



# АВТОМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СВЧ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

## AUTOMATED SYNTHESIS OF MICROWAVE DIFFERENTIAL AMPLIFIERS BASED ON GENETIC ALGORITHM

УДК 621.382, 621.396.61

КОКОЛОВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

KOKOLOV ANDREI A.

БАБАК ЛЕОНИД ИВАНОВИЧ

BABAK LEONID I.

leonid.babak@mail.ru

leonid.babak@mail.ru

ЖАБИН ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ZHABIN DMITRY A.

ШЕЕРМАН ФЕДОР ИВАНОВИЧ

SHEYERMAN FYODOR I.

*Томский университет систем управления и радиоэлектроники  
г. Томск, пр. Ленина, 40*

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40 Lenina Ave., Tomsk*

Предложена методика на основе генетического алгоритма, позволяющая осуществить автоматический синтез схем СВЧ дифференциальных усилителей при резистивных или комплексных нагрузках. Представлен пример синтеза монолитного усилителя на базе 0,25 мкм SiGe БиКМОП технологии с полосой пропускания 1,5–5 ГГц, используемого для повышения мощности сигнала гетеродина в пассивном двойном балансном смесителе.

*Ключевые слова: генетический алгоритм; автоматический синтез; СВЧ дифференциальный усилитель; МИС; SiGe БиКМОП.*

The paper presents a genetic-algorithm-based technique for automated synthesis of microwave differential amplifier schematics with resistive or complex terminations. As an example, the synthesis of 1.5–5GHz 0.25μm SiGe BiCMOS MMIC amplifier used as LO amplifier for passive double-balanced mixer has been presented.

*Keywords: genetic algorithm; automated synthesis; microwave differential amplifier; LO amplifier; MMIC; SiGe BiCMOS.*

### ВВЕДЕНИЕ

Проектирование СВЧ транзисторных усилителей (ТУ) до сих пор является сложным и трудоемким процессом. Для его упрощения в [1, 2] были предложены методы автоматического синтеза линейных и малозумящих СВЧ-усилителей на основе генетического алгоритма (ГА). Они позволяют автоматически генерировать практически реализуемые принципиальные схемы одно- и многокаскадных ТУ непосредственно по комплексу требований к характеристикам, включая коэффициент усиления, неравномерность АЧХ, коэффициент шума, КСВН на входе и выходе, коэффициент устойчивости [1]. Кроме того, при синтезе обеспечивается автоматический выбор оптимальных типов или размеров транзисторов, а также их режимов по постоянному току [2]. В [3] представлена модификация метода, предназначенная для синтеза монолитных интегральных усилителей. Она дает возможность генерировать схемы усилителей с учетом потерь и паразитных параметров сосредоточенных и распределенных пассивных элементов монолитных интегральных схем (МИС). Перечисленные методы реализованы в программе Geneamp [1, 2], которая позволяет значительно упростить и ускорить разработку принципиальных схем СВЧ ТУ-усилителей. Было также показано, что характеристики автоматически синтезируемых усилителей могут приближаться к усилителям, спроектированным опытными специалистами [1–3].

Следует отметить, что в работах [1–3] рассматривается только синтез усилителей с несимметричными (недифференциальными) входом и выходом при 50-омных нагрузках. Однако при

разработке монолитных усилителей на основе Si КМОП- и SiGe БиКМОП-технологий весьма часто используют дифференциальные схемы, обеспечивающие целый ряд преимуществ. К сожалению, методы [1–3] не могут быть непосредственно применены к проектированию таких схем. В настоящей статье подход на основе ГА адаптируется для обеспечения автоматического синтеза принципиальных схем дифференциальных и псевдодифференциальных усилителей. Предложенная методика экспериментально подтверждена при проектировании псевдодифференциального усилителя на основе 0,25 мкм SiGe БиКМОП-технологии, используемого в качестве усилителя сигнала гетеродина (УСГ) для двойного балансного смесителя.

### МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ГА

Основные элементы предлагаемой методики аналогичны описанным в [1–3]. Принципиальные схемы и значения параметров элементов усилителя кодируются в двоичной строке — хромосоме. ГА одновременно работает с набором (популяцией) хромосом. При синтезе все хромосомы декодируются, при этом получаются несколько вариантов усилителя. В случае проектирования ТУ с несимметричными входом и выходом для каждой полученной схемы усилителя вычисляется ряд характеристик (S-параметры, коэффициенты шума и устойчивости) в рабочей полосе частот при 50-омных нагрузках. Затем для каждого варианта мы вычисляем целевую функцию (ЦФ), которая оценивает близость

рассчитанных характеристик усилителя к поставленным требованиям. В процессе синтеза ГА обновляет популяцию, стремясь оптимизировать значение ЦФ, что приводит к нахождению схем усилителей с лучшими характеристиками.

Идея применения рассмотренного подхода для синтеза дифференциальных усилителей состоит в том, чтобы свести эту проблему к синтезу несимметричных ТУ с 50-омными нагрузками, используя две группы соотношений: а) соотношения между характеристиками усилителя при произвольных (в общем случае комплексных) и 50-омных нагрузках; б) соотношения между параметрами усилителя в дифференциальном и недифференциальном режимах.

В случае дифференциальных или псевдодифференциальных каскадов ТУ хромосома описывает только один усилительный канал (одну из двух симметричных частей) этого каскада. После декодирования всех хромосом выполняется моделирование соответствующих вариантов усилительного канала. При этом усилительный канал дифференциального каскада рассматривается как несимметричный усилитель.

Так как нагрузки дифференциальных каскадов на входе и выходе могут отличаться от стандартного импеданса СВЧ-тракта (50 Ом), характеристики усилительного канала должны быть вычислены для заданных резистивных или комплексных импедансов нагрузок. Для этого вначале по параметрам рассеяния усилительного канала в 50-омном тракте находятся его обобщенные S-параметры (т. е. параметры, нормированные к заданным импедансам нагрузок) [4]. Затем на основе последних параметров вычисляются S-параметры дифференциального или псевдодифференциального каскада ТУ. Для дифференциального режима соответствующие математические соотношения представлены в [5]. Для псевдодифференциальной структуры расчеты еще проще, так как в этом случае дифференциальные S-параметры каскада равны обобщенным S-параметрам усилительного канала, нагруженного на соответствующие импедансы.

Далее, основываясь на полученных S-параметрах дифференциального или псевдодифференциального каскада, мы рассчитываем частотные зависимости его характеристик (коэффициента усиления и модулей коэффициентов отражения на входе и выходе). По ним вычисляются значения ЦФ для каждого варианта каскада (усилительного канала), которые используются в ГА в процессе синтеза аналогично описанному выше.

### АВТОМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ СИГНАЛА ГЕТЕРОДИНА

Применим методику к проектированию МИС широкополосного дифференциального усилителя, используемого в качестве усилителя сигнала гетеродина (УСГ) для двойного балансного смесителя. Функциональный узел в составе смесителя и УСГ (рис. 1)

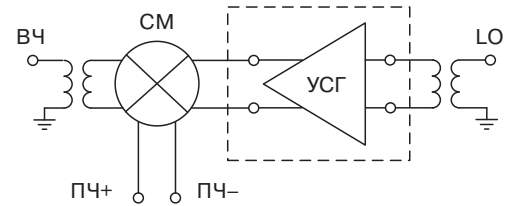


Рис. 1. Двойной балансный смеситель с УСГ

выполняется по 0,25 мкм SiGe БиКМОП-технологии и предназначен для применения в широкополосных приемниках [6]. Двойной балансный смеситель разработан на основе полевых CMOS-транзисторов в пассивном режиме и имеет полосу пропускания 1,5–4,5 ГГц [7]. Достоинством подобных смесителей является широкий динамический диапазон, однако он достигается при мощности сигнала гетеродина не менее 8–10 дБм. Для снижения этой мощности (особенно в многоканальных приемниках с общим гетеродином) целесообразно применение УСГ. Требования к МИС УСГ следующие: диапазон рабочих частот  $\Delta f = 1\text{--}5$  ГГц; коэффициент усиления  $G > 15$  дБ; выходная мощность  $P_{\text{вых}} > 15$  дБм; вход и выход — дифференциальные, вход должен быть согласован с источником сигнала 50 Ом, выход — со входным импедансом порта смесителя для подачи сигнала гетеродина (LO).

В качестве усилительных элементов в УСГ выбраны гетеробиполярные транзисторы (ГБТ), их высокочастотные свойства позволяют выполнить требования к коэффициенту усиления усилителя с помощью единственного дифференциального каскада. Для исключения влияния паразитных параметров источника тока использована псевдодифференциальная структура каскада [8]. В целях достижения необходимой выходной мощности в каждом канале каскада используется каскодная схема «общий эмиттер (ОЭ) — общая база (ОБ)», кроме того, каждый усилительный элемент образован четырьмя параллельно включенными ГБТ.

Вначале рассмотрим синтез псевдодифференциального УСГ при 50-омных сопротивлениях генератора и нагрузки. Для повышения точности синтеза в соответствии с [3] при использовании библиотеки для 0,25 мкм SiGe БиКМОП-техпроцесса в диапазоне частот до 20 ГГц были сгенерированы файлы S-параметров пассивных компонентов МИС, они загружены в программу Geneamp. Активный элемент (АЭ) в усилительном канале, представляющий собой каскодную схему ОЭ-ОБ, описывался смоделированными S-параметрами. Требования к структуре усилителя были следующими: каждый усилительный канал каскада содержит входную и выходную согласующие-корректирующие цепи (СКЦ), которые должны также обеспечить подачу напряжений смещения на транзисторы и развязку по постоянному току; допустимо использование в канале цепи параллельной обратной связи (ОС). На значения пассивных сосредоточенных компонентов

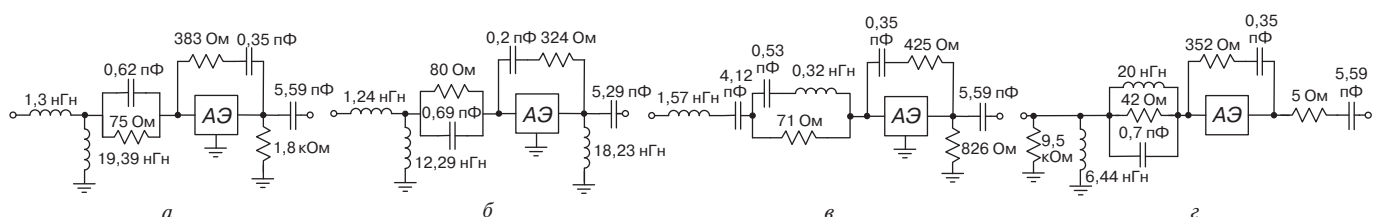


Рис. 2. Синтезированные схемы усилительного канала дифференциального УСГ при нагрузке 50 Ом

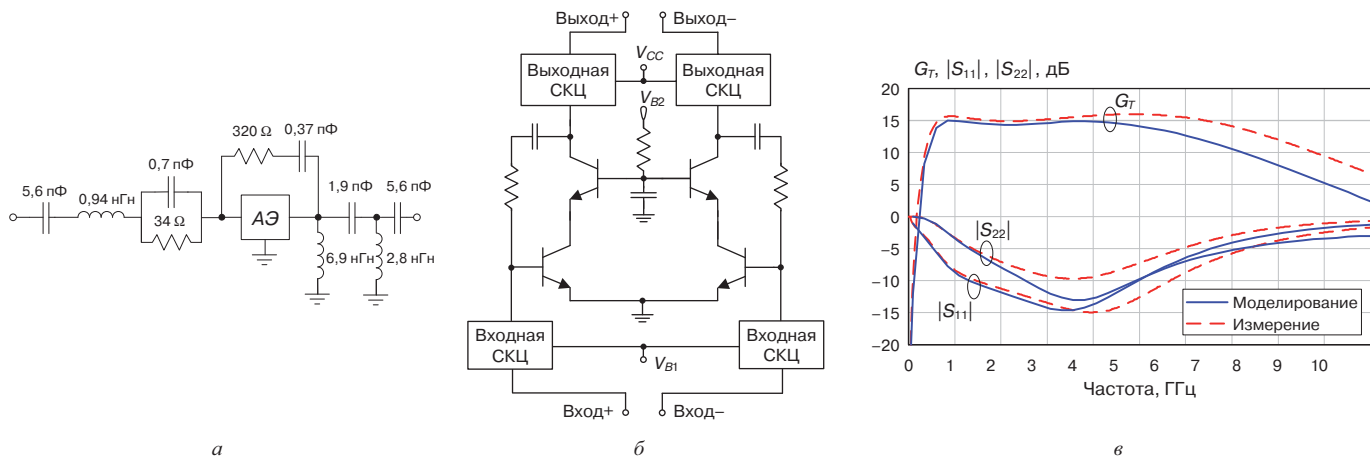


Рис. 3. а) Синтезированная схема усилительного канала УСГ при комплексной нагрузке; б) упрощенная схема псевдодифференциального каскада; в) смоделированные и измеренные дифференциальные  $S$ -параметры

наложены следующие ограничения, обусловленные используемой технологией МИС:  $1 \text{ Ом} \leq R \leq 10 \text{ кОм}$ ;  $0,1 \text{ пФ} \leq C \leq 5,6 \text{ пФ}$ ;  $0,8 \text{ нГн} \leq L \leq 23,4 \text{ нГн}$ .

Было проведено несколько запусков ГА. Алгоритм останавливался, если время синтеза превышало 1,5 часа. В результате получены четыре различных принципиальных схемы усилительного канала дифкаскада, удовлетворяющих поставленным требованиям (рис. 2). Как видно, во всех из них АЭ охвачен параллельной ОС по напряжению. Однако для схем на рис. 2а, в, г наличие резисторов в выходных СКЦ снижает выходную мощность каскада. Кроме того, схемы на рис. 2в, г имеют более сложные входные СКЦ. Таким образом, наиболее подходящей для практического использования является схема на рис. 2б, дополненная необходимыми цепями смещения. На практике в структурной схеме на рис. 1 УСГ нагружен на комплексный импеданс LO-порта смесителя. Поэтому был также выполнен синтез УСГ с комплексной нагрузкой на выходном порте, описываемой сгенерированным файлом  $S$ -параметров. При этом импеданс источника сигнала по-прежнему равнялся 50 Ом. Синтезированная схема усилительного канала дифкаскада при комплексной нагрузке изображена на рис. 3а.

В результате проектирования была получена упрощенная схема псевдодифференциального каскада, показанная на рис. 3б. Топология МИС УСГ разработана для случая 50-омной нагрузки. При этом для экономии размеров и более простой интерпретации измерений МИС не включает в себя симметрирующие трансформаторы. Площадь МИС УСГ с контактными площадками составляет  $2,52 \text{ мм}^2$  ( $1,2 \times 2,1 \text{ мм}$ ).

После изготовления были измерены частотные характеристики МИС УСГ на пластине с использованием дифференциальных GSGSG-зондов. Сравнение смоделированных и измеренных  $S$ -параметров УСГ в дифференциальном режиме показывает их близкое совпадение (рис. 3в). Выходная мощность  $P_{\text{1дБ}}$  составила около 17 дБм. Более подробно описание и характеристики МИС УСГ представлены в [6]. Затем были измерены параметры соединенных между собой МИС смесителя и МИС УСГ. Смеситель вместе с УСГ в полосе 1,5–4,5 ГГц обеспечивает коэффициент преобразования  $G_c$  не менее  $-10 \text{ дБ}$  (в полосе 1,5–3,5 ГГц — не менее  $-8 \text{ дБ}$ ). Входная мощность радиосигнала при сжатии на 1 дБ ( $IP_{\text{1дБ}}$ ) составляет более 9 дБм. При этом необходимый уровень мощности сигнала гетеродина не превышает 0 дБм.

Работа выполнена в рамках научного проекта № 16-47-700286, получившего поддержку по результатам конкурса проектов фундаментальных научных исследований, проводимого РФФИ и субъектами Российской Федерации

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Babak L. I., Kokolov A. A. and Kalentyev A. A. *A New Genetic-Algorithm-Based Technique for Low Noise Amplifier Synthesis*, European Microwave Week 2012, Amsterdam, The Netherlands, pp. 520–523, November 2012.
2. Kalentyev A. A., Garays D. V. and Babak L. I. *Genetic-Algorithm-Based Synthesis of Low-Noise Amplifiers with Automatic Selection of Active Elements and DC Biases*, European Microwave Week 2014, Rome, Italy, pp. 520–523, October 2014.
3. Zhabin D. A., Garays D. V., Kalentyev A. A., Dobush I. M. and Babak L. I. *Automated Synthesis of Low Noise Amplifiers Using S-parameter Sets of Passive Elements*, Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2017), Kuala Lumpur, Malaysia, 2017 (accepted for publication).
4. Kurokawa K. *Power Waves and the Scattering Matrix*, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-13, №2, pp. 194–202, 1965.
5. Bockleemann D. E. and Eisenstadt W. R. *Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters: Theory and Simulation*. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-43, No. 7, pp. 520–523, July 1995.
6. Коколов А. А., Добуш И. М., Шеерман Ф. И., Бабак Л. И. и др. *Сложно-функциональные блоки широкополосных усилителей радиочастоты для однокристальных приемников L- и S-диапазонов на основе технологии SiGe*. 3-я Междунар. науч. конф. «ЭКБ и электронные модули» (Международный форум «Микроэлектроника-2017»), г. Алушта, октябрь 2017. — М.: Техносфера, 2017. — С. 395–401.
7. Kokolov A. A., Salnikov A. S., Sheyerman F. I. and Babak L. I. *Broadband Double-Balanced SiGe BiCMOS Mixer With Integrated Asymmetric Baluns*, Int. Conf. "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics-2017), Omsk, Russia, 2017 (accepted for publication).
8. Wenyuan L. and Qian Z. *"A 0.7–1.9GHz Broadband Pseudo-differential Power Amplifier Using 0.13-um SiGe HBT Technology"*. 2012 Int. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), pp. 1–4, July 2012.