



УДК 621.3.049.774:621.376.9, ББК 32.853.1

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.474.475

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОРРЕКЦИИ ПАРАМЕТРОВ СВЧ КВАДРАТУРНЫХ МОДУЛЯТОРОВ И ДЕМОДУЛЯТОРОВ

## RESEARCH INTO PROSPECTS OF CORRECTING RF QUADRATURE MODULATORS AND DEMODULATORS PARAMETERS

**МУХИН ИГОРЬ ИГОРЕВИЧ***К.т.н., начальник отделения СВЧ — заместитель  
генерального конструктора***MUKHIN IGOR I.***Ph.D***ШАБАРДИН РУСЛАН СЕРГЕЕВИЧ***К.т.н., начальник отдела разработки СВЧ аналоговых  
микросхем и модулей***SHABARDIN RUSLAN S.***Ph.D***НЕДАШКОВСКИЙ ЛЕОНИД ВЛАДИМИРОВИЧ***Проект-инженер отдела разработки СВЧ аналоговых  
микросхем и модулей  
leo\_ned@mail.ru***NEDASHKOVSKIY LEONID V.***leo\_ned@mail.ru***МОРОЗОВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ***Проект-инженер отдела разработки СВЧ аналоговых  
микросхем и модулей***MOROZOV DMITRY N.****ШАБАРДИНА НАТАЛЬЯ ВАЛЕРЬЕВНА***Ведущий инженер отдела разработки СВЧ аналоговых  
микросхем и модулей***SHABARDINA NATALIA V.****СОЛОВЬЁВ ИЛЬЯ СЕРГЕЕВИЧ***Дизайнер СБИС отдела разработки аналого-цифровых  
микросхем***SOLOVYEV ILYA S.***АО «НИИМА «Прогресс»**125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54**Microelectronics Research Institute PROGRESS JSC**("PROGRESS MRI" JSC)**54 Cherepanovykh Lane, Moscow, 125183, Russia*

В данной работе рассматриваются методы и результаты проектирования СВЧ квадратурных модуляторов и демодуляторов, содержащих интегрированные узлы с цифровым управлением для коррекции таких параметров, как фазовый и амплитудный разбалансы квадратурных сигналов, а также подстройки рабочих токов цепей смесителей. *Ключевые слова:* квадратурный модулятор; квадратурный демодулятор; полифазный фильтр; ЦАП; кремний-германиевая технология; СВЧ; БиКМОП.

The article presents methods and results of designing RF quadrature modulators and demodulators which contain integrated correction circuits with digital control of parameters, such as phase and amplitude unbalances of quadrature signals, as well as tuning operating currents in mixers.

*Keywords:* quadrature modulator; quadrature demodulator; polyphase filter; DAC; silicon-germanium technology; RF; BiCMOS.

Широкополосные квадратурные модуляторы и демодуляторы находят широкое применение в аппаратуре связи, спутниковой навигации, бытовых устройствах сотовой и беспроводной связи, а также в устройствах связи современных образцов вооружения, радиолокации и радиоэлектронного противодействия. Они являются универсальными устройствами, которые могут применяться в системах с практически любым видом модуляции (PCS, DCS, GSM, CDMA, QPSK, QAM, SSB и др.), т.к. информационный (модулирующий) сигнал представляется в комплексном виде — в виде двух ортогональных I- и Q-составляющих.

Для квадратурных преобразователей в состав как модуляторов, так и демодуляторов входят тракт расщепления сигнала несущей на квадратурные составляющие и перемножительные каскады (смесители).

Отклонение от  $90^\circ$  и неидентичность по амплитуде квадратурных сигналов, формируемых в тракте расщепления сигнала несущей, негативно влияют на параметры изделий и качество производимых ими преобразований (например, при n-QAM-модуляции с возрастанием амплитудного и фазового разбаланса возрастает частота появления битовых ошибок [1]). Также негативно на параметры изделий влияют технологический разброс параметров

элементов при изготовлении и несимметричность отрисовки топологии каналов тракта расщепления и смесителей.

Компенсировать влияние этих факторов можно введением специальных цифроаналоговых блоков, позволяющих с помощью двоичного кода подстраивать отклонение сигналов от квадратуры, выравнивать их амплитуду и регулировать рабочий ток в цепях смесителей.

Целью данной работы является:

- 1) анализ методов улучшения параметров квадратурных модуляторов и демодуляторов;
- 2) разработка МИС квадратурных модуляторов и демодуляторов с рабочими частотами до 2 ГГц и до 6 ГГц по SiGe БикМОП-технологии с проектной нормой 180 нм с интегрированными схемами коррекции и блоками цифрового управления.

При проектировании квадратурных модуляторов и демодуляторов широко применяются два вида расщепителей сигнала гетеродина на синфазную и квадратурную составляющие: схема на делителях частоты (с удвоенной частотой гетеродина) и схема с использованием полифазного фильтра (ПФФ). Как правило, схемы на делителях частоты применяются в преобразователях с рабочей частотой до 2,5 ГГц (ADL5375, HMC1095, ADL5385, HMC795, ADL5380, ADL5387, LT5517, LT5575), т. к. на вход гетеродина необходимо подавать удвоенную рабочую частоту. Такие расщепители имеют меньшие разбалансы выходных I- и Q-сигналов и менее требовательны к форме входного сигнала гетеродина, особенно в низкочастотной области рабочего диапазона [2]. Данные расщепители представляют собой балансные устройства (СВЧ-триггеры на ЭСЛ-логике), и регулирование фазового разбаланса в этом случае осуществляется изменением смещения на базах токозадающих транзисторов.

При проектировании более высокочастотных приборов используются полифазные фильтры [3, 4]. Регулировка квадратуры в них производится с помощью перестройки рабочей полосы, такие ПФФ иногда называют активными, хотя они не обеспечивают усиление сигнала [5]. Перестройка полосы может осуществляться либо применением МОП-транзисторов в качестве управляемых резисторов, либо применением варикапов в качестве управляемых конденсаторов [6].

Регулирование амплитудного разбаланса в разрабатываемых микросхемах осуществляется в блоках усилителей-ограничителей, следующих за фазовым расщепителем [7, 8]. Принцип основан на изменении тока в усилительном каскаде.

Регулирование всех перечисленных параметров осуществляется специальными цифроаналоговыми блоками. Входы всех блоков регулировки соединены с 40-разрядным последовательным периферийным интерфейсом SPI (Serial Peripheral Interface).

SPI-интерфейс, цифровые блоки управления и схемы цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) спроектированы с использованием радиационно-стойкой библиотеки стандартных цифровых элементов, в которых используются охранные кольца n- и p-канальных областей.

Для защиты от сбоя SPI-интерфейс разработан с применением методики тройного мажоритарного резервирования. В целях уменьшения влияния подложки на работу приборов использовались структуры с глубокими карманами n-типа. Для борьбы с электростатическими эффектами спроектированы специальные контактные площадки с защитными ESD-диодами.

Потребляемый ток спроектированных устройств не превышает 200 мА.

В работе показано:

- ПФФ с «управляемыми резисторами» обладают сравнительно несколько меньшей линейностью и имеют больший завал АЧХ, чем ПФФ с «управляемыми конденсаторами».

- Регулировка фазы в ПФФ производится сдвигом частотного диапазона, поэтому данная схема ПФФ может применяться в различных устройствах для изменения диапазона их рабочих частот.
- Подстройка разбаланса фазы (квадратуры) и амплитуды тракта расщепления сигнала гетеродина положительно влияет на подавление паразитной боковой в спектре выходного сигнала в модуляторах при однополосной модуляции и позволяет регулировать разбаланс фазы (квадратуры) выходных сигналов в демодуляторах.
- Подстройка токов в смесителях компенсирует технологический разброс и увеличивает подавление несущей в спектре выходного сигнала в модуляторах при однополосной модуляции, а также позволяет регулировать разбаланс амплитуды выходных сигналов в демодуляторах.
- Подстройка токов в смесителях также позволяет регулировать ток потребления, линейность изделий, компенсировать завал их АЧХ и их температурный уход.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие результаты: разработаны микросхемы квадратурных модуляторов и демодуляторов с наличием интегрированного в них набора подстроек с цифровым управлением.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Application Note AN-1039. Correcting Imperfections in IQ Modulators to Improve RF Signal Fidelity [электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.analog.com/static/imported-files/application\\_notes/AN-1039.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/AN-1039.pdf), свободный.
2. Zhang Y. *Wireless Transmitter IQ Balance and Sideband Suppression* // *Wireless Technologies*, 2011. Vol. 1. P. 60–63.
3. Hornak T. *Using polyphase filters as image attenuators* // *RF Design*, 2001. P. 26–34.
4. Шабардин Р. С., Шабардина Н. В., Бычков М. С. Кремний-германиевые квадратурные модуляторы и демодуляторы для диапазона частот до 6 ГГц и выше // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. — М.: МИРЭА. — 2013.
5. Филиппов И. Ф., Поморев А. С., Харитонов С. А., Дученко Н. В., Ветров И. Л., Вертегел В. В., Гимпилевич Ю. Б. Разработка и исследование SiGe интегральных формирователей квадратурных сигналов L- и S-диапазонов // *Международный форум «Микроэлектроника-2017»*. 3-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и электронные модули». Сборник докладов. Республика Крым, г. Алушта, 2–7 октября 2017 г. // *Наноиндустрия*. Спецвыпуск (82), 2018. — С. 488–497.
6. Gutierrez I., Melendez J., Hernandez E. *Design and characterization of integrated varactors for RF applications* // *J. Wiley & Sons*, 2006. 180 p.
7. Недашковский Л. В. Исследование и разработка тракта гетеродина СВЧ кремний-германиевых квадратурных модуляторов и демодуляторов // *Научные горизонты*, 2018. — № 1 (5). — С. 209–225.
8. Недашковский Л. В., Шабардин Р. С. Исследование и разработка тракта гетеродина прецизионных СВЧ-модуляторов и демодуляторов с цифровой регулировкой разбаланса между квадратурными сигналами // *Материалы научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика — 2018»*: сборник статей. — М.: МИЭТ, 2018. — С. 156–162.