

**Метод проектирования широкополосного формирователя
квадратурных сигналов**

Ю.А. Чаплыгин¹, В.В. Лосев¹, А.Д. Калёнов^{1,2}

¹*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва,
Россия*

²*АО «НИИМА «Прогресс», г. Москва, Россия*

kalyonov.alex@yandex.ru

При разработке широкополосного формирователя квадратурных сигналов с использованием SiGe-БиКМОП-технологии наиболее трудно решаются задачи линейности и широкополосного согласования. В широкой полосе частот квадратурный сигнал формируется с помощью полифазного фильтра или цифрового D-триггера. Применение только одного метода формирования является невозможным из-за ограничивающих особенностей электронно-компонентной базы SiGe-БиКМОП-технологии. В работе предложена структура, которая позволяет методом разделения рабочей полосы частот разработать широкополосный формирователь квадратурных сигналов с диапазоном рабочей частоты от 10 МГц до 6 ГГц. На частотах от 1 до 6 ГГц квадратурный сигнал формируется с применением полифазного фильтра, а на частотах менее 1 ГГц – делителя частоты. Использование метода разделения рабочей полосы частот позволило получить следующие характеристики формирователя квадратурных сигналов: разность амплитуд квадратурных сигналов менее 0,3 дБ; коэффициент стоячей волны менее 1,6 во всем диапазоне частот; коэффициент передачи не менее –2 дБ при мощности гетеродина 0 дБм; на частоте 6 ГГц P_{1дБ} не менее 3 дБм. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с данными моделирования.

Ключевые слова: СВЧ; полифазный фильтр; делитель частоты; квадратурный сигнал

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-07-007-28/20).

Для цитирования: Чаплыгин Ю.А., Лосев В.В., Калёнов А.Д. Метод проектирования широкополосного формирователя квадратурных сигналов // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 6. С. 558–562. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-6-558-562

Design Method for a Broadband Quadrature Signal Generator

Yu. A. Chaplygin¹, V.V. Losev¹, A.D. Kalyonov^{1,2}

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

²JSC Progress Microelectronics Research Institute, Moscow, Russia

kalyonov.alex@yandex.ru

Abstract: There are certain difficulties in the development of a broadband generator of quadrature signals (QSG) on a SiGe BiCMOS technology. The problem of linearity and broadband matching is the most difficult to solve. When designing QSG in a wide frequency band, there is a problem of forming a quadrature signal using traditional solutions using a polyphase filter or a digital D-trigger. The use of only one method for forming a quadrature signal is impossible due to the limiting features of the electronic component base of SiGe BiCMS technology. To solve this problem, we propose a structure that allows us to develop a broadband quadrature signal generator with an operating frequency range from 10 MHz to 6 GHz, using the method of dividing the operating frequency band. At frequencies from 1 to 6 GHz, the quadrature signal is generated using a polyphase filter, and at frequencies less than 1 GHz using a frequency divider. Using this method, the following characteristics of the FCS have been achieved: the difference in the amplitudes of quadrature signals is less than 0.3 dB; the VSWR is less than 1.6 over the entire frequency range; the transmission coefficient is not less than -2 dB at a 0 dBm heterodyne power; at a frequency of 6 GHz P1dB of at least 3 dBm. The experimental results are in good agreement with the simulation data.

Keywords: microwave; polyphase filter; frequency divider; quadrature signal

Funding: this work has been supported by the RFBR grant (project no. 20-07-007-28 / 20).

For citation: Chaplygin Yu.A., Losev V.V., Kalyonov A.D. Design method for a broadband quadrature signal generator. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 6, pp. 558–562. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-6-558-562

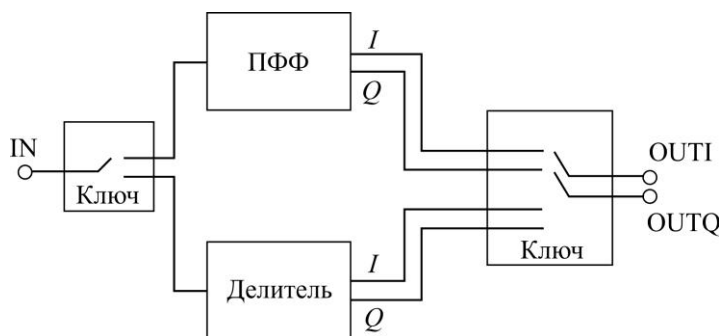
Формирователи квадратурных сигналов (ФКС) широко применяются в приемопередающих трактах военной аппаратуры связи, спутниковой навигации, устройствах радиолокации, аппаратуре радиоэлектронного противодействия, а также в бытовых устройствах сотовой и беспроводной связи. Интегральные ФКС характеризуются относительной простотой реализации, малой площадью топологии, сравнительно высокой устойчивостью характеристик к технологическому разбросу. В процессе разработки широкополосного ФКС выявлены и исследованы различные способы формирования квадратурных сигналов. Для широкополосного использования наиболее предпочтительно применение полифазного фильтра на высоких частотах и D-триггеров на низких частотах.

Традиционно для генерации квадратурных сигналов используется пара $RC-CR$ и ее полифазные расширения. Полифазные фильтры (ПФФ) представляют собой разновидности RC -фильтров, которые при подаче на их вход сигнала синусоидальной формы формируют на выходе пару синусоидальных сигналов, имеющих разность фаз приблизительно 90° (в радиотехнике это так называемый фазовый метод формирования однополосного сигнала). В $RC-CR$ -цепочке разность фаз между выходами $V_{I_{out}}$ и $V_{Q_{out}}$ равна 90° для всех частот. Однако ПФФ характеризуются большими вносимыми потерями (около 3 дБ на секцию). Для компенсации этих потерь требуется использовать буферные усилители. Количество каскадов фильтра выбирается от 2 до 5, исходя из требуемых величин разбаланса амплитуд и фаз, диапазона частот и допустимого ослабления фильтра. Рабочая частота для каждого каскада полифазного фильтра рассчитывается по формуле [1]:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Однако реализация RC – CR -фильтра на низких частотах нецелесообразна, так как для уменьшения рабочей частоты необходимо увеличивать номиналы резисторов и конденсаторов. Как следствие, резко возрастают размеры разрабатываемого блока и уменьшается линейность схемы [2]. Для решения этой проблемы разработан метод, согласно которому на низких частотах (до 1 ГГц) предлагается использовать цифровые D-триггеры для формирования квадратурного сигнала. Ограничением применения триггерных схем на высоких частотах является необходимость использования входного сигнала с удвоенной рабочей частотой. На формирование квадратурного сигнала с помощью триггеров на частотах выше 1 ГГц большое влияние оказывают паразитные составляющие. Несимметричность топологии приводит к изменению скважности сигнала и увеличению амплитудной и фазовой ошибок [3]. Применение только одного метода формирования квадратурного сигнала невозможно из-за ограничивающих особенностей электронно-компонентной базы SiGe-БиКМОП-технологии.

На рисунке представлена реализация метода в виде общей структурной схемы ФКС, состоящей из входного ключа, ПФФ, делителя частоты и выходного ключа. В зависимости от входной частоты квадратурный сигнал формируется с помощью ПФФ (на частотах от 1 до 6 ГГц) или делителя частоты (на частотах менее 1 ГГц).



Общая структурная схема широкополосного формирователя
квадратурных сигналов

General block diagram of a broadband quadrature signal generator

Наиболее приемлемый способ формирования широкополосных квадратурных сигналов основан на использовании цепи с упорядоченными фазовыми сдвигами, которая представляет собой регулярную структуру, состоящую из резисторов с равными номиналами, а номиналы конденсаторов уменьшаются в геометрической прогрессии в зависимости от полосы рабочей частоты [4]. Для получения наилучших характеристик используются четыре каскада RC – CR -цепочек. ПФФ имеет следующие преимущества перед другими способами генерации квадратуры: простота исполнения (каскад ПФФ содержит четыре сопротивления и четыре емкости); широкая полоса рабочих частот при использовании трех-пяти каскадов в ПФФ; незначительная зависимость от разброса параметров при изготовлении [5]. Для получения требуемых параметров на частотах от 1 до 6 ГГц подключение должно обеспечивать постоянную амплитуду сигнала.

Для генерации квадратурного сигнала на низких частотах (от 10 до 1000 МГц) применяется каскад D-триггеров. Выходной триггер формирует I и Q составляющие. Разрабатываемый делитель частоты состоит из нескольких цифровых DFF-триггеров и одного триггера, формирующего квадратурный сигнал. С помощью управляемых мультиплексоров существует возможность делить частоту входного сигнала на 2, 4, 8 и 16. Преимущество триггерных формирователей квадратурных сигналов – возможность достичь высокого уровня согласования в широком диапазоне частот [6, 7]. Особенность триггерных схем, ограничивающая возможность их применения, заключается в необходимости использования входного сигнала с удвоен-

ной рабочей частотой. Триггерные схемы чувствительны к качеству топологии. Длины проводников, по которым протекает сигнал гетеродина, должны быть строго равны [8]. Невыполнение данного условия приводит к изменению скважности и, соответственно, появлению фазовой ошибки [9].

В таблице представлены значения требуемых параметров для различных ФКС. Данные для RC–CR-фильтра, полифазного фильтра и D-триггера взяты из открытых литературных источников. Эксперимент проводился при нормальных условиях после корпусирования кристаллов. В таблицу занесены средние значения параметров после измерения десяти образцов.

Значения требуемых параметров для различных ФКС
Values of required parameters for various of quadrature signals

ФКС	Диапазон частоты, ГГц	Разность амплитуд, дБ	Разность фаз, град	P1дБ, дБм	KCB	K _п , дБ	I _п , мА
RC–CR-фильтр	2–3	<0,1	<2	5	<1,5	–12	40
ПФФ	1–6	<0,1	<0,8	5	<1,5	–10	60
D-триггеры	0,01–1	<0,3	<0,1	8	<1,6	12	60
Моделирование (предложенный метод)	0,005–7,5	<0,1	<0,5	6	<1,5	0	60
Эксперимент	0,01–6,1	<0,3	<0,8	3	<1,6	–2	70

Как видно из таблицы, экспериментальные значения разности амплитуд, фаз, коэффициента стоячей волны (КСВ) и коэффициента передачи K_п сравнимы с данными из актуальных литературных источников и хорошо согласуются с результатами моделирования. Таким образом, можно говорить об адекватности предлагаемого метода разделения рабочей полосы частот.

При использовании данного метода достигнуты следующие характеристики ФКС: разность амплитуд квадратурных сигналов менее 0,3 дБ; КСВ менее 1,6 во всем диапазоне частот; коэффициент передачи не менее –2 дБ при мощности гетеродина 0 дБм; на частоте 6 ГГц P1dB не менее 3 дБм. При этом общий ток потребления I_п формирователя квадратурных сигналов менее 70 мА; площадь разработанного блока составляет 1,12×1,01 мм.

Результаты исследований показывают высокую эффективность разработанного метода проектирования формирователя квадратурных сигналов.

Литература

1. *Kaukokuori J.* Analysis and design of passive polyphase filters // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 2008. Vol. 55. No. 10. P. 3023–3037.
2. *Park J.S., Wang H.A.* Transformer-based poly-phase network for ultra-broadband quadrature signal generation // School of Electrical and Computer Engineering (Georgia Tech, Atlanta). 2015. Vol. 63. No. 12. P. 4444–4457.
3. *Huizhen J., Yiyang S., Jie Z., Hun L.* A 20–32-GHz quadrature digital transmitter using synthesized impedance variation compensation // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2020. Vol. 55. No.5. P. 1297–1309.
4. 9-GHz wideband CMOS RX and TX front-ends for universal radio applications / *S. Hampel, O.Schmitz, M.Tiebout et al.* // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2012. Vol. 60. No. 2. P. 1105–1116.
5. *Chung-Yun C.* The design of wideband and low-power CMOS active polyphase filter and its application in RF double-quadrature receivers // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 2005. Vol. 52. No.5. P. 825–833.
6. *Frounchi M.* A low-loss broadband quadrature signal generation network for high image rejection at millimeter-wave frequencies // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2018. Vol. 66. No. 12. P. 5336–5346.
7. Wide locking-range frequency multiplier by 1.5 employing quadrature injection-locked frequency tripler with embedded notch filtering / *S. Saebyeok et al.* // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019. Vol. 67. No.12. P. 4791–4802.
8. *Kalcher M., Gruber D.* 1-3-GHz self-aligned open-loop local quadrature phase generator with phase error below 0.4° // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2020. Vol. 68. No.8. P. 3510–3518.
9. *Yatao P., Li-jun Z., Jun F., Yudong W.* Analysis and design of a broadband SiGe HBT image-reject mixer integrating quadrature signal generator // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2016. Vol. 64. No. 3. P. 688–698.

Поступило в редакцию 22.08.2020 г.; после доработки 22.08.2020 г.; принято к публикации 22.09.2020 г.

Чаплыгин Юрий Александрович – академик РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой интегральной электроники и микросистем, президент Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), president@miet.ru

Лосев Владимир Вячеславович – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dsd@miee.ru

Калёнов Александр Дмитриевич – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), дизайнер СБИС Отделения микроэлектроники СВЧ АО «НИИМА «Прогресс» (Россия, 125183, г. Москва, пр. Черепановых, 54), kalyonov.alex@yandex.ru

References

1. Kaukokuori J. Analysis and design of passive polyphase filters. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2008, vol. 55, no. 10, pp. 3023–3037.
2. Park J.S., Wang H. A. Transformer-based poly-phase network for ultra-broadband quadrature signal generation. *School of Electrical and Computer Engineering*. Georgia Tech, Atlanta, 2015, vol. 63, no. 12, pp. 4444–4457.
3. Huizhen J., Yiyang S., Jie Z., Hun L. A 20–32-GHz quadrature digital transmitter using synthesized impedance variation compensation. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2020, vol. 55, no. 5, pp. 1297–1309.
4. Hampel S., Schmitz O., Tiebout M. et al. 9-GHz wideband CMOS RX and TX front-ends for universal radio applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, vol. 60, no. 2, pp. 1105–1116.
5. Chung-Yun C. The design of wideband and low-power CMOS active polyphase filter and its application in RF double-quadrature receivers. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2005, vol. 52, no. 5, pp. 825–833.
6. Frounchi M. A low-loss broadband quadrature signal generation network for high image rejection at millimeter-wave frequencies. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, vol. 66, no. 12, pp. 5336–5346.
7. Saebyeok S. et al. Wide locking-range frequency multiplier by 1.5 employing quadrature injection-locked frequency tripler with embedded notch filtering. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, vol. 67, no. 12, pp. 4791–4802.
8. Kalcher M., Gruber D. 1-3-GHz self-aligned open-loop local quadrature phase generator with phase error below 0.4°. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, vol. 68, no. 8, pp. 3510–3518.
9. Yatao P., Li-jun Z., Jun F., Yudong W. Analysis and design of a broadband SiGe HBT image-reject mixer integrating quadrature signal generator. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, vol. 64, no. 3, pp. 688–698.

Received 22.08.2020; Revised 22.08.2020; Accepted 22.09.2020.

Information about the authors:

Yuri A. Chaplygin – Correspondent Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Integrated Electronics and Microsystems Department, President, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), president@miet.ru

Vladimir V. Losev – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dsd@miee.ru

Alexander D. Kalyonov – PhD student of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), VLSI Designer of the Microwave Microelectronics Department, JSC NIIMA Progress (Russia, 125183, Moscow, Proyezd Cherepanovkyh, 54), kalyonov.alex@yandex.ru