



РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ SIGE ИНТЕГРАЛЬНЫХ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ КВАДРАТУРНЫХ СИГНАЛОВ L- И S-ДИАПАЗОНОВ

DESIGN AND RESEARCH OF L- AND S-BAND SIGE INTEGRATED QUADRATURE SIGNAL GENERATORS

УДК 621.3.049.774.3

ФИЛИППОВ ИВАН ФЕДОРОВИЧ

*Инженер НИЛ «Разработка интегральных схем»
инжинирингового центра изделий
микро- и нанoeлектроники СевГУ
iffilippov@yandex.ru*

FILIPPOV IVAN F.

iffilippov@yandex.ru

ПОМОРЕВ АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

*Инженер НИЛ «Разработка интегральных схем»
инжинирингового центра изделий
микро- и нанoeлектроники СевГУ
ASPomorew@sevsu.ru*

POMOREV ANDREY S.

ASPomorew@sevsu.ru

ХАРИТОНОВ СЕМЕН АЛЕКСЕЕВИЧ

*Инженер НИЛ «Разработка интегральных схем»
инжинирингового центра изделий
микро- и нанoeлектроники СевГУ
SAKharitonov@sevsu.ru*

KHARITONOV SEMYON A.

SAKharitonov@sevsu.ru

ДУЧЕНКО НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

*Инженер НИЛ «Разработка интегральных схем»
инжинирингового центра изделий
микро- и нанoeлектроники СевГУ
NVDuchenko@sevsu.ru*

DUCHENKO NIKOLAY V.

NVDuchenko@sevsu.ru

ВЕТРОВ ИГОРЬ ЛЕОНИДОВИЧ

*К. т. н., в. н. с. инжинирингового центра изделий микро-
и нанoeлектроники СевГУ
rtvetrov@mail.ru*

VETROV IGOR L.

rtvetrov@mail.ru

ВЕРТЕГЕЛ ВАЛЕРИЙ ВИКТОРОВИЧ

*К. т. н., доц., директор инжинирингового центра изделий
микро- и нанoeлектроники СевГУ
vertegel@bk.ru*

VERTEGEL VALERY V.

vertegel@bk.ru

ГИМПИЛЕВИЧ ЮРИЙ БОРИСОВИЧ

*Д. т. н., проф., директор института радиоэлектроники
и информационной безопасности СевГУ
gimpil@mail.ru*

GIMPILEVICH YURI B.

gimpil@mail.ru

*Инжиниринговый центр изделий микро-
и нанoeлектроники СевГУ
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел.: +7 (978) 73-01-627*

*Engineering Center of Micro- and Nanoelectronics Devices SevSU
“Integrated Circuits Design” Research Laboratory
33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053
Tel.: +7 (978) 73-01-627*

Современную приемопередающую аппаратуру L-, S-, C-диапазонов строят с применением квадратурной обработки сигналов, реализуемой на основе интегральных схем формирователей квадратурных сигналов (ФКС). В работе представлен обзор типов, методов расчета и характеристик интегральных ФКС, широко применяемых при построении сложнфункциональных блоков приемопередающих устройств. Показана возможность улучшения характеристик ФКС, разработанных на основе недорогой SiGe БиКМОП технологии. Представлены результаты разработки и моделирования характеристик принципиальных схем, топологий формирователей квадратурных сигналов на основе LC-, RC-цепей, триггеров диапазона 1–4 ГГц.

Ключевые слова: полифазный фильтр; формирователь квадратурных сигналов; SiGe; БиКМОП.

Modern L-, S-, and C-band transceivers are built using quadrature signal processing implemented on the basis of quadrature signal generator (QSG) integrated circuits. The paper provides an overview of the types, calculation methods and characteristics of integrated QSG that are widely used in the construction of complex-functional blocks of the transceiver devices, as well as highlights the opportunity to improve the performance of the QSG developed on the basis of SiGe BiCMOS technology. In addition, the report presents the results of design and simulation characteristics of schematic diagrams, layout of QSG based on LC-, RC-network and triggers for 1–4GHz frequency range.

Keywords: polyphase filter; quadrature signal generator; SiGe; BiCMOS.

ВВЕДЕНИЕ

Рынок беспроводной связи демонстрирует значительные темпы роста за последние десятилетия. Сохраняется тенденция к уменьшению размеров и стоимости используемого для беспроводной связи оборудования. Современную приемопередающую аппаратуру L-, S-, C-диапазонов строят с применением квадратурной модуляции, реализуемой на основе интегральных формирователей квадратурных сигналов [1–3].

Функциональный блок формирователя квадратурных сигналов оказывает значительное влияние на характеристики приемопередатчиков. Точность формирования квадратурных сигналов непосредственно связана с величиной коэффициента подавления зеркального канала (Image Rejection Ratio, IRR). Этот параметр, в свою очередь, определяет чувствительность приемника. Недостаточное подавление зеркального канала вызывает ухудшение модуля вектора ошибки (Error Vector Magnitude, EVM) в приемнике. Это, в свою очередь, приводит к повышению частоты появления ошибочных битов (Bit Error Rate, BER). Немаловажной является задача обеспечения стабильной работы интегральных ФКС в широком диапазоне рабочих частот при сохранении относительной простоты схемотехнических решений, малой площади кристалла.

Традиционно выделяют четыре типа формирователей квадратурных сигналов: RC-CR цепи, RC-полифазные фильтры (ПФФ), RLC-квадратурные фильтры (Quadrature All-pass Filter, QAF) и делители удвоенной частоты гетеродина на основе триггеров. ПФФ строятся на основе каскадирования цепей RC-CR. Однако методы их разработки для кремниевых и кремний-германиевых технологических процессов существенно отличаются. Это позволяет выделить ПФФ в отдельное направление при выборе структуры ФКС. В работе приведены результаты обзора типов, методов расчета и характеристик интегральных ФКС, широко применяемых при построении приемопередающих устройств. Целью настоящей работы является разработка интегральных ФКС диапазона 1–4 ГГц в рамках 180 нм SiGe БиКМОП технологического процесса. Дана оценка возможности применения разработанных ФКС при построении МИС квадратурных модуляторов и демодуляторов L-, S-, C-диапазонов частот.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ RC-ПОЛИФАЗНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Для разделения фазы сигнала на квадратурные компоненты во многих приложениях (IQ-модуляторы и демодуляторы, генераторы IQ-сигналов, системы подавления зеркального канала,

контроль поляризации и др.) применяют интегральные полифазные фильтры [4–6].

Основой ПФФ является RC-CR цепь (рис. 1). Порядок ПФФ определяется числом включенных последовательно звеньев RC-CR.

Схемотехнически RC-CR звено является комбинацией фильтров нижних и верхних частот. Недостатком RC-CR ФКС является узкая полоса рабочих частот.

Подробный обзор типов, методов расчета и характеристик пассивных полифазных фильтров приведен в источниках [7, 8]. Авторами проводится анализ влияния технологического разброса и паразитных параметров элементов на характеристики ПФФ.

Интегральные ФКС обладают рядом достоинств, таких как относительная простота реализации, малая площадь топологии, сравнительно высокая устойчивость характеристик к технологическому разбросу. Однако ПФФ характеризуются большими вносимыми потерями (около 3 дБ на секцию). Для компенсации этих потерь требуется использовать буферные усилители. Более того, термический шум резисторов в звеньях ПФФ оказывает негативное влияние на коэффициент шума ($K_{ш}$) приемного тракта. Выбор сопротивления резисторов первого звена в соответствии с выходным сопротивлением предыдущего каскада, а сопротивления резисторов последнего звена, близкие к 50 Ом, позволят сохранить приемлемое значение $K_{ш}$ [9].

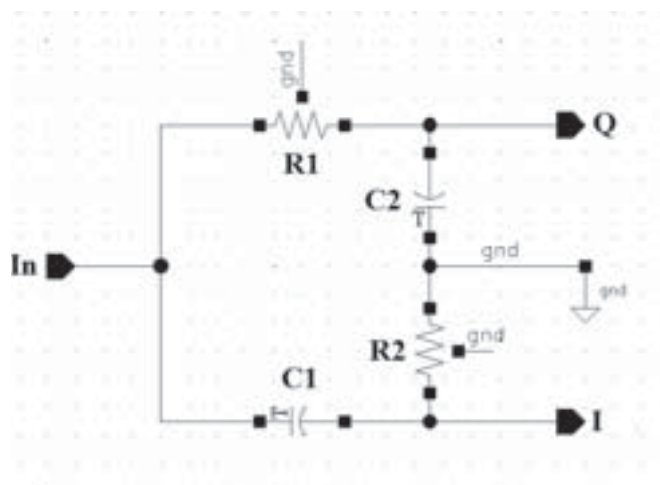


Рис. 1. Простейший ФКС на основе RC-CR цепи
Fig. 1. Simple QSG based on RC-CR circuit

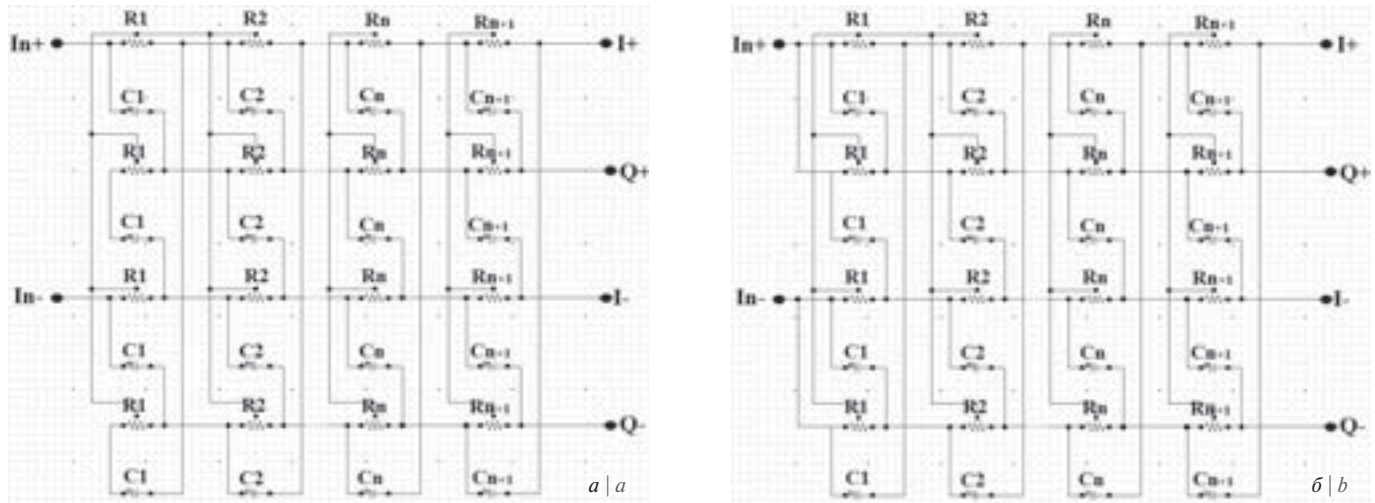


Рис. 2. Полифазные фильтры типа А (а) и типа В (б)

Fig. 2. PPFs of type A (a) and type B (b)

Пассивный полифазный расщепитель фазы может быть подключен к источнику сигнала двумя способами, которые условно назовем способ «А» и способ «Б». Каждый из них обладает своими достоинствами. Подключение полифазного расщепителя способом «А», показанное на рис. 2а, позволяет добиться низкого значения фазовой ошибки на частотах «полюсов» $\omega_n = 1/R_n C_n$. Подключение полифазного расщепителя способом «Б», показанное на рис. 2б, соответственно, позволяет добиться минимальной амплитудной ошибки.

В работе [10] показано, что для получения подавления зеркального канала порядка 40 дБ в полосе 1,8 — 6 ГГц необходимо минимум 4 звена полифазного фильтра. Пассивные полифазные фильтры высоких порядков вносят большое ослабление.

Существенно меньшим ослаблением сигнала характеризуются активные полифазные фильтры [11–14]. Однако с повышением коэффициента передачи резко снижается стабильность в связи с использованием усилителей. Частотные характеристики

активных полифазных фильтров также ограничены введенными в схему усилительными каскадами.

В отдельную категорию можно отнести полифазные фильтры с перестраиваемой рабочей полосой, которые иногда называют активными, хотя они не обеспечивают усиление сигнала. Перестройка полосы осуществляется двумя способами:

- применением транзисторов в качестве управляемых резисторов;
- применением варикапов в качестве управляемых конденсаторов.

В табл. 1 приведены параметры ПФФ, представленных в периодических изданиях и сборниках материалов международных конференций.

Обзор источников [7–13] позволяет выделить ряд особенностей методики проектирования пассивных ПФФ:

- предпочтительнее выбор подключения ПФФ к источнику сигнала способом «А». Коррекцию возникающей амплитудной

INTRODUCTION

Recent decades have witnessed a significant growth of the wireless communication market. There is a tendency to reduce the size and cost of the equipment used for wireless communication. Modern L-, S-, C-bands, transceivers are constructed using quadrature modulation based on integral quadrature signal generators [1–3].

The QSG functional block has a significant influence on the transceivers characteristics. The accuracy of the quadrature signals formation is directly related to Image Rejection Ratio (IRR). This parameter, in turn, determines the sensitivity of the receiver. Insufficient suppression of the mirror channel causes a degradation of the Error Vector Magnitude (EVM) of the receiver. This leads to an increase of Bit Error Rate (BER). Among most important tasks is ensuring

stable operation of integral QSG in a wide range of operating frequencies while maintaining the relative simplicity of circuitry, and a small chip area.

Traditionally, four types of quadrature signal generators are distinguished: RC-CR circuits, RC-polyphase filters (PPFs), quadrature all-pass filters (QAFs), and digital quadrature phase splitters based on triggers. PPF are built on the basis of cascaded RC-CR circuits. However, the methods of their designing for Si and SiGe processes are significantly different. Thus, the design of the PPF is a separate area for the development of the QSG.

This paper presents the results of a review of the types, calculation methods and characteristics of integral QSGs that are widely used in transceivers. The purpose of this work is to design integral QSGs of 1–4GHz frequency range within 180nm SiGe BiCMOS

technological process. The possibility of application of the designed QSGs in L-, S-, C-band quadrature modulator and demodulator MMICs has been estimated.

INTEGRAL RC-POLYPHASE FILTERS

Integral polyphase filters are used for splitting the signal phase into quadrature components in many applications (IQ modulators and demodulators, IQ signal generators, image rejection systems, polarization control, etc.) [4–6].

Polyphase filters are based on RC-CR circuits (Fig. 1). The PPF order is determined by the number of cascaded RC-CR circuits.

The RC-CR circuit is a combination of low-pass and high-pass filters. The disadvantage of RC-CR QSG is its narrow operating frequency band.

Таблица 1. Характеристики ПФФ

Table 1. PPF characteristics

Источник Source	[2]	[4]	[5]	[12]	[13]	[14]
Технология Technology process	КМОП 0,13 мкм CMOS 0.13μm	SiGe БиКМОП 0,13 мкм SiGe BiCMOS 0.13μm	КМОП 0,13 мкм CMOS 0.13μm	КМОП 65 нм CMOS 65nm	БиКМОП 0,25 мкм BiCMOS 0.25μm	КМОП 0,25 мкм CMOS 0.25μm
Тип Type	Перестр. Adjust.	Пассивный Passive	Перестр. Adjust.	Перестр. Adjust.	Активный Active	Активный Active
Количество звеньев Number of stages	4	4	4	2	5	4
Диапазон рабочих частот (Δf), ГГц Frequency range (Δf), GHz	2,47–2,83	0,4–6	2–2,8	1–5	0,01–0,09	0,06–0,03
Фазовая ошибка (Δφ), град. Phase error (Δφ), degrees	< 1	< 1	—	< 3	—	—
Амплитудная ошибка (ΔS21), дБ Amplitude error (ΔS21), dB	—	0,01	—	< 0,2	—	—
Подавление зеркального канала (IRR), дБ Image rejection ratio (IRR), dB	> 70	—	> 72	> 40	50	> 48

ошибки предлагается осуществлять усилителями-ограничителями (УО);

- предпочтительным является разделение «полюсов» многозвенных ПФФ;
- оптимальное расстояние между полюсами определяется относительной полосой рабочих частот;
- предпочтительным является соблюдение равенства емкостей в секция ПФФ;
- величина сопротивления резисторов вычисляется исходя из сопротивлений источника сигнала и нагрузки ФКС и должна расти от каскада к каскаду;
- необходимое и достаточное число секций ПФФ определяется требуемой величиной IRR и разбросом технологических параметров элементов ФКС;

A detailed review of types, calculation methods and characteristics of passive polyphase filters is given in the sources [7, 8]. The authors analyze the influence of technological process mismatch and parasitic parameters of elements on the characteristics of the PPF.

Integral microwave PPFs have a number of advantages such as relative ease of implementation, a small area of topology, relatively high resistance of characteristics to technological mismatch. However, they are characterized by large insertion loss (around 3dB per stage). Buffer amplifiers are used to compensate for these losses. Moreover, the thermal noise of the resistors in the PPF stages has a negative effect on the noise figure (NF) of the receiver. The choice of the resistance of the first stage resistors in accordance with output resistance of the previous stage, and

the resistance of the last stage resistors close to 50 Ohms will allow getting an acceptable value of NF [9].

A passive polyphase phase filter can be connected to the signal source in two ways, which conditionally we call “Type A” and “Type B” connection. Each of them has its own advantages. Connecting the polyphase filter by “Type A” method shown in Fig. 2 (a) allows achieving a low phase error at the “pole” frequencies $\omega_n = 1/R_n C_n$. Fig. 2 (b) shows the connection of a polyphase filter by “Type B” method that, respectively, allows achieving a low amplitude error.

It was shown in [10] that a minimum of 4 stages of a polyphase filter are required to obtain a suppression of the mirror channel of 40dB in the 1.8 to 6GHz band. Passive high-order polyphase filters have high insertion loss.

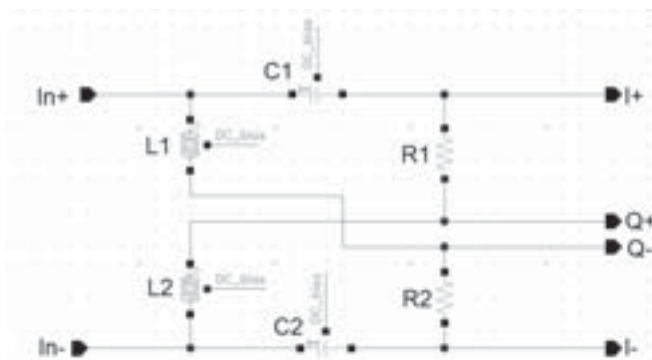


Рис. 3. Принципиальная схема квадратурного RLC-фильтра

Fig. 3. Schematic diagram of the quadrature RLC filter

Active polyphase filters are characterized by significantly lower signal attenuation [11–14]. However, with the increase in the transfer ratio, the stability is reduced due to the use of buffer amplifiers. The frequency characteristics of active polyphase filters are also limited by these amplifiers.

Polyphase filters with adjustable characteristics are included in a separate category. Adjustable PPFs are also called active, but they do not provide amplification of the signal. Frequency range tuning is carried out in two ways:

- using transistors as controlled resistors;
- using varicaps as controlled capacitors.

Table 1 presents parameters of the PPFs presented in periodicals and materials of the international conferences.

A review of the sources [7–13] makes it possible to determine a number of features of the design methodology for passive PPFs:



- при необходимости увеличить величину подавления зеркального канала корректировку фазовой ошибки ФКС возможно производить дополнительным управляемым фазовращателем.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ RLC-КВАДРАТУРНЫЕ ФИЛЬТРЫ

В интегральном исполнении, особенно для малосигнальных приложений, находят применение квадратурные фильтры на основе RLC-цепочек [15, 16]. Принципиальная схема RLC-фильтра приведена на рис. 3.

Проектирование квадратурных RLC-фильтров обладает рядом особенностей:

- добротность цепи выбирают равной 1 ($Q = \sqrt{L/C}/R = 1$). При этом коэффициент передачи по напряжению на центральной частоте $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$ равен 3 дБ;
- ширина полосы рабочих частот определяется добротностью интегральных катушек индуктивности. Низкодобротные катушки Si КМОП технологий обеспечивают широкую полосу рабочих частот ФКС;
- входное сопротивление следующего за RLC-фильтром каскада оказывает сильное влияние на его характеристики. Высокое входное сопротивление обеспечивает лучшие характеристики.

Таблица 2. Характеристики триггерных ФКС

Table 2. Trigger QSG characteristics

Источник Source	[1]	[17]	[18]	[19]
Технология Technology process	КМОП 65 нм CMOS 65nm	InP ГБТ 0,13 мкм InP HBT 0.13μm	КМОП 0,13 мкм CMOS 0.13μm	SiGe БиКМОП 0,35 мкм SiGe BiCMOS 0.35μm
Диапазон рабочих частот (Δf), ГГц Frequency range (Δf), GHz	0,5–9,5	0,05–26	0,7–2,56	0,8–5,2
Фазовая ошибка (Δφ), град. Phase error (Δφ), degrees	<5	—	0,3–10	<2
Амплитудная ошибка (ΔS21), дБ Amplitude error (ΔS21), dB	1,3	—	0,03–0,1	—
Подавление зеркального канала (IRR), дБ Image rejection ratio (IRR), dB	—	> 61,8	—	—

- it is preferable to select the “Type A” connection of the PPF to the signal source. The correction of the resulting amplitude error should be carried out by amplifier-limiters (AL);
- the separation of the “poles” of multi-stage PPFs is preferable;
- the optimal distance between the “poles” is determined by the relative bandwidth of the PPF;
- equal capacities in the PPF stages are preferable;
- the resistance of the resistors is calculated basing on the impedances of the signal source and the load of the QSG, and it must grow from stage to stage;
- the necessary and sufficient number of stages of the PPF is determined by the required value of the IRR and the mismatch of the technological process;

- the phase error correction can be made by an additional controlled phase shifter.

INTEGRAL QUADRATURE RLC FILTERS

In the integral version, especially for small-signal applications, quadrature filters based on RLC-circuitry are used [15, 16]. Fig. 3 shows a schematic diagram of the RLC filter.

The design of quadrature RLC filters has a number of features:

- Quality factor of the circuit must be close to 1 ($Q = \sqrt{L/C}/R = 1$). In this case, transmission ratio of the circuit for the voltage at the central frequency $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$ equals 3dB;
- the RLC filter bandwidth is determined by the quality factor of the integral inductance coils. Low-Q Si CMOS technology

process coils provide a wide range of operating frequencies;

- the input impedance of the following cascade has a strong influence on RLC filter characteristics. High input impedance provides better performance.

In case of a capacitive load of RLC-quadrature filters, it is possible to correct the amplitude and phase errors by setting correcting resistors of the same value in series with the inductance coils and capacitors [16].

DIGITAL QUADRATURE PHASE SPLITTERS

Digital quadrature phase splitters based on D-type flip-flops are widely used in quadrature modulator and demodulator MMICs [17–19]. Fig. 4 shows functional diagram of the trigger QSG (a) and time diagrams of its operation (b).

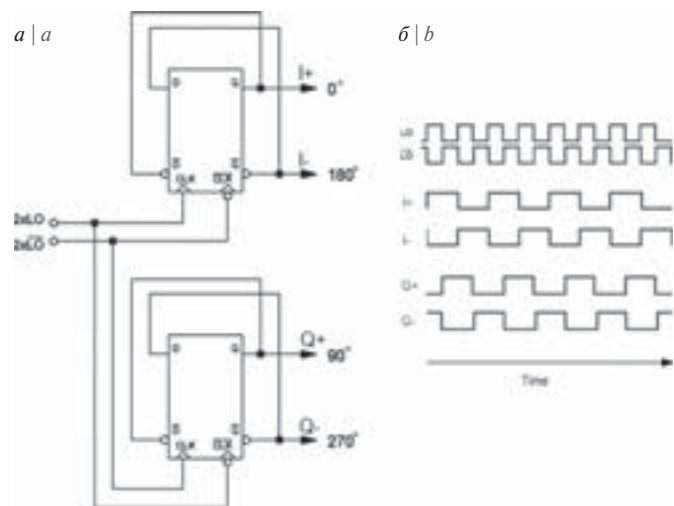


Рис. 4. Функциональная схема цифрового квадратурного расщепителя фазы на D-триггерах (а) и временные диаграммы ее работы (б)
Fig. 4. Functional diagram of the digital quadrature phase splitter based on D-flip-flops (a) and time diagrams of its operation (b)

В случае емкостной нагрузки RLC-квадратурных фильтров возможно осуществлять коррекцию амплитудной и фазовой ошибок при помощи введения в цепь последовательно с катушками индуктивности и конденсаторами корректирующих резисторов одинакового номинала [16].

ЦИФРОВЫЕ КВАДРАТУРНЫЕ РАСЩЕПИТЕЛИ ФАЗЫ

В МИС квадратурных модуляторов и демодуляторов широко применяются цифровые квадратурные расщепители фазы на основе D-триггеров [17–19]. Функциональная схема триггерного ФКС, а также временные диаграммы его работы приведены на рис. 4а и (б) соответственно.

Схема представляет собой комбинацию двух делителей частоты. В табл. 2 приведены параметры триггерных ФКС, представленных в периодических изданиях и сборниках материалов международных конференций.

Следует отметить, что величина фазовой ошибки в [19] получена после коррекции полифазным фильтром первого порядка. Разбаланс фазы без коррекции составляет 3–4 градуса в диапазоне 0,8–5,2 ГГц.

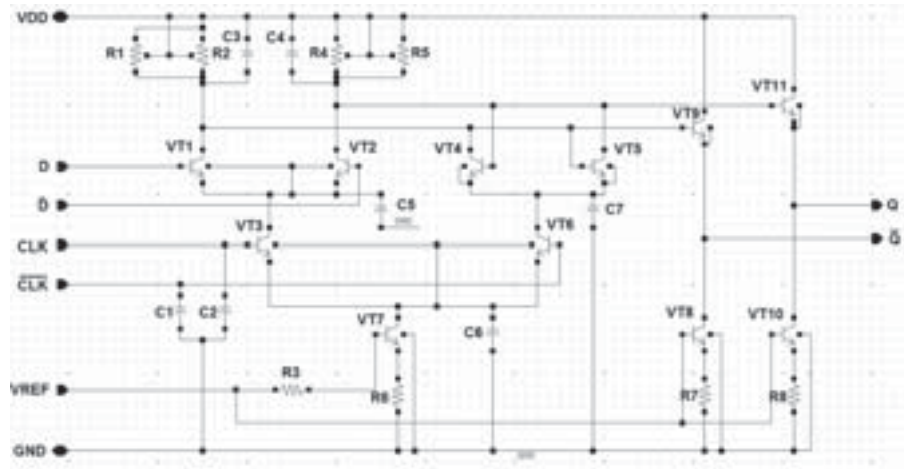


Рис. 5. Принципиальная схема D-триггера на логике с переключением тока
Fig. 5. Schematic diagram of the current-mode logic latch

Преимуществом триггерных ФКС является возможность достичь высокого уровня согласования в широком диапазоне частот [10].

На рис. 5 приведена принципиальная схема D-триггера на логике с переключением тока (Current-mode logic latch в зарубежных источниках), разработанного на основе 0,18 мкм SiGe БиКМОП технологического процесса.

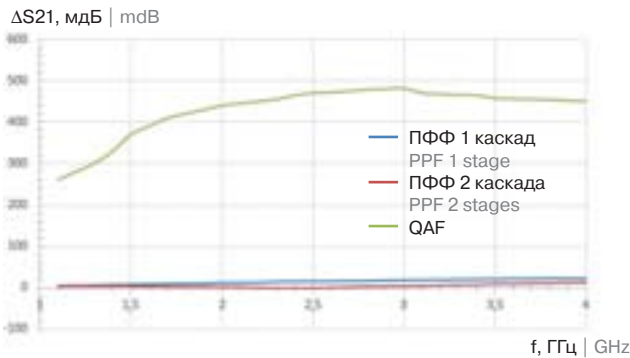


Рис. 6. Зависимость относительной амплитудной ошибки от частоты
Fig. 6. Dependence of the relative amplitude error on frequency

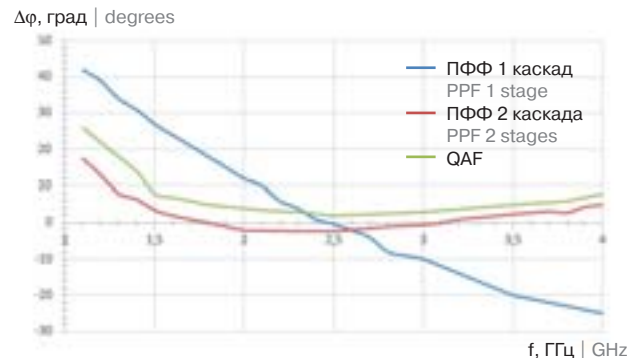


Рис. 7. Зависимость относительной фазовой ошибки от частоты
Fig. 7. Dependence of the relative phase error on frequency

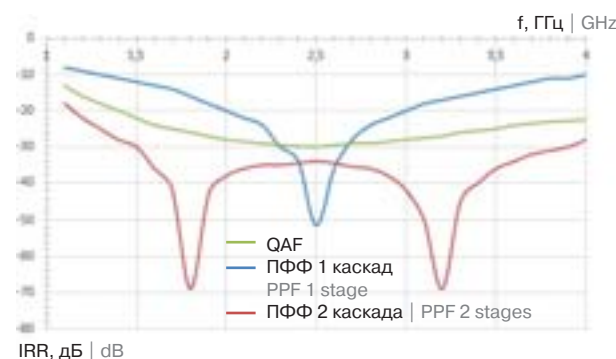


Рис. 8. Зависимость IRR от частоты
Fig. 8. Dependence of the IRR from frequency

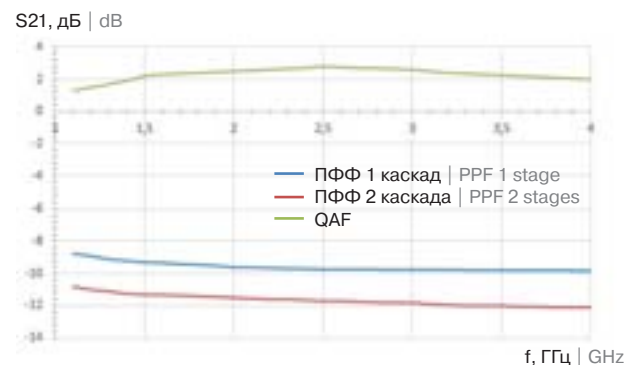


Рис. 9. Зависимость коэффициента передачи различных типов ФКС от частоты
Fig. 9. Dependence of the transfer ratio on frequency

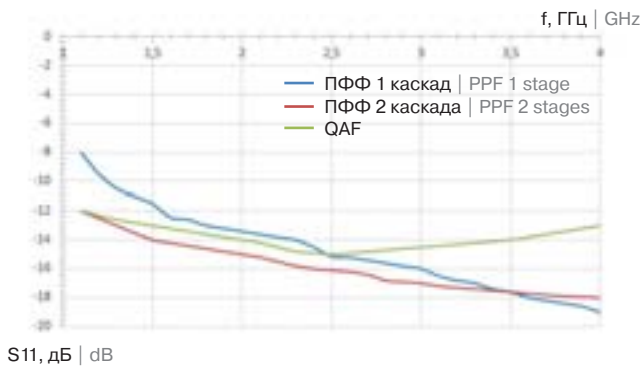


Рис. 10. Зависимость возвратных потерь по входу различных типов ФКС от частоты

Fig. 10. Dependence of input return losses on frequency



Рис. 11. Зависимость относительной амплитудной ошибки от частоты

Fig. 11. Dependence of the relative amplitude error on frequency

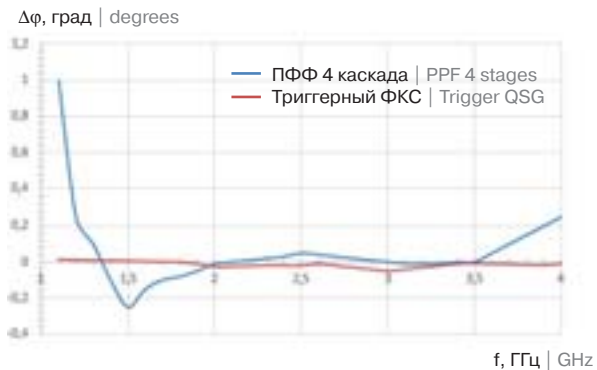


Рис. 12. Зависимость относительной фазовой ошибки от частоты

Fig. 12. Dependence of the relative phase error on frequency



Рис. 13. Зависимость IRR от частоты

Fig. 13. Dependence of the IRR on frequency

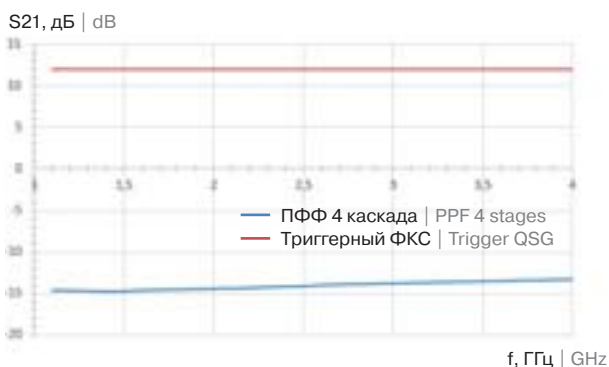


Рис. 14. Зависимость S21 от частоты

Fig. 14. Dependence of the transfer ratio on frequency

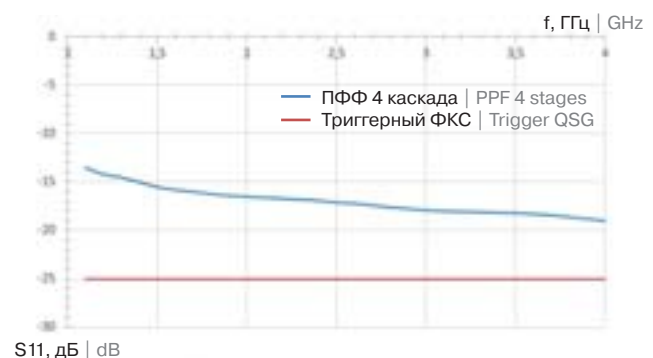


Рис. 15. Зависимость S11 от частоты

Fig. 15. Dependence of input return losses on frequency

В таком триггере протекает постоянный ток. Это обуславливает низкий уровень выбросов тока, которые при большой скорости переключения могут распространяться к другим чувствительным элементам схемы.

Для уменьшения разбаланса амплитуд на выходах ФКС применяются усилители-ограничители. УО также выполняет функцию буферного усилителя, обеспечивает согласование выхода ФКС с последующим каскадом.

Погрешность сдвига фазы в триггерном ФКС зависит от коэффициента заполнения сигнала, который должен быть строго равен 50%. Любые отклонения от этой величины приводят к фазовому

разбалансу на выходе ФКС. Возможно осуществлять коррекцию фазовой ошибки триггерных ФКС при помощи использования УО на входе схемы.

Триггерные схемы чувствительны к качеству топологии. Длины проводников, по которым протекает сигнал гетеродина, должны быть строго равны [10]. Невыполнение данного условия приводит к изменению скважности и, соответственно, появлению фазовой ошибки. Существенным недостатком триггерных схем, ограничивающих возможность их применения, является необходимость использования входного сигнала с удвоенной рабочей частотой.

Таблица 3. Характеристики разработанных формирователей квадратурных сигналов

Table 3. Characteristics of the designed quadrature signal generators

Тип ФКС Type	RC-CR	ПФФ 2 каскада 2 stages PPF	RLC-фильтр RLC-filter	ПФФ 4 каскада 4 stages PPF	Триггерный ФКС Trigger QSG
Диапазон рабочих частот (Δf), ГГц Frequency range (Δf), GHz	2,1–2,8	1,3–4	1,5–4	1–4	1–4
Возвратные потери по входу (S_{11}), дБ Input return losses (S_{11}), dB	< –13	< –13	< –15	< –13,5	< –25
Коэффициент передачи (S_{21}), дБ Transfer ratio (S_{21}), dB	–9	–11	2–2,9	–14,75...–13,25	12
Амплитудная ошибка (ΔS_{21}), дБ Amplitude error (ΔS_{21}), dB	< 0,02	< 0,01	< 0,48	< 0,02	< 0,3
Фазовая ошибка ($\Delta\phi$), град. Phase error ($\Delta\phi$), degrees		< 8		< 1	< 0,02
Подавление зеркального канала (IRR), дБ Image rejection ratio (IRR), dB	> 20	> 25	> 22,5	> 40	> 79
Площадь кристалла ($S_{кр}$), мм ² Chip area (S_{die}), mm ²	0,01	0,02	0,19	0,08	0,02
Технология Technology process	0,18 мкм SiGe БиКМОП 0.18 μ m SiGe BiCMOS				

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На основе библиотеки элементов 0,18 мкм SiGe БиКМОП технологического процесса были разработаны полифазные фильтры 1, 2 и 4 порядков, квадратурный RLC-фильтр, триггерный ФКС. Для оценки возможности применения разработанных ФКС в МИС квадратурных модуляторов и демодуляторов L-, S-, C-диапазонов частот проведено моделирование их характеристик с учетом температурного и технологического разброса.

На рис. 6–7 представлены зависимости относительной амплитудной и фазовой ошибок выходных сигналов ПФФ 1 порядка, ПФФ 2 порядка и RLC-фильтра от частоты.

На рис. 8 представлена зависимость коэффициента подавления зеркального канала при использовании для формирования квадратурных сигналов ПФФ 1 порядка, ПФФ 2 порядка, RLC-фильтра от частоты.

The circuit is a combination of two frequency dividers. Table 2 shows the parameters of the trigger QSGs presented in periodicals and materials of international conferences.

It should be noted that the phase error in [19] was obtained upon correction by a first-order polyphase filter. Phase imbalance without correction is 3–4 degrees in the frequency range of 0.8–5.2GHz.

The advantage of trigger QSG is the opportunity to achieve a high level of matching in a wide frequency range [10].

Fig. 5 shows a schematic diagram of current-mode logic latch developed on the basis of 0.18 μ m SiGe BiCMOS process.

Direct current flows in such D-type flip-flop. This causes a low level of current emissions, which at a high switching speed can propagate to other sensitive elements of the circuit.

Amplifier-limiters are used to reduce the imbalance of the amplitudes at the outputs of the QSG. The AL also serves as a buffer amplifier, making sure that the output of the QSG matches a subsequent cascade.

The phase error in the trigger QSG depends on the duty cycle of the signal, which must be strictly equal to 50%. Any deviation from this value results in a phase imbalance at the output of the QSG. It is possible to correct the phase error of the trigger phase splitter by using the AL at the input of the circuit.

Trigger circuits are sensitive to the quality of topology. The lengths of the conductors through which the LO signal flows must be strictly equal [10]. Failure to comply with this condition leads to a change in the duty cycle and, accordingly, to the appearance of a phase error. A significant drawback of trigger circuits, limiting the possibility of their use,

is the need to use an input signal with twice the operating frequency.

SIMULATION RESULTS

One, two and four stages polyphase filters, RLC-quadrature filter and trigger QSG on the basis of the 0.18 μ m SiGe BiCMOS technology process have been developed. To evaluate the possibility of using designed QSG in L-, S-, and C-band quadrature modulators and demodulators MMICs, their characteristics have been modeled taking into account temperature and technological mismatch.

Figs 6–7 show dependences of output signals relative amplitude and phase errors of the 1st and 2nd stages of PPFs and RLC-filter on frequency.

Fig. 8 shows the dependence of image rejection ratio when applying 1 and 2 stages PPFs and RLC-filter on frequency.



На рис. 9 представлена зависимость коэффициента передачи ПФФ 1 порядка, ПФФ 2 порядка, RLC-фильтра от частоты.

На рис. 10 представлена зависимость возвратных потерь по входу ПФФ 1 порядка, ПФФ 2 порядка, RLC-фильтра от частоты.

На рис. 11–12 представлены зависимости относительной амплитудной и фазовой ошибок выходных сигналов ПФФ 4 порядка, триггерного ФКС от частоты.

На рис. 13 представлена зависимость коэффициента подавления зеркального канала при использовании для формирования квадратурных сигналов ПФФ 4 порядка, триггерного ФКС от частоты.

На рис. 14 представлена зависимость коэффициента передачи ПФФ 4 порядка, триггерного ФКС от частоты.

На рис. 15 представлена зависимость возвратных потерь по входу ПФФ 4 порядка, триггерного ФКС от частоты.

Полученные в результате моделирования параметры интегральных ФКС представлены в табл. 3.

Наилучшими характеристиками среди разработанных ФКС обладает цифровой расщепитель фазы. Его параметры также показали лучшую устойчивость к температурному и технологическому разбросу. Перспективным для применения в МИС СВЧ квадратурных модуляторов и демодуляторов является ПФФ 4 порядка. Целесообразным является применение корректирующего управляемого фазовращателя для повышения величины коэффициента подавления зеркального канала до значений, сопоставимых с аналогичным параметром триггерного ФКС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен обзор типов, методов и особенностей проектирования СВЧ интегральных ФКС, широко применяемых при построении МИС приемопередающих модулей. Представлены результаты разработки и моделирования параметров формирователей квадратурных сигналов диапазона 1–4 ГГц на основе SiGe БиК-МОП технологии. Выполнен сравнительный анализ их характеристик с характеристиками ближайших известных прототипов. Показана возможность коррекции параметров, разработанных ФКС.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: удалось по ряду технических характеристик превзойти известные ближайшие прототипы СВЧ интегральных ФКС, разработанные ранее в рамках кремниевых технологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

- Hampel S. *9-GHz Wideband CMOS RX and TX Front-Ends for Universal Radio Applications* / Sven Karsten Hampel, Oliver Schmitz, Marc Tiebout, Koen Mertens, and Ilona Rolfes // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2012, pp. 1105–1116.
- Haddad F. *On the Investigation of Built-in Tuning of RF Receivers Using On-chip Polyphase Filters* / Haddad F., Rahajandraibe W., Aziza H., Castellani-Coulié K., Portal J.-M. // IEEE 31st VLSI Test Symposium (VTS). — 2013, pp. 1–6.
- Kageyama C. *0.8–5.2GHz Band SiGe-MMIC Q-MIX for a Multi-Band Multi-Mode Direct Conversion Receiver* / Chiemi Kageyama, Kensuke Nakajima, Kouji Tsutsumi, Eiji Taniguchi, Mitsuhiro Shimozawa, Noriharu Suematsu // IEEE Radio and Wireless Conference. — 2004, pp. 211–214.
- Guo Y. *Analysis and Design of a 400MHz–6GHz Quadrature Demodulator with High Linearity* / Yadi Guo, Jun Fu, Baoyong Chi, Yudong Wang, Jie Cui // 2016 5th International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE). — 2016, pp. 1–2.
- Haddad F. *Design of Radio Frequency Passive Polyphase Filter for 2.4GHz Wireless Communication Applications* / F. Haddad, W. Rahajandraibe, L. Zaid, O. Frioui and R. Bouchakour // Wireless and Microwave Technology Conference, WAMICON '09. IEEE 10th Annual. — 2009, pp. 1–4.
- Otaka S. *A Low Local Input 1.9GHz Si-Bipolar Quadrature Modulator With No Adjustment* / Shoji Otaka, Takafumi Yamaji, Ryuichi Fujimoto, Chikau Takahashi, and Hiroshi Tanimoto // IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, Vol. 31, 1996, pp. 30–37.
- Kaukokuori J. *Analysis and Design of Passive Polyphase Filters* / J. Kaukokuori, K. Stadius, J. Rynanen, K.A. I. Halonen // IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Regular Papers. — Vol. 55, № 10. — November 2008, pp. 3023–3037.
- Behbahani F. *CMOS Mixers and Polyphase Filters for Large Image Rejection* / F. Behbahani, Y. Kishigami, J. Leete, Asad A. Abidi // IEEE Journal of Solid-State Circuits. — Vol. 36, № 6. — June 2001, pp. 873–887.
- Vancoren P. *A Wideband IMRR Improving Quadrature Mixer/LO Generator* / P. Vancoren, M. Steyaert // Proceedings of the European Solid-State Circuits Conference (ESSIRC'2001). — 2001, pp. 360–363.
- Zhang Y. *Wireless Transmitter IQ Balance and Sideband Suppression* / Yi Zhang // Wireless Technologies. — 2011, Vol. 1, pp. 60–63.
- Kaltioikallio M. *Active Polyphase Filter Analysis* / Mikko Kaltioikallio, Jussi Rynänen // Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. — 2010, pp. 1125–1128.
- Mikko Kaltioikallio. *A 1 to 5GHz Adjustable Active Polyphase Filter for LO Quadrature Generation* / Mikko Kaltioikallio and Jussi Rynänen // IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. — 2011.
- Notten M. *A 5th Order 14 mWatt Active Polyphase Filter for Analog and Digital TV on Mobile Applications* / Marc Notten, Hans Brekelmans Philips Research // 2006 Proceedings of the 32nd European Solid-State Circuits Conference. — 2006, pp. 211–214.
- Chung-Yun Chou. *The Design of Wideband and Low-Power CMOS Active Polyphase Filter and Its Application in RF Double-Quadrature Receivers* / Chung-Yun Chou, Chung-Yu Wu // IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: regular papers, Vol. 52, № 5. — 2005, pp. 825–833.
- Vertegel V.V. *X-band Active Vector Phase Shifter MMIC Design* / V.V. Vertegel, Y.B. Gimpilevich, D.V. Lyalyuk, I.F. Filippov // Nanoindustry, International Forum “Microelectronics-2016” 2nd Scientific Conference “Integrated Circuits and Microelectronic Modules”: Special issue. — Vol. 74. — May 2007, pp. 458–463.
- Sang Young Kim. *An Improved Wideband All-Pass I/Q Network for Millimeter-Wave Phase Shifters* / Sang Young Kim, Dong-Woo Kang, Kwang-Jin Koh, Gabriel M. Rebeiz // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — Vol. 60, № 11. — November 2012. — p. 3431–3439.
- Iverson E. *A 0.05–26GHz Direct Conversion I/Q Modulator MMIC* / Eric W. Iverson, Milton Feng // 2014 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). — 2014, pp. 1–4.
- Poobuapheun N. *A 1.5V 0.7–2.5GHz CMOS Quadrature Demodulator for Multi-band Direct-Conversion Receivers* / Nuntachai Poobuapheun, Wei-Hung Chen, Zdravko Boos, and Ali M. Niknejad // 2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings. — 2005, pp. 1669–1677.
- Suematsu N. *0.8–5.2GHz Band SiGe-MMIC Q-MOD for Multi-Band Multi-Mode Direct Conversion Transmitters* / Yadi Guo, Jun Fu, Baoyong Chi, Yudong Wang, Jie Cui // Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings. — 2005. — p. 4.

Fig. 9 shows the dependence of transfer ratio of 1 and 2 stages PPFs and RLC-filter on frequency.

Fig. 10 shows the dependence of input return losses of 1 and 2 stages PPFs and RLC-filter on frequency.

Figs 11–12 show the dependences of output signals relative amplitude and phase errors of 4 stages PPF and trigger QSG on frequency.

Fig. 13 shows the dependence of image rejection ratio on frequency when applying 4 stages PPF and trigger QSG.

Fig. 14 shows the dependence of transfer ratio of the 4 stages PPF and trigger QSG on frequency.

Fig 15 shows the dependence of input return losses of 4 stages PPF and trigger QSG on frequency.

Table 3 presents the resulting parameters of integral quadrature signal generators.

Digital phase splitter has best characteristics among the designed QSG. Besides, its parameters have shown better resistance to temperature and technological process mismatch. Using 4 stages PPF in quadrature modulator and demodulator MMICs is most promising. It is advisable to use controlled phase shifter in order to correct phase imbalance and respectively increase the value of the image rejection ratio to values comparable to the trigger QSG.

CONCLUSION

An overview of the types, methods and design features of microwave integral QSG that are widely used in the design of MMICs for transceiver modules has been presented, as well as design and simulation results of 1–4GHz quadrature signal generators based on SiGe BiCMOS technology. A comparative analysis of their characteristics with those of the nearest known prototypes has been performed and the possibility of QSG parameters correction has been shown.

The authors believe that the following terms and results in this study are novel: we have succeeded in surpassing by a range of technical characteristics the closest prototypes of the QSG developed earlier in Si technology processes.

REFERENCES

- Hampel S. *9-GHz Wideband CMOS RX and TX Front-Ends for Universal Radio Applications* / Sven Karsten Hampel, Oliver Schmitz, Marc Tiebout, Koen Mertens, and Ilona Rolfes // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2012, pp. 1105–1116.
- Haddad F. *On the Investigation of Built-in Tuning of RF Receivers Using On-chip Polyphase Filters* / Haddad F., Rahajandraibe W., Aziza H., Castellani-Coulié K., Portal J.-M. // IEEE 31st VLSI Test Symposium (VTS). — 2013, pp. 1–6.
- Kageyama C. *0.8–5.2GHz Band SiGe-MMIC Q-MIX for a Multi-Band Multi-Mode Direct Conversion Receiver* / Chiemi Kageyama, Kensuke Nakajima, Kouji Tsutsumi, Eiji Taniguchi, Mitsuhiro Shimozawa, Noriharu Suematsu // IEEE Radio and Wireless Conference. — 2004, pp. 211–214.
- Guo Y. *Analysis and Design of a 400MHz-6GHz Quadrature Demodulator with High Linearity* / Yadi Guo, Jun Fu, Baoyong Chi, Yudong Wang, Jie Cui // 2016 5th International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE). — 2016, pp. 1–2.
- Haddad F. *Design of Radio Frequency Passive Polyphase Filter for 2.4GHz Wireless Communication Applications* / F. Haddad, W. Rahajandraibe, L. Zaid, O. Frioui and R. Bouchakour // Wireless and Microwave Technology Conference, WAMICON '09. IEEE 10th Annual. — 2009, pp. 1–4.
- Otaka S. *A Low Local Input 1.9GHz Si-Bipolar Quadrature Modulator With No Adjustment* / Shoji Otaka, Takafumi Yamaji, Ryuichi Fujimoto, Chikau Takahashi, and Hiroshi Tanimoto // IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, Vol. 31, 1996, pp. 30–37.
- Kaukovoouri J. *Analysis and Design of Passive Polyphase Filters* / J. Kaukovoouri, K. Stadius, J. Ryyanen, K.A. I. Halonen // IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Regular Papers. — Vol. 55, №10. — November 2008, pp. 3023–3037.
- Behbahani F. *CMOS Mixers and Polyphase Filters for Large Image Rejection* / F. Behbahani, Y. Kishigami, J. Leete, Asad A. Abidi // IEEE Journal of Solid-State Circuits. — Vol. 36, №6. — June 2001, pp. 873–887.
- Vancoren I. P. *A Wideband IMRR Improving Quadrature Mixer/LO Generator* / P. Vancoren I., M. Steyaert // Proceedings of the European Solid-State Circuits Conference (ESSIRC'2001). — 2001, pp. 360–363.
- Zhang Y. *Wireless Transmitter IQ Balance and Sideband Suppression* / Yi Zhang // Wireless Technologies. — 2011, Vol. 1, pp. 60–63.
- Kaltiokallio M. *Active Polyphase Filter Analysis* / Mikko Kaltiokallio, Jussi Ryyänen // Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. — 2010, pp. 1125–1128.
- Mikko Kaltiokallio. *A 1 to 5GHz Adjustable Active Polyphase Filter for LO Quadrature Generation* / Mikko Kaltiokallio and Jussi Ryyänen // IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. — 2011.
- Notten M. *A 5th Order 14 mWatt Active Polyphase Filter for Analog and Digital TV on Mobile Applications* / Marc Notten, Hans Brekelmans Philips Research // 2006 Proceedings of the 32nd European Solid-State Circuits Conference. — 2006, pp. 211–214.
- Chung-Yun Chou. *The Design of Wideband and Low-Power CMOS Active Polyphase Filter and Its Application in RF Double-Quadrature Receivers* / Chung-Yun Chou, Chung-Yu Wu // IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: regular papers, Vol. 52, №5. — 2005, pp. 825–833.
- Vertegel V.V. *X-band Active Vector Phase Shifter MMIC Design* / V.V. Vertegel, Y.B. Gimpilevich, D.V. Lyalyuk, I.F. Filippov // Nanoindustry, International Forum “Microelectronics-2016” 2nd Scientific Conference “Integrated Circuits and Microelectronic Modules”: Special issue. — Vol. 74. — May 2007, pp. 458–463.
- Sang Young Kim. *An Improved Wideband All-Pass I/Q Network for Millimeter-Wave Phase Shifters* / Sang Young Kim, Dong-Woo Kang, Kwang-Jin Koh, Gabriel M. Rebez // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — Vol. 60, №11. — November 2012. — p. 3431–3439.
- Iverson E. *A 0.05–26GHz Direct Conversion I/Q Modulator MMIC* / Eric W. Iverson, Milton Feng // 2014 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). — 2014, pp. 1–4.
- Poobuapheun N. *A 1.5V 0.7–2.5GHz CMOS Quadrature Demodulator for Multi-band Direct-Conversion Receivers* / Nuntachai Poobuapheun, Wei-Hung Chen, Zdravko Boos, and Ali M. Niknejad // 2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings. — 2005, pp. 1669–1677.
- Suematsu N. *0.8–5.2GHz Band SiGe-MMIC Q-MOD for Multi-Band Multi-Mode Direct Conversion Transmitters* / Yadi Guo, Jun Fu, Baoyong Chi, Yudong Wang, Jie Cui // Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings. — 2005. — p. 4.