

Разработка однокристалльного передающего модуля со встроенным синтезатором частот

А. Калёнов¹, Л. Недашковский², М. Дроздецкий³,
В. Лосев, д. т. н.⁴, Ю. Чаплыгин, академик РАН⁵

УДК 621.3.049.774 | ВАК 2.2.2

Одним из ключевых трендов развития микроэлектроники сегодня является разработка систем на кристалле малой площади с низким энергопотреблением, выполняющих большое количество задач. Однако среди множества публикаций, связанных с созданием интегральных схем модуляторов и синтезаторов частот СВЧ-диапазона, практически отсутствуют работы в области монолитных ИС, объединяющих на одном кристалле широкополосный квадратурный модулятор с высокой мощностью выходного сигнала и синтезатор частот с низким фазовым шумом в широком диапазоне частот. В статье представлены результаты разработки однокристалльного широкополосного передающего модуля со встроенным синтезатором частот для обработки сигналов высокой мощности.

ВВЕДЕНИЕ

При реализации модулятора и синтезатора частот на разных кристаллах увеличиваются размеры и вес изделия, а также повышается стоимость, что может иметь критичное значение при серийном производстве. Однако в однокристалльной системе повышаются шумы, а также увеличивается влияние паразитных составляющих сигнала, что накладывает определенные сложности при проектировании. Чтобы обеспечить высокую мощность в широком диапазоне рабочих частот СВЧ-сигнала нужно применять уникальные структурные решения.

В данной работе была использована дифференциальная структура СВЧ-тракта, которая позволяет понизить влияние паразитных составляющих. Предложенная архитектура модуля дает возможность управлять полосой несущей частоты в соответствии с выходной частотой генератора сигнала. Выбор электронной компонентной базы при проектировании модуля был основан на возможности достижения необходимых показателей по радиационной

стойкости. Широкого диапазона рабочих частот передающего модуля, совмещения на одном кристалле аналоговых и цифровых вычислительных блоков, а также высокий уровень выхода годных удалось достичь благодаря использованию кремний-германиевой технологии, которая получила широкое развитие при создании изделий СВЧ-диапазона.

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ

При проектировании модуля использовались специально разработанные элементы цифровой библиотеки, особенностью которых являются кольцевые затворы, которые повышают радиационную стойкость и уменьшают токи утечки. В составе цифровой библиотеки следующие ячейки с различной нагрузочной способностью: инверторы, 2И-НЕ, 3И-НЕ, 4И-НЕ, 2ИЛИ-НЕ, 3ИЛИ-НЕ, 4ИЛИ-НЕ, ХОР, ХНОР, ТИЕ, ДСАР, филлеры, буферы, триггеры с установкой и сбросом начальных значений.

В состав разработанного модуля входят следующие блоки: генератор, управляемый напряжением (ГУН); делитель частоты генератора; токовый ключ (ТК); частотно-фазовый детектор (ЧФД); делитель частоты опорного сигнала; буфер опорного сигнала; выходной буфер сигнала; генератор квадратурного сигнала с усилителями-ограничителями; смесители; входные каскады; выходные каскады и цифровой блок управления (рис. 1).

Архитектура синтезатора представлена на рис. 2. Генерация сетки частот осуществляется с помощью ГУН

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ», аспирант кафедры ИЭМС.

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ», аспирант кафедры ИЭМС.

³ НИИМА «Прогресс», ведущий инженер.

⁴ Национальный исследовательский университет «МИЭТ», доцент, профессор кафедры ИЭМС.

⁵ Национальный исследовательский университет «МИЭТ», академик РАН, президент НИУ МИЭТ.

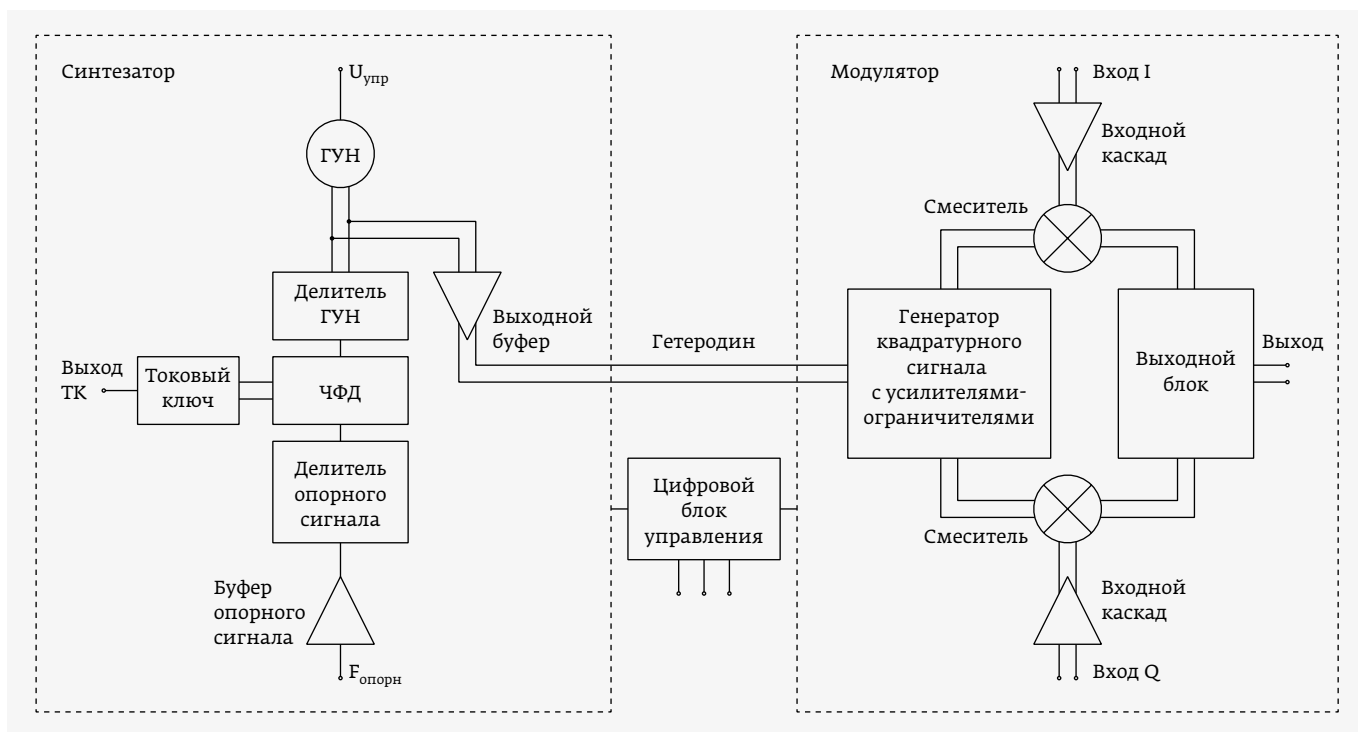


Рис. 1. Блок-схема квадратурного модулятора со встроенным синтезатором частот

с низким фазовым шумом на высокой частоте и с достаточно широким диапазоном настройки. Использование дифференциальной схемы позволяет уменьшить фазовый шум, а также устранить четные гармоники в выходном сигнале. На рис. 3 представлены результаты

моделирования фазового шума разработанного генератора.

Выходные частоты формируются путем деления частот ГУН. Частотный диапазон разделен на две части. Один ГУН формирует выходную частоту в диапазоне от 3 до 4,5 ГГц,

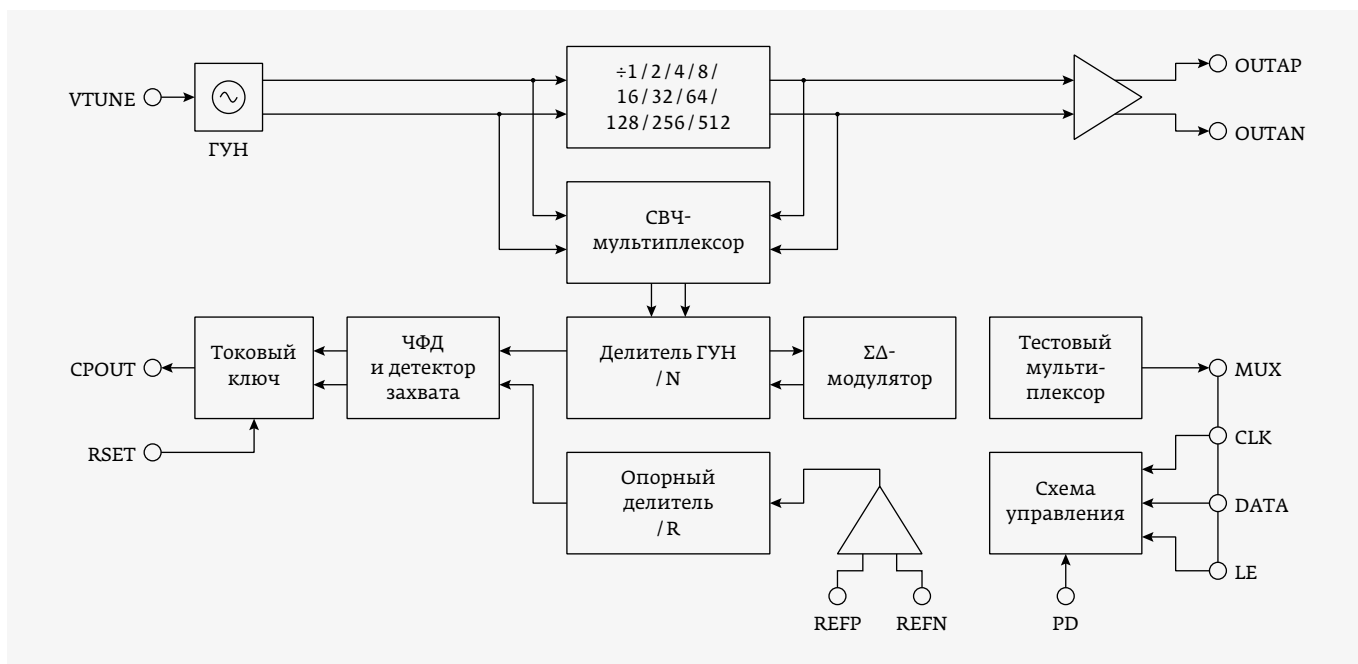


Рис. 2. Блок-схема синтезатора частот

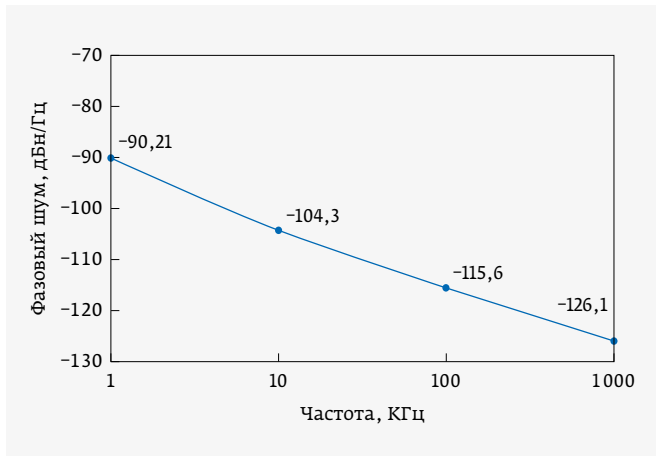


Рис. 3. Фазовый шум генератора, управляемого напряжением

другой – от 4 до 5 ГГц. Для увеличения количества возможных частот каждый генератор разделен на 64 поддиапазона. Переключение поддиапазонов осуществляется с помощью цифрового блока. Поддиапазоны также имеют достаточное перекрытие по частотам. Вариация выходной частоты генератора достигается путем регулирования смещения напряжений на варакторах, которые разработаны на основе структуры МОП-транзистора. В связи с этим емкость варакторов регулируется напряжением с помощью цифрового блока управления [1]. На рис. 4 показана выходная мощность двух генераторов. Диапазон выбирается с помощью мультиплексора, управляемого цифровым кодом.

Выходной сигнал после делителя сравнивается с разделенным опорным сигналом на частотно-фазовом детекторе (ЧФД). ЧФД управляет токовым ключом, выходной сигнал которого поступает на внешний фильтр нижних частот (ФНЧ). Схема тока накачки содержит восемь переключаемых токовых ключей. Ток может регулироваться цифровым способом.

В процессе разработки широкополосного формирователя квадратурного сигнала (ФКС) исследованы различные способы формирования квадратурных сигналов. Для широкополосных систем наиболее предпочтительным является использование полифазного фильтра (ПФФ) на высоких частотах и D-триггеров на низких. Применение только одного метода формирования квадратурного сигнала невозможно из-за ограничивающих особенностей электронной компонентной базы SiGe БИКМОП-технологии [2].

На рис. 5 представлена реализация метода в виде общей структурной схемы формирователя квадратурных сигналов.

Полифазный фильтр (ПФФ) – наиболее предпочтительный способ формирования широкополосных квадратурных сигналов – основан на использовании цепи

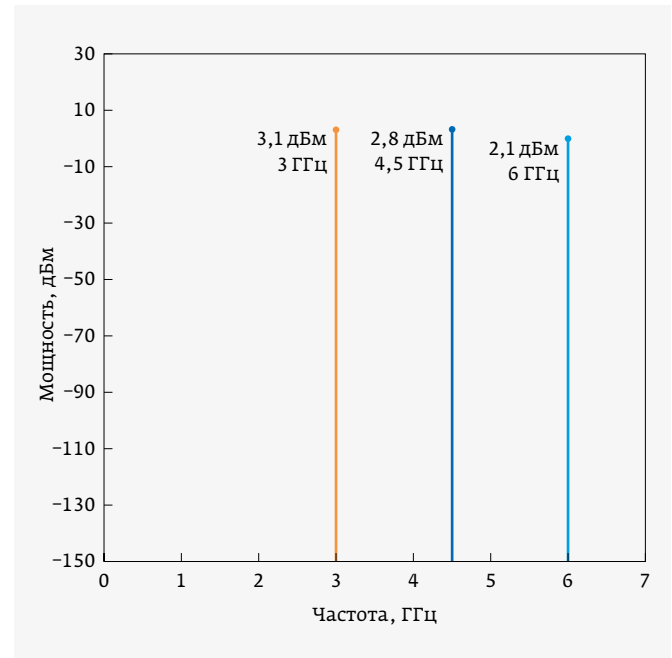


Рис. 4. Выходная мощность ГУН

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 [3, 5]. На рис. 6 представлена общая электрическая схема полифазного фильтра.

Для получения наилучших характеристик используются четыре каскада RC-CR-цепочек. ПФФ имеет ряд преимуществ над другими способами формирования квадратуры: 1 – простота исполнения (каскад ПФФ содержит четыре сопротивления и четыре емкости); 2 – широкая полоса рабочих частот (используя три-пять каскадов в ПФФ); 3 – незначительная зависимость от разброса параметров при изготовлении [4]. Для получения требуемых параметров на частотах от 1 до 6 ГГц используется подключение, которое обеспечивает постоянную амплитуду

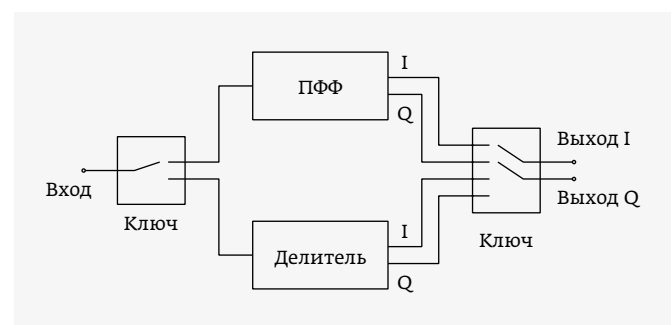


Рис. 5. Структурная схема широкополосного формирователя квадратурных сигналов

сигнала. На рис. 7 представлены результаты моделирования амплитудно-частотных и фаза-частотных характеристик разработанного ПФФ при подключении, обеспечивающего постоянную амплитуду.

Из графиков рис. 7 видно, что на частотах от 1 до 6 ГГц изменяется фаза сигнала, а амплитуда меняется незначительно.

Реализация RC-CR-фильтра на низких частотах является нецелесообразной. Это связано с тем, что для уменьшения рабочей частоты необходимо увеличивать номиналы резисторов и конденсаторов. Как следствие, резко возрастают размеры разрабатываемого блока и уменьшается линейность схемы [5].

Для решения этой проблемы разработан метод, согласно которому на низких частотах (до 1 ГГц) предложено 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 [4].

Для формирования квадратурного сигнала на более низких частотах (от 10 до 1000 МГц) применяется каскад D-триггеров. На рис. 8 представлена структурная схема

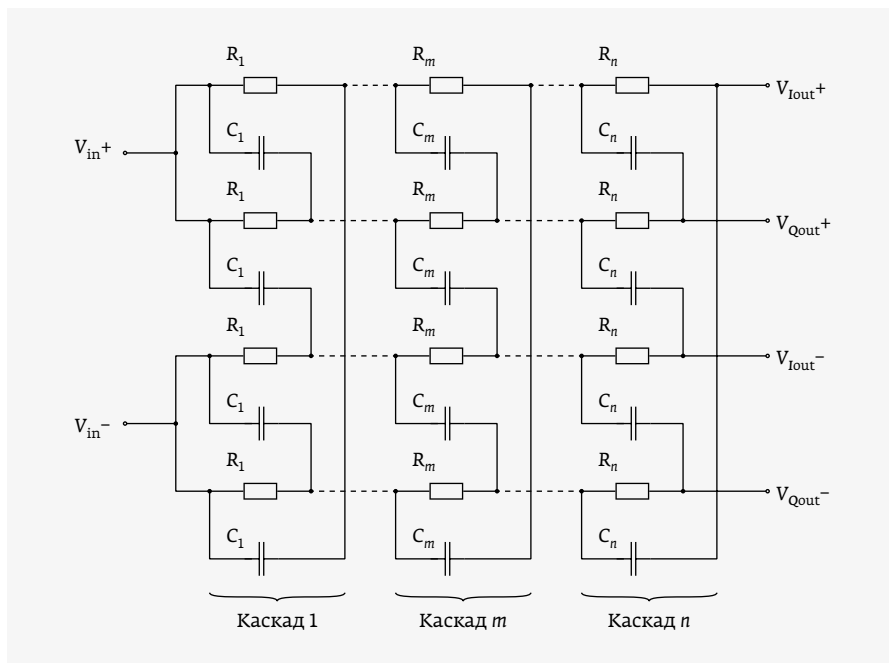


Рис. 6. Общая электрическая схема полифазного фильтра

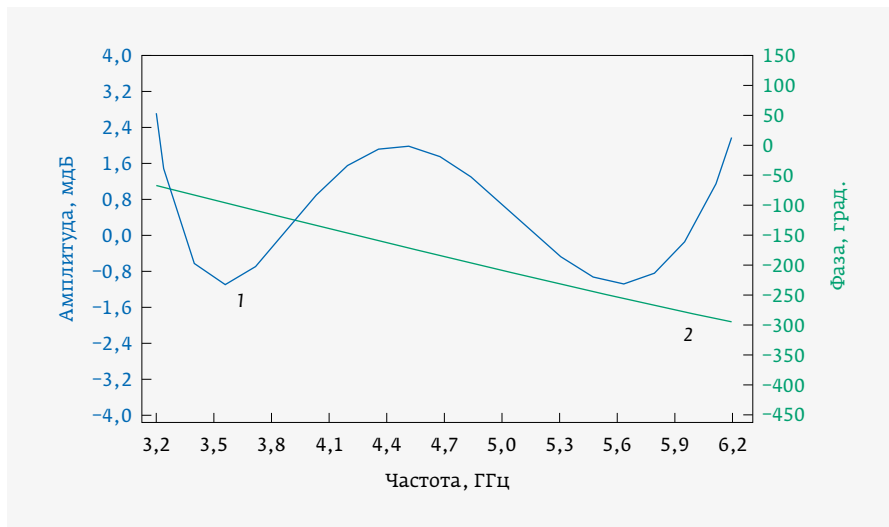


Рис. 7. Амплитудно-частотные (1) и фаза-частотные (2) характеристики полифазного фильтра

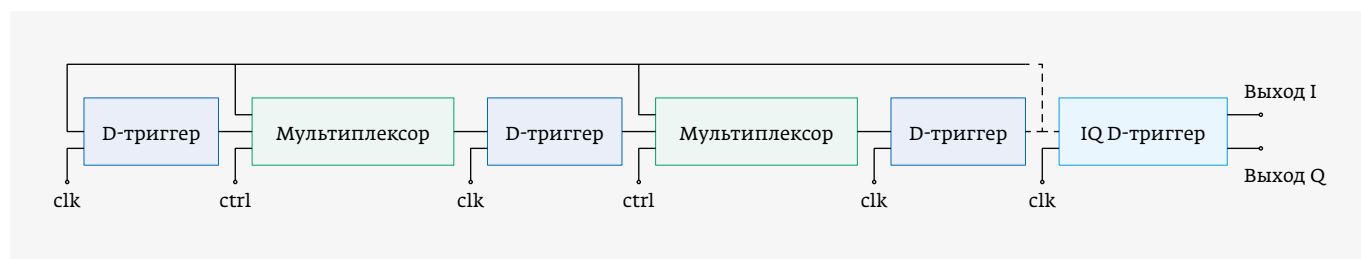


Рис. 8. Структурная схема делителя частоты

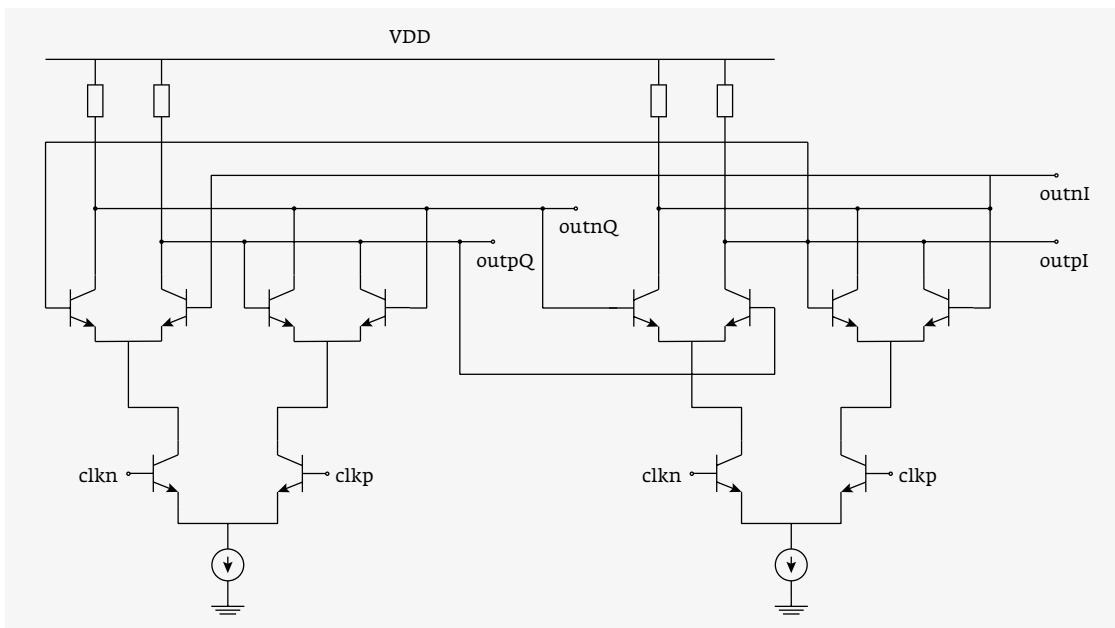


Рис. 9.
Электрическая
схема дели-
теля частоты
с выходными I-
и Q-сигналами

разработанного делителя частоты. Выходной триггер формирует I- и Q-составляющие (рис. 9).

С помощью управляемых мультиплексоров существует возможность делить частоту входного сигнала на 2, 4, 8 и 16. Преимуществом триггерных формирователей квадратурных сигналов является возможность достичь высокого уровня согласования в широком диапазоне частот. Особенностью использования триггерных схем, ограничивающих возможность их применения, является необходимость использования входного сигнала с удвоенной рабочей частотой.

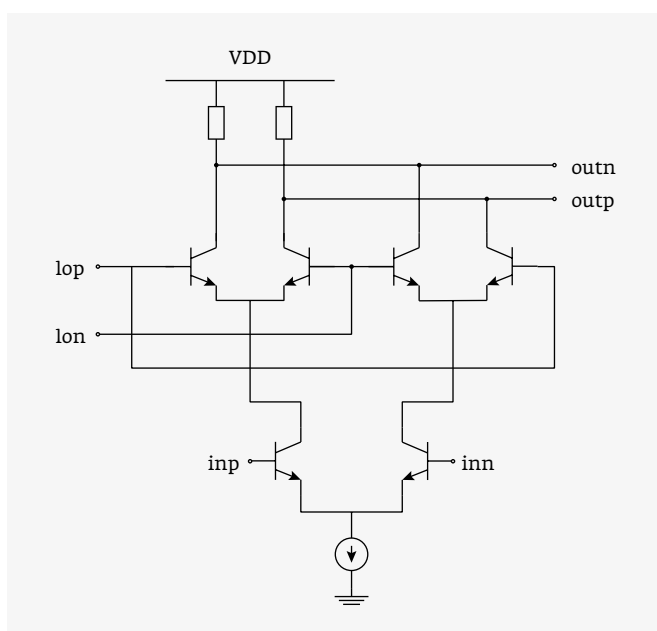


Рис. 10. Электрическая схема смесителя частот

Триггерные схемы чувствительны к качеству топологии. Длины проводников, по которым передается сигнал гетеродина, должны быть строго равны [5]. Невыполнение данного условия приводит к изменению скважности и, соответственно, появлению фазовой ошибки.

С использованием данного метода достигнуты следующие характеристики формирователя: разность амплитуд квадратурных сигналов менее 0,3 дБ; коэффициент стоячей волны (КСВ) менее 1,6 во всем диапазоне частот; коэффициент передачи не менее -2 дБ при мощности гетеродина 0 дБм; на частоте 5 ГГц P1dB не менее 3 дБм. Результаты исследований показывают высокую эффективность разработанного метода проектирования формирователя квадратурных сигналов.

Принцип работы квадратурного модулятора состоит в том, что в двух аналоговых смесителях происходит наложение модулирующих сигналов основной полосы частот на несущую (IQ-сигналы формирователя квадратурного сигнала) [6]. Схема смесителя частот представлена на рис. 10.

Из-за неидентичности сигналов I и Q формирователя квадратурных сигналов, а также технологического разброса элементов I- и Q-смесителей в выходном спектре модуляторов, кроме составляющей полезного сигнала, будут несущая, паразитная боковая полоса и продукты интермодуляционных искажений (вторая, третья гармоники). Также выходные квадратурные сигналы модулятора будут иметь фазовые и амплитудные ошибки [7].

Изменения разбалансировки фазы (квадратуры) и амплитуды тракта формирователя квадратурного сигнала значительно влияют на подавление паразитной боковой в спектре выходного сигнала в модуляторах при однополосной модуляции. Изменение токов в смесителях (или

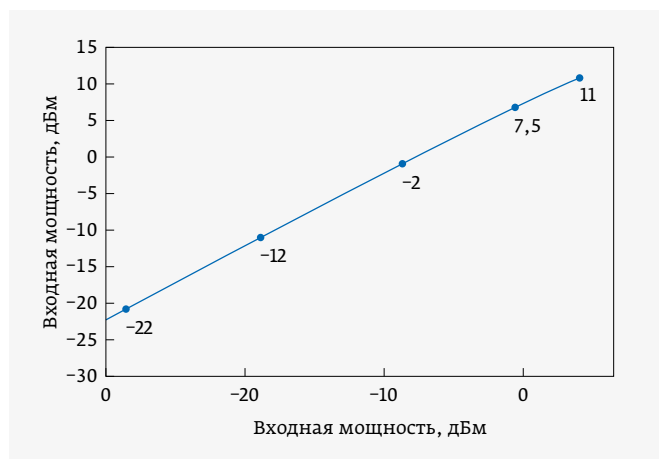


Рис. 11. Выходная линейность модулятора

смещений на базах токозадающих транзисторов) может компенсировать технологический разброс и менять подавление несущей в спектре выходного сигнала в модуляторах при однополосной модуляции, а также изменять линейность выходного сигнала. Регулировка токов в смесителях осуществляется с помощью цифрового кода. На рис. 11 представлены результаты моделирования выходной линейности квадратурного модулятора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная микросхема квадратурного модулятора со встроенным синтезатором частот организована следующим образом: в левой части кристалла располагается блок синтезатора с ГУН, справа – формирователь квадратурного сигнала с модулятором, блок цифрового управления находится снизу (рис. 12). Компонировка модулятора в основном определялась плотным расположением компонентов в части синтезатора, размер кристалла составил 3×3 мм.

Авторы считают, что при разработке многоцелевого широкополосного квадратурного модулятора со встроенным синтезатором частот новыми являются использованные архитектурные, схемотехнические и конструктивно-топологические решения. Проектирование топологии передающего модуля отличается высокой трудоемкостью, особыми требованиями к взаимному расположению элементов, минимальными потерями сигналов в СВЧ-диапазоне, необходимостью обеспечения высоких удельных значений рассеиваемой тепловой мощности. Квадратурный модулятор реализован с использованием 180-нм БикМОП SiGe-технологии.

Результаты проектирования показали, что МИС широкополосного модулятора на 50 МГц – 5 ГГц со встроенным синтезатором частот имеет коэффициент передачи не менее 0 дБ, уровень фазовых шумов сигнала гетеродина на отстройке 1 МГц не более минус 126 дБн/Гц,

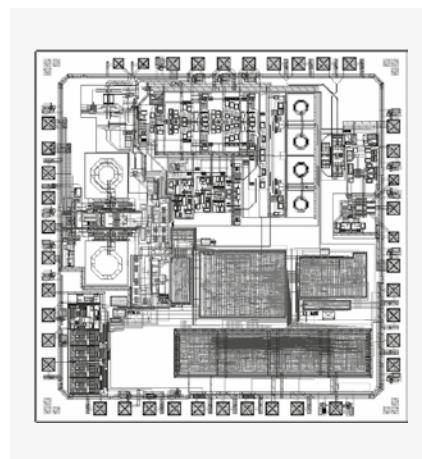


Рис. 12. Топология кристалла квадратурного модулятора со встроенным синтезатором частот

линейность по выходу не менее 10 дБм, ток потребления не превышает 290 мА.

В зависимости от технических требований возможен перенос разработки на другой технологический базис и передача устройства в качестве IP-блока.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Osmany S.A., Herzel F., Scheytt C.** An Integrated Fractional-N Frequency Synthesizer for SoftwareDefined Radio Applications // IEEE 2010 10th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF). 2010. PP. 243–246.
2. **Hampel S. 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.
3. **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.
4. **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
5. **Калёнов А. Д., Недашковский Л. В.** Исследование и разработка пассивного полифазного фильтра для работы в СВЧ-диапазоне // Микроэлектроника и информатика. 2017. Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов. М.: МИЭ, 2017. С. 69.
6. **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.
7. **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.