с использованием программы структурного синтеза СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма

Описывается процесс разработки одно- и двухкаскадного малошумящих усилителей (МШУ) диапазона частот 1–2 ГГц, выполненных по технологии печатного монтажа, с помощью программы структурно-параметрического синтеза СВЧ-транзисторных усилителей (ТУ) «Geneamp» на основе генетического алгоритма. Реализованный в Geneamp подход, в отличие от существующих, позволяет синтезировать СВЧ ТУ с использованием наборов S -параметров пассивных элементов, что дает возможность разработчику получать реализуемые схемотехнические решения с учетом реальных характеристики электронных компонентов выбранного производителя. Проведено сравнение результатов моделирования МШУ с измерениями.

Ключевые слова: СВЧ-транзисторный усилитель, МШУ, структурно-параметрический синтез, генетический алгоритм, наборы S -параметров, SMD-компонент.

Для решения задач синтеза (генерации) принципиальных схем линейных и малошумящих СВЧ-транзисторных усилителей (ТУ) по заданным требованиям к характеристикам в Лаборатории интеллектуальных компьютерных систем (ЛИКС) ТУСУРа были разработаны подход и программа структурно-параметрического синтеза «Geneamp», основанные на генетическом алгоритме (ГА) [1, 2].

Развитие подхода к автоматизированному проектированию ТУ на основе ГА, с точки зрения использования моделей пассивных элементов в процессе синтеза, можно условно разделить на три этапа [1–5]:

1) Модели идеальных пассивных элементов [1, 2], в том числе идеальные емкости, индуктивности, сопротивления, линии передачи (ЛП) и др.

2) Параметрические модели пассивных элементов в виде эквивалентных схем (ЭС) [3, 4]. Данный вариант программы был преимущественно ориентирован на GaAs-, InP- и GaN-технологии изготовления СВЧ-монолитных ТУ и использовал модели пассивных монолитных элементов, в частности, полупроводниковых и тонкопленочных резисторов, МДМ-конденсаторов, квадратных и круглых спиральных катушек индуктивности, ЛП с потерями и др.

3) Модели пассивных элементов в виде наборов S -параметров [5], такой подход имеет два главных преимущества. Во-первых, отсутствует необходимость в трудоемкой процедуре построения параметрических моделей в виде ЭС, так как измеренные S -параметры пассивных элементов различных номиналов могут быть непосредственно применены в процессе синтеза. Во-вторых, открывается возможность синтеза не только монолитных усилителей, но и ВЧ/СВЧ ТУ, выполненных по технологии печатного монтажа с использованием SMD-компонентов (Surface Mounted Device – прибор для поверхностного монтажа). В последнем случае могут быть использованы измеренные S -параметры резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности, предоставляемые большинством производителей электронной компонентной базы (ЭКБ) в стандартных форматах файлов *.s2p или *.mdif и соответствующие ряду типономиналов изготавливаемых в виде чипов компонентов.

Примеры синтеза СВЧ ТУ на основе идеальных и ЭС-моделей пассивных элементов представлены в работах [1–4]. Целью настоящей работы является демонстрация эффективности реализованного в программе Geneamp алгоритма, позволяющего осуществить структурный синтез СВЧ ТУ при использовании моделей пассивных элементов в виде наборов S -параметров [5], на примере разработки одно- и двухкаскадного малошумящих усилителей (МШУ) диапазона 1–2 ГГц. Усилители выполнены в микрополосковом тракте на печатных платах (ПП) с использованием SMD-компонентов. Описаны основные этапы проектирования, проведено сравнение результатов измерений, разработанных МШУ с параметрами коммерческих отечественных и зарубежных аналогов.

Алгоритмы синтеза СВЧ ТУ на основе ГА, использующие идеальные и ЭС-модели пассивных элементов, исследованы и подробно описаны в [1–4]. Для реализации возможности синтеза ТУ

на SMD-компонентах алгоритм был модифицирован [5]. В частности, были внесены изменения в способ кодирования-декодирования хромосомы [1, 2], описывающей СВЧ ТУ. При этом в хромосоме кодируется в бинарном виде номер типонаминала каждого пассивного элемента. После декодирования хромосомы из mdif-файла выбирается набор S -параметров пассивного элемента, соответствующий выбранному номеру типонаминала, он используется при расчете характеристик усилителя. Также была введена модель пассивного элемента в виде набора S -параметров. В качестве моделей транзисторов используются наборы S - и шумовых параметров на фиксированных частотах.

Модифицированный алгоритм был включен в новую версию программы Geneamp [5], в качестве исходных данных при работе в программе пользователь задает: требования к комплексу характеристик усилителя в полосе частот Δf (коэффициент усиления G , коэффициент шума NF , уровни согласования на входе $|S_{11}|$ и выходе $|S_{22}|$, устойчивость k); ограничения на структуру усилителя (число усилительных каскадов, использование или неиспользование входной, выходной и межкаскадных согласующих цепей (СЦ)); ограничения на структуру каждого усилительного каскада (использование или неиспользование определенных включений цепей коррекции и обратной связи (ОС), типы и число элементов в каждой цепи); ограничения на структуру каждой СЦ (число и способ включения ветвей, типы и число элементов в каждой ветви), кроме того, выбираются ряды типонаминалов для каждого пассивного SMD-компонента и загружаются файлы, содержащие S - и шумовые параметры активных элементов (АЭ) для разных конструкций или рабочих точек.

В процессе синтеза программа, исходя из требований к характеристикам ТУ, автоматически генерирует его принципиальную схему и номиналы всех элементов, а также проводит вариацию и выбор АЭ. При этом ГА синтезирует несколько различных вариантов схем ТУ. Особенностью программы Geneamp является возможность полного контроля структуры и значений элементов синтезируемых усилителей, что позволяет получать практически реализуемые решения.

Автоматизированное проектирование МШУ диапазона 1–2 ГГц. В табл. 1 приведены требования, предъявляемые к характеристикам одно- и двухкаскадных усилителей. В качестве АЭ использовались малошумящие корпусированные GaAs-полевые транзисторы от следующих производителей: TriQuint, Avago Technologies, Mitsubishi Electric и Renesas Electronics. В качестве пассивных элементов применялись SMD-компоненты фирм Coilcraft и Panasonic.

Таблица 1

Требования к характеристикам МШУ

Тип МШУ	Δf , ГГц	G , дБ	NF , дБ	$ S_{11} $, дБ	$ S_{22} $, дБ	k
Однокаскадный	1–2	$13 \pm 0,7$	$\leq 0,8$	≤ -10	≤ -10	> 1
Двухкаскадный	1–2	29 ± 1	$\leq 0,8$	≤ -10	≤ -10	

С использованием результатов измерений, полученных из справочных данных производителей активных и пассивных элементов, для осуществления синтеза МШУ в диапазоне частот до 6 ГГц были сгенерированы наборы

S - и шумовых параметров для АЭ в различных рабочих точках, а также наборы S -параметров пассивных элементов. Эти данные были загружены в программу Geneamp.

На структуру усилителей были наложены следующие ограничения: СЦ должны содержать элементы подачи напряжений питания и смещения на транзисторы, а также элементы развязки по постоянному току; в цепи истоков транзисторов разрешено использование индуктивной последовательной ОС; для уменьшения коэффициента шума параллельная ОС в усилительных каскадах не использовалась.

В результате 10 запусков процедуры синтеза для каждого из МШУ получены по 5 различных схем, удовлетворяющих требованиям. На рис. 1 показаны схемы и смоделированные частотные характеристики МШУ, имеющих наилучшие параметры и использующие рНЕМТ-транзисторы компании Avago Technologies.

На заключительном этапе были добавлены цепи питания, разработаны топологии тестовых ПП и выполнено с использованием программы «Microwave Office» моделирование характеристик МШУ (рис. 2, в, г). Размеры ПП МШУ: однокаскадный – 35×25 мм², двухкаскадный – 45×25 мм².

После изготовления тестовых ПП и монтажа МШУ (рис. 2, а, б) были проведены измерения их СВЧ-характеристик (рис. 2, в, г). При напряжении питания 4 В ток потребления однокаскадного МШУ составляет 60 мА, двухкаскадного – 140 мА.

В табл. 2 и 3 сведены требования к основным параметрам одно- и двухкаскадного МШУ, а также данные моделирования и эксперимента. Как видно, результаты моделирования и эксперимента имеют хорошее совпадение.

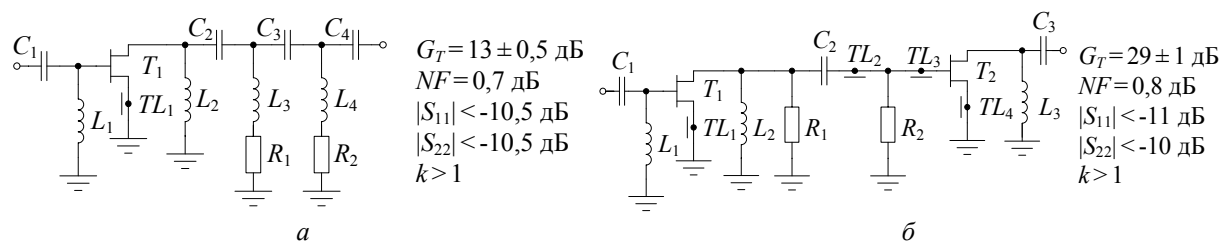


Рис. 1. Схемы МШУ, синтезированные в Geneamp: однокаскадный – а; двухкаскадный – б

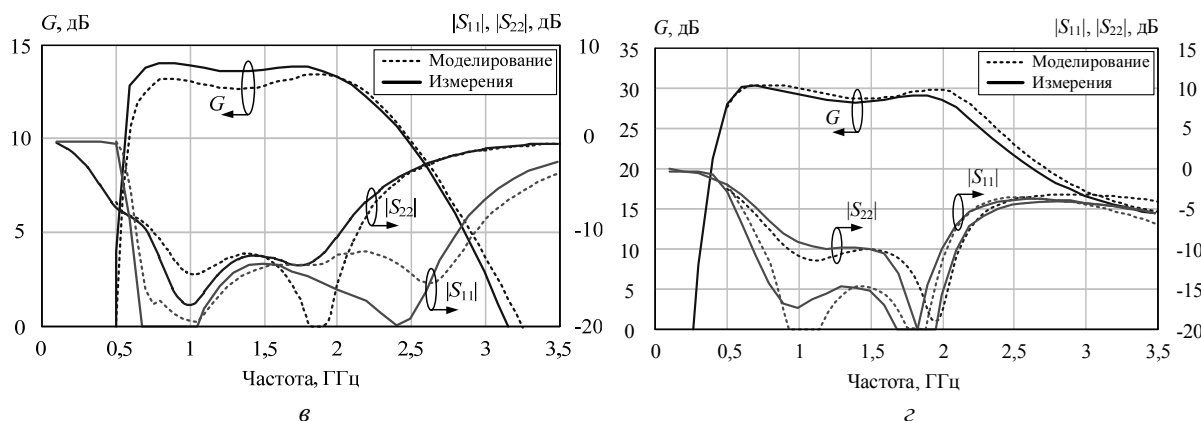
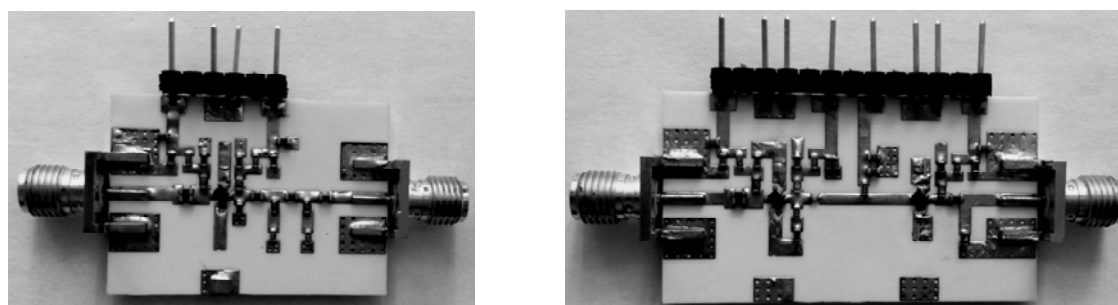


Рис. 2. Фотографии экспериментальных образцов МШУ 1–2 ГГц, а также результаты их моделирования и измерений: однокаскадный – а, в; двухкаскадный – б, г

Таблица 2

Параметры однокаскадного МШУ: требования, моделирование и эксперимент							
Этапы разработки	Δf , ГГц	G , дБ	NF , дБ	$ S_{11} $, дБ	$ S_{22} $, дБ	$V_{п}/I_{потр.}$, В/мА	Размеры платы, мм ²
Требования	1–2	$13 \pm 0,7$	$\leq 0,8$	≤ -10	≤ -10	4/60	–
Моделирование	1–2	$13 \pm 0,5$	$\leq 0,7$	$\leq -10,5$	$\leq -10,5$	4/60	35×25
Эксперимент	1–2	$13,6 \pm 0,3$	$\leq 0,9$	≤ -13	$\leq -10,2$	4/60	35×25

Таблица 3

Параметры двухкаскадного МШУ: требования, моделирование и эксперимент							
Этапы разработки	Δf , ГГц	G , дБ	NF , дБ	$ S_{11} $, дБ	$ S_{22} $, дБ	$V_{п}/I_{потр.}$, В/мА	Размеры корпуса, мм ²
Требования	1–2	29 ± 1	$\leq 0,8$	≤ -10	≤ -10	4/140	–
Моделирование	1–2	29 ± 1	$\leq 0,8$	≤ -11	≤ -10	4/140	45×25
Эксперимент	1–2	$28,7 \pm 0,5$	$\leq 0,85$	$\leq -9,6$	$\leq -9,1$	4/140	45×25

В табл. 4 приведены характеристики существующих коммерческих аналогов созданных МШУ. Как видно, с использованием программы структурно-параметрического синтеза СВЧ ТУ Geneamp на основе ГА разработаны МШУ диапазона 1–2 ГГц с параметрами на уровне лучших отечественных и зарубежных образцов.

Параметры прямых аналогов разработанных МШУ

Производитель (модель)	Δf , ГГц	G , дБ	NF , дБ	$ S_{11} $, дБ	$ S_{22} $, дБ	$V_p/I_{потр}$, В/мА	Размеры корпуса, мм ³
Miteq (AFD4-010020-06)	1–2	44±1,25	0,6	–9,54	–9,54	15/175	39×19,3×2,87
Микран (010020-02)	1–2	35	0,8	–9,54	–9,54	8..15/–	–
Mercury Systems (7216)	1–2	20±1	0,8	–9,54	–9,54	5/50	34,29×25,4×10,16
RFCOMP (HD30157)	1–2	35±4	1	–10,16	–8,52	12/180	31,75×31,75×14,29
Daico (DAML6274)	0,7–2,1	30	1,35 (1,5)	–12,6	–12,6	5/350	50,8×17,78×10,16
Mini-Circ. (ZRL-2150)	0,95–2,15	25±1,8	1,5 (2,2)	–17,69	–20,83	12/255	95,25×50,8×20,32
Mini-Circ. (ZEL-1217LN)	1,2–1,7	20±1	1,5	–7,36	–7,36	15/70	22,86×22,86×17,15
MWT (AN12201N)	1,2–1,8	28/31±0,5	1,7	–	–	12/180	–
RFCOMP (HD24854)	0,95–2,15	55±1	2	–10,88	–10,88	12/475	41,3×19,3×8,43
Тантал (M42143)	1–2	25±1	2,5	–7,36	–7,36	–12/–	66×35×15,5
Исток (M421173-1)	1,4–1,7	20±0,75	2,5	–9,54	–9,54	9/30	бескорпусной
Тантал (M42143-1)	1–2	30±1	3	–7,36	–7,36	–12/–	66×35×15,5
Исток (AM 0918)	0,9–1,8	20±1	3	–9,54	–9,54	9/40	9×12 (плата)

Заключение. Предложенный и реализованный в программе Geneamp подход на основе ГА, в отличие от существующих подходов, позволяет синтезировать линейные СВЧ-транзисторные усилители с использованием наборов S-параметров пассивных элементов. Это дает возможность разработчику получать реализуемые схемотехнические решения с учетом реальных характеристик ЭКБ выбранного производителя. Эффективность подхода продемонстрирована на примере разработки МШУ диапазона 1–2 ГГц с параметрами на уровне лучших отечественных и зарубежных аналогов.

Литература

1. Babak L.I. A new technique for synthesis of low noise amplifiers based on genetic algorithm and morphological approach / L.I. Babak, A.A. Kokolov, A.A. Kalentyev // 21th Int. Crimean Conf. @Microwave and Telecommunication Technology@ (CriMiCo'2011). – 2011. – P. 228–229.
2. Babak L.I. A new genetic-algorithm-based technique for low noise amplifier synthesis / L.I. Babak, A.A. Kokolov, A.A. Kalentyev, D.V. Garays // 7-th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). – 2012. – P. 381–384.
3. Калентьев А.А. Структурный синтез СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с использованием параметрических моделей монолитных элементов / А.А. Калентьев, Д.В. Гарайс, Л.И. Бабак, А.А. Коколов, И.М. Добуш // Сб. трудов 22-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – 2012. – Т. 1. – С. 131–132.
4. Калентьев А.А. Структурно-параметрический синтез СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с использованием моделей монолитных элементов / А.А. Калентьев, Д.В. Гарайс, И.М. Добуш, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2 (26). – С. 104–112.
5. Калентьев А.А. Структурный синтез СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с применением моделей пассивных элементов в виде наборов S-параметров / А.А. Калентьев, Д.А. Жабин, И.М. Добуш, Д.В. Гарайс, Л.И. Бабак // Сб. трудов 24-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – 2014. – Т. 1. – С. 117–118.

Добуш Игорь Мирославович

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник Лаб. интеллектуальных компьютерных систем (ЛИКС) ТУСУРа
Тел. (раб.): +7-913-827-52-91
Эл. почта: igadobush@gmail.com

Калентьев Алексей Анатольевич

Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП),
мл. науч. сотрудник ЛИКС ТУСУРа
Тел. (раб.): +7-913-827-52-91
Эл. почта: alexey.kalentyev@gmail.com

Жабин Дмитрий Александрович

Аспирант каф. КСУП

Тел. (раб.): +7-913-827-52-91

Эл. почта: zhabin91g@gmail.com

Гарайс Дмитрий Викторович

Аспирант каф. КСУП

Тел. (раб.): +7-913-827-52-91

Эл. почта: dvgarays@gmail.com

Бабак Леонид Иванович

Д-р техн. наук, зам. директора НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУРа, профессор каф. КСУП

Тел. (раб.): +7-913-827-52-91

Эл. почта: leonid.babak@rambler.ru

Dobush I.M., Kalentyev A.A., Zhabin D.A., Garays D.V., Babak L.I.

LNAs 1-2 GHz development using genetic algorithm based on software tool «Geneamp»

The design of 1-2 GHz single- and double-stage LNAs on PCB is demonstrated using the genetic-algorithm-based software tool Geneamp that provides the structural-parametric synthesis of microwave transistor amplifiers. The new approach, implemented in Geneamp, allows synthesis of the microwave transistor amplifiers using sets of S-parameters. The approach allows generating the schematics according to real performance of chosen manufacturer's components. The comparison of modeled and measured performances of LNAs is presented.

Keywords: microwave transistor amplifier, LNA, structural and parametric synthesis, genetic algorithm, sets of S-parameters, SMD-component.