

СЛОЖНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЛОКИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ РАДИОЧАСТОТЫ ДЛЯ ОДНОКРИСТАЛЬНЫХ ПРИЕМНИКОВ L- И S-ДИАПАЗОНОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ SiGe

IP-BLOCKS OF BROADBAND RF AMPLIFIERS FOR SINGLE-CHIP L- AND S-BAND RECEIVERS BASED ON SiGe PROCESS

УДК 621.382, 621.396.61

КОКОЛОВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ¹KOKOLOV ANDREI A.¹ДОБУШ ИГОРЬ МИРОСЛАВОВИЧ¹DOBUSH IGOR M.¹ШЕЕРМАН ФЕДОР ИВАНОВИЧ¹SHEYERMAN FYODOR I.¹БАБАК ЛЕОНИД ИВАНОВИЧ¹

leonid.babak@mail.ru

BABAK LEONID I.¹

leonid.babak@mail.ru

ЖАБИН ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ¹ZHABIN DMITRY A.¹СВЕТЛИЧНЫЙ ЮРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ²SVETLICHNIY YURY A.²

¹ Томский университет систем управления и радиоэлектроники
г. Томск, пр. Ленина, 40

² ООО «ЛЭМЗ-Т»

г. Томск, пр. Развития, 8

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40 Lenina Ave., Tomsk

² «LEMZ-T» Ltd.

8 Razvitiya Ave., Tomsk

Представлены результаты проектирования и измерений сложно-функциональных блоков (СФБ) широкополосных усилителей радиочастоты на основе 0,25 мкм SiGe БиКМОП технологии. Усилитель с несимметричным входом и выходом имеет полосу пропускания 1–5 ГГц и выходную мощность 13,2 дБм, дифференциальный усилитель — соответственно 1,5–5 ГГц и 17 дБм. СФБ предназначены для использования в однокристальных приемниках, работающих в различных частотных поддиапазонах L- и S-диапазонов.

Ключевые слова: сложно-функциональный блок; приемник; радиочастотный тракт; широкополосный усилитель; монолитная интегральная схема; SiGe БиКМОП-технология.

The paper presents the design and measurements of broadband amplifier IP-blocks based on 0.25 μm SiGe BiCMOS process. The frequency band and output power are respectively 1–5 GHz and 13.2 dBm for a single-ended amplifier, and 1.5–5 GHz and 17 dBm for differential amplifier. IP-blocks will be used in RF front-ends of receivers intended for different frequency bands and applications.

Keywords: IP-block; receiver; RF front-end; broadband amplifier; MMIC; SiGe BiCMOS process.

ВВЕДЕНИЕ

В [1] была предложена концепция построения универсального радиочастотного (РЧ) тракта для приемников с цифровой обработкой сигнала (ЦОС), работающих в различных частотных поддиапазонах L-, S-диапазонов и нижней части C-диапазона. Суть концепции состоит в том, что при создании комплекта приемников различных поддиапазонов используется небольшое число одних и тех же универсальных широкополосных МИС и (или) СнК, а полосы приемников по сигналам радио- и промежуточной частоты реализуются только за счет использования соответствующих фильтров. Это позволяет значительно облегчить, ускорить и удешевить разработку и производство комплектов приемников L-, S- и C-диапазонов (а также ПЧ-трактов приемников X-, Ku- и Ka-диапазонов) для разных применений. Также в [1] были приведены результаты разработки некоторых широкополосных узлов подобных приемников, включая цифровые управляемые аттенюаторы, смесители и др.

В настоящей статье представлены результаты автоматизированного проектирования и экспериментального исследования сложно-функциональных блоков (СФБ) широкополосных усилителей радиочастоты на основе 0,25 мкм SiGe БиКМОП-технологии. СФБ усилителей могут быть использованы в РЧ-трактах приемников, реализуемых в виде МИС или СнК в соответствии с предложенной концепцией.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ РАДИОЧАСТОТНЫЙ ТРАКТ ПРИЕМНИКОВ L- И S-ДИАПАЗОНОВ

На рис. 1 показана одна из возможных структурных схем СнК РЧ-тракта приемников L- и S-диапазонов с ЦОС (в том числе с ЦФАР). В ее состав входят управляемый цифровой аттенюатор (ЦАТТ) с драйвером, буферный усилитель (БУ) для компенсации потерь в ЦАТТ, смеситель (СМ) с усилителем сигнала гетеродина (УСГ) и усилитель промежуточной частоты (УПЧ). Фазовая обработка сигнала осуществляется в цифровом блоке приемника.

В многоканальном приемнике сигнал от внешнего гетеродина разветвляется для подачи на несколько приемных каналов. Поэтому необходим УСГ для уменьшения общей мощности гетеродина и обеспечения развязки между каналами.

В разрабатываемой СнК (рис. 1) радиочастотные узлы (ЦАТТ, БУ, СМ и УСГ) должны работать в полосе частот не уже 1,5–4,5 ГГц. СнК будет использоваться в качестве основной МИС (ядра) при построении комплекта однокристалльных приемников L-, S-диапазонов и нижней части С-диапазона с ЦОС. Ниже представлено краткое описание СФБ широкополосных усилителей радиочастоты, входящих в состав СнК.

СЛОЖНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БЛОК БУФЕРНОГО УСИЛИТЕЛЯ

СФБ БУ должен удовлетворять следующим требованиям: диапазон рабочих частот $\Delta f = 1\text{--}5$ ГГц; коэффициент усиления $G > 15$ дБ; выходная мощность $P_{1dB} > 13$ дБм и $IP_3 > 22$ дБм соответственно; коэффициент шума NF — минимально возможный; вход и выход — несимметричные, согласованные с 50-омным трактом. В качестве усилительных элементов выбраны КМОП-транзисторы.

Широкополосные БУ на основе КМОП-транзисторов близких диапазонов частот и уровней выходной мощности выполняются преимущественно по схеме усилителя с распределенным усилением (УРУ). Однако УРУ в заданном диапазоне частот обладают недостаточным коэффициентом усиления (не более 12 дБ). Широкополосные МШУ на КМОП-транзисторах выполняются также по каскадной схеме, в которой последовательно включаются несколько транзисторных каскадов с цепями обратной связи и четырехполосными

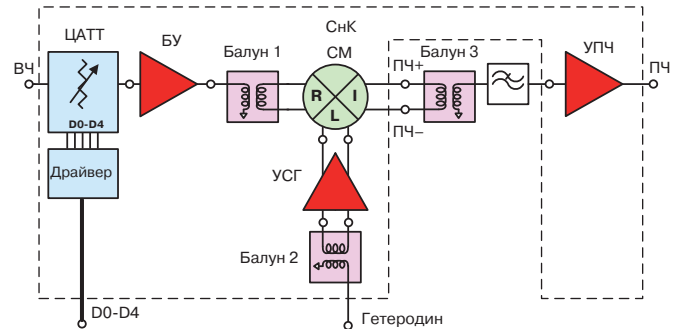


Рис. 1. Структурная схема СнК РЧ-тракта приемников L- и S-диапазонов с ЦОС

согласующе-корректирующими цепями (СКЦ). Такие усилители обладают достаточным коэффициентом усиления (более 15 дБ), однако имеют невысокий уровень выходной мощности (как правило, не более 5 дБм).

Для реализации БУ была выбрана каскадная схема усилителя. При разработке БУ в целях ускорения проектирования и обеспечения необходимых характеристик устройства была применена программа автоматизированного синтеза линейных и маломощных СВЧ транзисторных усилителей Geneamp [2]. Программа использует принципы искусственного интеллекта и основана на генетическом алгоритме. Она позволяет по требованиям к комплексу характеристик (полоса рабочих частот, уровень и неравномерность коэффициента усиления, коэффициент шума, коэффициенты отражения на входе и выходе, коэффициент устойчивости) автоматически генерировать

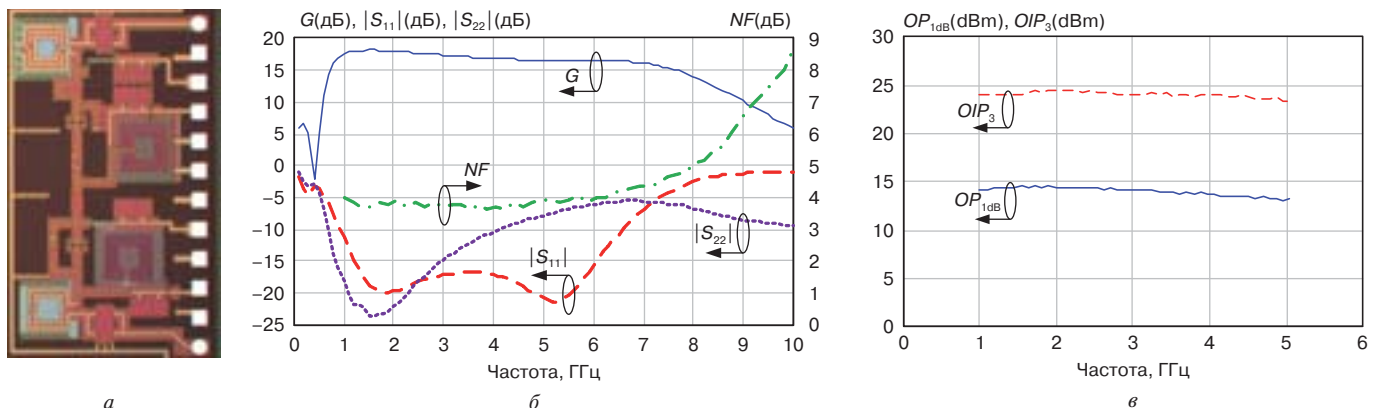


Рис. 2. СФБ БУ диапазона 1–5 ГГц: а) фотография топологии; б) измеренные характеристики G , NF , $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$; в) измеренные характеристики OP_{1dB} и OP_3

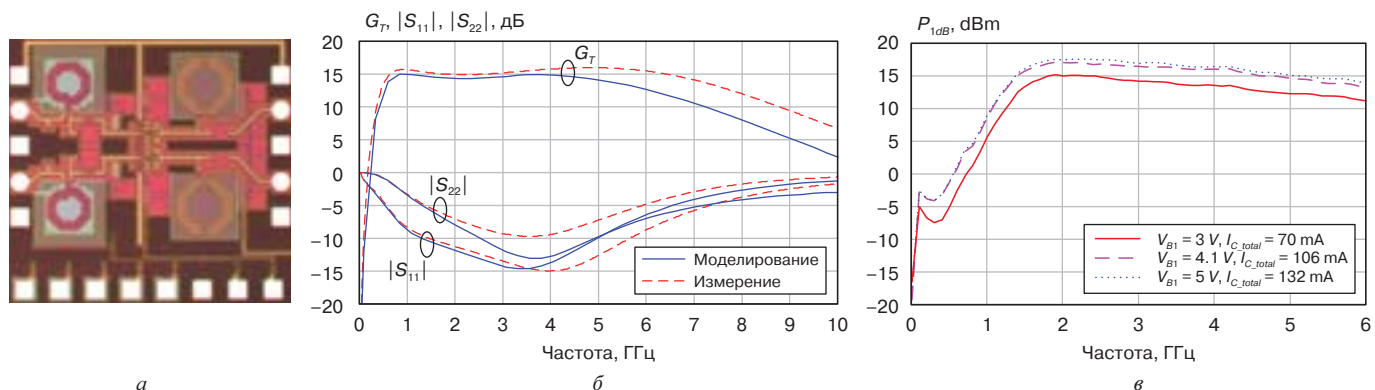


Рис. 3. СФБ УСГ диапазона 1,5–5 ГГц: а) фотография топологии; б) сравнение смоделированных и измеренных дифференциальных S -параметров; в) измеренная выходная мощность P_{1dB} для одного канала

Таблица 1

Тип СФБ	Δf , ГГц	G , дБ	$ S_{11} $, дБ $ S_{22} $, дБ	P_{1dB} , дБм	V , В I , мА	Площадь, мм ²	Примечание
Буферный усилитель	1–5	16–17,5	–11; –8	13,2–14,6	3 60	1,8	Недифференциальный вход/выход, $NF < 4$ дБ
Усилитель сигнала гетеродина	1,5–5	15,16	–10; –6...–8	17–18	5 100	2,52	Дифференциальный вход/выход

несколько вариантов принципиальных схем усилителей. Особенностью программы Geneamp является возможность полного контроля схемы и значений элементов синтезируемых усилителей, что дает возможность получать практически реализуемые решения.

Процесс проектирования БУ с помощью программы Geneamp описан в [3]. Синтезированный усилитель состоит из двух каскадов, каждый из них содержит цепь отрицательной обратной связи (ОС) для выравнивания коэффициента усиления и обеспечения согласования на входе и выходе транзисторов. На входе и выходе усилителя, а также между каскадами используются СКЦ, одновременно реализующие подачу питания на транзисторы и развязку по постоянному току. Топология СФБ БУ (рис. 2а) разработана с использованием программы Cadence. После изготовления кристалла с СФБ БУ на базе 0,25 мкм SiGe БиКМОП-техпроцесса проведены измерения СВЧ-характеристик на полупроводниковой пластине с использованием зондовой станции (рис. 2б, в).

СЛОЖНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БЛОК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ СИГНАЛА ГЕТЕРОДИНА

Требования, предъявляемые к СФБ УСГ: диапазон рабочих частот $\Delta f = 1\text{--}5$ ГГц; коэффициент усиления $G > 15$ дБ; выходная мощность $P_{1dB} > 15$ 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).

Структурная схема УСГ приведена на рис. 3а. В качестве усилительных элементов были выбраны гетеробиполярные транзисторы (ГБТ). Применение в каждом плече дифференциального усилителя каскадной схемы дает возможность увеличить напряжение питания и, следовательно, выходную мощность. Кроме того, более высокий достижимый коэффициент усиления каскадной схемы по сравнению с одиночным транзистором позволяет выполнить требование к усилению при использовании единственного дифференциального каскада.

Дифференциальная структура усилительного каскада повышает размах выходного напряжения и снижает чувствительность к паразитным параметрам разварочных проволочек и корпуса [4]. К сожалению, неидеальность подключаемого к транзисторам источника тока, необходимого в дифференциальной структуре, ведет к эффекту «плохого» заземления, что влияет на коэффициент усиления и другие характеристики устройства. Поэтому для построения УСГ выбрана псевдодифференциальная структура [4].

Для ускорения разработки принципиальной схемы УСГ также применена программа автоматизированного синтеза усилителей Geneamp. Процесс проектирования УСГ описан в [5], при этом была синтезирована схема одной усилительной каскадной ячейки, которая затем применена в каждом плече псевдодифференциальной структуры. На рис. 3а показана фотография фрагмента изготовленного кристалла с СФБ УСГ. Результаты измерений частотных характеристик усилителя на пластине с использованием векторного анализатора Keysight PNA-X и дифференциальных GSGSG-зондов представлены на рис. 1б, где приведено

сравнение смоделированных и измеренных дифференциальных S-параметров УСГ. На рис. 3в показаны частотные зависимости выходной мощности P_{1dB} при разных токах коллектора (70 мА, 106 мА и 132 мА). Измерение P_{1dB} проведено для одного канала УСГ с использованием портов In+ и Out+, остальные два порта In- и Out- были нагружены на сопротивления 50 Ом. В дифференциальном режиме выходная мощность будет на 3 дБм выше.

В табл. 1 сведены результаты зондовых измерений характеристик СФБ БУ и УСГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характеристики СФБ БУ на КМОП-транзисторах (полоса пропускания 1–5 ГГц) и СФБ УСГ на ГБТ (полоса пропускания 1,5–5 ГГц) находятся на уровне зарубежных аналогов. Отличительными особенностями разработанных усилителей являются широкополосность и повышенный уровень выходной мощности. СФБ предназначены для использования в однокристалльных приемниках с ЦОС, реализуемых в виде СнК в соответствии с предложенной концепцией универсального РЧ-тракта и работающих в различных частотных поддиапазонах L-, S-диапазонов и нижней части C-диапазона.

*Работа выполнена при финансовой поддержке прикладных научных исследований Министерством образования и науки РФ совместно с индустриальным партнером ООО «ЛЭМЗ-Т» (центр исследований и разработок АО «НПО «ЛЭМЗ», г. Москва).
Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57715X0179*

ЛИТЕРАТУРА

1. Шеерман Ф. И., Бабак Л. И., Добуш И. М., Коколов А. А. и др. Универсальные радиочастотные тракты и широкополосные функциональные узлы для однокристалльных приемников L- и S-диапазонов на основе технологии SiGe // Сб. докладов 2-й науч. конф. «Интегральные схемы и микроэлектронные модули» (международный форум «Микроэлектроника-2016»), г. Алушта, сентябрь 2016. — С. 368–373.
2. Babak L. I., Kokolov A. A., Kalentyev A. A. and Garays D. V. *A New Genetic-Algorithm-Based Technique for Low Noise Amplifier Synthesis* // Proc. MIC Conf., Amsterdam, 2012, pp. 381–384.
3. Dobush I. M., Kalentyev A. A., Zhabin D. A. et al. *Automated Synthesis and Measurement of 1–5GHz CMOS Buffer Amplifier* // Int. Conf. “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics-2017), Omsk, Russia, 2017 (accepted for publication).
4. Wenyuan L. and Qian Z. *A 0.7–1.9GHz Broadband Pseudo-differential Power Amplifier Using 0.13-um SiGe HBT Technology* // Int. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), July 2012, pp. 1–4.
5. Kokolov A. A., Babak L. I., Zhabin D. A. and Sheyerman F. I. *Genetic-algorithm-based Synthesis of Differential Amplifiers with Complex-impedance Terminations* // Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2017), Kuala Lumpur, Malaysia, 2017 (accepted for publication).