

На правах рукописи



Румянцев Иван Александрович

**РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ВЕКТОРНЫХ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ УВЧ И
СВЧ ДИАПАЗОНОВ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВОЙ КМОП-ТЕХНОЛОГИИ**

Специальность 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: Коротков Александр Станиславович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Томашевич Сергей Викторович
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Радиосистем и
обработки сигналов» ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский государственный
университет телекоммуникаций им.
проф. М.А. Бонч-Бруевича», г. Санкт-
Петербург

Ковалев Юрий Михайлович
кандидат технических наук,
доцент, заместитель генерального
директора, главный конструктор РТС
НТК «ТИМ», г. Санкт Петербург

Ведущая организация: АО «Светлана-Электронприбор»

Защита состоится «21» декабря 2017 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, IV учебный Корпус, ауд. 305.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте университета www.spbstu.ru.

Автореферат разослан « » ноября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.01
доктор технических наук, профессор

Коротков Александр Станиславович



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современные радиолокационные системы с электронным сканированием луча, как правило, используют активные фазированные антенные решетки, которые состоят из сотен и тысяч приемопередающих модулей (ППМ). В связи с большим количеством ППМ актуальными являются задачи уменьшения массогабаритных характеристик и снижения себестоимости в совокупности с совершенствованием основных параметров составных частей ППМ. Ключевыми элементами ППМ, с помощью которых формируется амплитудно-фазовое распределение антенной решетки, являются аттенюатор и фазовращатель.

На сегодняшний день широкое распространение получили коммутируемые фазовращатели, которые представляют последовательное включение нескольких секций на основе ФНЧ и ФВЧ звеньев с различными фазовыми сдвигами. Требуемый фазовый сдвиг обеспечивается включением определенной комбинации звеньев. Реализация коммутируемых фазовращателей осуществляется, как правило, на основе арсенид галлиевой (GaAs) технологии. Среди отечественных предприятий разработкой и выпуском интегральных схем коммутируемых фазовращателей занимаются АО «НПП «Исток» им. Шокина», АО «НПФ «Микран» и др. Основными недостатками коммутируемых фазовращателей являются высокие потери, большая площадь кристалла, высокая себестоимость вследствие использования GaAs технологии.

Альтернативным решением являются векторные фазовращатели, разработке которых посвящены работы Ф. Ellinger, И.И. Мухина, Ю.В. Колковского и др. Принцип действия векторных фазовращателей основан на сложении взвешенных ортогональных высокочастотных сигналов. При этом фазовый сдвиг зависит от соотношения весовых коэффициентов. Векторные фазовращатели позволяют обеспечить коэффициент передачи на 5-15 дБ выше, по сравнению с коммутируемыми

фазовращателями. При этом потребляемая мощность ППМ существенно не изменяется за счет исключения предварительных усилителей. Векторные фазовращатели, в отличие от коммутируемых, позволяют проводить калибровку фазовых состояний, что увеличивает выход годных интегральных схем за счет компенсации влияния разброса параметров технологического процесса.

Реализация векторных фазовращателей УВЧ, СВЧ диапазонов осуществляется, как правило, с использованием кремниевой КМОП-технологии или кремний-германиевой (SiGe) БиКМОП-технологии. Использование данных технологий позволяет снизить себестоимость до 10 раз по сравнению с GaAs технологией при серийном выпуске. Разработка фазовращателей и других элементов ППМ на основе SiGe БиКМОП-технологии ведется АО «НИИМА «Прогресс» и АО «НПП «Пульсар». Использование кремниевой КМОП-технологии помимо снижения себестоимости (стоимость прототипирования до 25% ниже по сравнению с SiGe БиКМОП-технологией) позволяет реализовать схему управления непосредственно на кристалле и, следовательно, интегрировать высокочастотную и низкочастотную части. Кроме того, снижение массогабаритных характеристик дополнительно возможно за счет реализации функций аттенюатора при использовании векторного фазовращателя в режиме векторного модулятора.

Целью данной работы является разработка методик снижения ошибок векторных фазовращателей и реализация интегральных схем векторных фазовращателей со сниженными ошибками на основе КМОП-технологии.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

- 1) проведен анализ влияния амплитудно-фазового дисбаланса цепей формирования квадратурных сигналов на ошибки векторного фазовращателя;
- 2) разработаны методики снижения ошибок векторного фазовращателя;

3) разработаны схемы и компоновки кристаллов векторных фазовращателей УВЧ и СВЧ диапазонов и проведено их компьютерное моделирование;

4) разработаны и реализованы алгоритмы автоматизированного измерения характеристик фазовращателей и калибровки фазовых состояний для снижения фазовой и амплитудной ошибок вследствие разброса параметров технологического процесса;

5) изготовлены интегральные схемы векторных фазовращателей, проведены экспериментальные исследования основных характеристик, сравнение с результатами компьютерного моделирования и анализ полученных результатов.

Научная новизна результатов диссертационной работы:

1. Предложена методика снижения амплитудно-фазового дисбаланса полифазного RLC -фильтра за счет снижения нагрузочной емкости при использовании усилителей с регулируемым коэффициентом передачи на основе модифицированной ячейки Гильберта.

2. Проведен анализ и получено аналитическое выражение, описывающее зависимость фазового дисбаланса выходных сигналов полифазного RC -фильтра в небалансном включении от коэффициента подавления синфазной составляющей, что позволяет определить требуемый коэффициент подавления синфазной составляющей схемы.

3. Предложена методика формирования квадратурных сигналов с использованием полифазного RC -фильтра в небалансном включении, что позволяет исключить из схемы входное симметрирующее устройство и связанный с ним амплитудно-фазовый дисбаланс.

4. Разработана новая структура векторного фазовращателя с формированием квадратурных сигналов непосредственно из небалансного входного сигнала без преобразования к балансному виду, что позволяет исключить влияние амплитудно-фазового дисбаланса симметрирующего устройства на характеристики фазовращателя.

Практическая и теоретическая значимость результатов диссертационной работы:

1. Предложенные методики снижения ошибок векторных фазовращателей позволяют разрабатывать векторные фазовращатели с улучшенными точностными характеристиками.

2. Разработанные алгоритм и программное обеспечение калибровки векторных фазовращателей с использованием двухмерного интерполирования зависимостей модуля и фазы коэффициента передачи от управляющих напряжений позволяют существенно (до 40 раз) снизить количество необходимых измерений при калибровке фазовращателя по сравнению с измерением всех амплитудно-фазовых состояний.

3. Получен патент РФ № 2607673 от 10.01.2017 на изобретение «Высокочастотный фазовращатель на МОП-транзисторах». Подана заявка на патент № 2016149106 от 14.12.2016 на изобретение «Высокочастотный векторный фазовращатель».

4. Результаты диссертации использованы при проведении ПНИЭР по соглашению № 14.578.21.0092 от 28.11.2014 «Разработка и экспериментальное исследование интегральной схемы фазовращателя СВЧ диапазона частот с уменьшенной погрешностью установки фазы на основе кремниевой КМОП-технологии для приемо-передающих трактов телекоммуникационных систем» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы».

Методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы анализа и синтеза линейных электрических цепей. Расчеты и моделирование проводились с применением программы Matlab и программного пакета Cadence Virtuoso. Для проведения экспериментальных исследований

разработана программно-аппаратная платформа с использованием среды программирования LabVIEW и векторного анализатора цепей ZVA40.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование усилителей с регулируемым коэффициентом передачи на основе модифицированной ячейки Гильберта, реализующих метод удвоения частоты единичного усиления по току, позволяет снизить фазовый дисбаланс полифазного *RLC*-фильтра до четырех раз.

2. Бестрансформаторная структура векторного фазовращателя с использованием полифазного *RC*-фильтра в небалансном включении позволяет уменьшить амплитудную и фазовую ошибки фазовращателя за счет исключения амплитудно-фазового дисбаланса входного симметрирующего устройства.

3. При формировании квадратурных сигналов с использованием полифазного *RC*-фильтра в небалансном включении для обеспечения фазового дисбаланса не более 1 градуса необходимо обеспечить коэффициент подавления синфазной составляющей не менее 35 дБ за счет усилителей с регулируемым коэффициентом передачи и дополнительных схем подавления на основе дифференциального усилителя.

4. Определение управляющих сигналов векторного фазовращателя на основе измеренных с заданным шагом амплитудно-фазовых состояний с последующим двумерным интерполированием позволяет существенно (до 40 раз) снизить количество необходимых измерений при калибровке фазовращателя по сравнению с измерением всех возможных амплитудно-фазовых состояний.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы и обоснованность научных выводов подтверждается соответствием представленных аналитических расчетов и результатов моделирования на схемотехническом уровне с данными экспериментальных измерений, проведенных на современном оборудовании.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

1. VIII Научно-техническая конференция молодых специалистов по радиоэлектронике, Санкт-Петербург, ОАО «Авангард», 28 апреля 2015.

2. XI International Siberian Conference on Control and Communications, Омск, ОмГТУ, 21-23 мая 2015.

3. Форум с международным участием «XLIV Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербург, СПбПУ, 30 ноября - 5 декабря 2015.

4. NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 2-3 февраля 2016.

5. VI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 30 мая - 2 июня 2016.

6. VII Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем», Зеленоград, МИЭТ, 3-7 октября 2016.

7. IV Национальная ежегодная выставка-форум ВУЗПРОМЭКСПО, Москва, Технополис «Москва», 14-15 декабря 2016.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертационной работы составляет 166 страниц, в том числе 134 страницы основного текста, 90 рисунков, 3 таблицы, список литературы из 90 наименований и 1 приложение.

Вклад автора в разработку проблемы

Основные научные положения, теоретические выводы, практические рекомендации, расчеты, моделирование и экспериментальные результаты в диссертационной работе разработаны и выполнены автором самостоятельно.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе обсуждаются перспективные области применения фазовращателей, технологические процессы, используемые при производстве интегральных схем, основные параметры фазовращателей. Рассмотрены принципы построения фазовращателей наиболее широко применяемые при разработке схем в интегральном исполнении. Проведен обзор научной литературы и коммерческих решений интегральных фазовращателей. Показаны преимущества применения векторных фазовращателей по сравнению с коммутируемыми фазовращателями. В частности, возможность реализации на основе векторных фазовращателей векторных модуляторов, позволяющих изменять как фазу, так и амплитуду выходного сигнала, что является существенным преимуществом по сравнению с многофункциональными интегральными схемами, в состав которых интегрированы аттенюатор и фазовращатель.

Второй раздел посвящен анализу схем построения векторных фазовращателей и составных блоков, оценке влияния амплитудно-фазового дисбаланса схем формирования квадратурных сигналов на характеристики векторного фазовращателя и методикам снижения ошибок векторных фазовращателей. Проведенный анализ схем построения векторных фазовращателей показал, что основными составными блоками являются: симметрирующее устройство, преобразующее входной небалансный сигнал к балансному виду, полифазный фильтр, формирующий квадратурные сигналы, и усилители с регулируемым коэффициентом передачи, определяющие весовые коэффициенты складываемых сигналов. При этом амплитудно-фазовый дисбаланс каждого из перечисленных блоков напрямую влияет на характеристики векторного фазовращателя.

Известным недостатком полифазного RLC -фильтра является чувствительность к нагрузочной емкости. Для уменьшения амплитудно-фазового дисбаланса необходимо уменьшать нагрузочную емкость фильтра. Для этого предлагается снизить входную емкость усилителей с регулируемым коэффициентом передачи, который, как правило, реализуется на основе ячейки Гильберта. Для снижения входной емкости предлагается использовать так называемый метод удвоения частоты единичного усиления по току. Схема, реализующая данный метод, изображена на рис. 1 и представляет два дифференциальных усилителя с общей нагрузкой, где в каждой дифференциальной паре на один из транзисторов подано постоянное напряжение смещения. Тогда зависимость фазового дисбаланса $\arg(A_U)_{err}$ от нагрузочной емкости C_L , нормированной на рабочую емкость фильтра C , и коэффициента снижения входной емкости X на центральной частоте выражается как:

$$\arg(A_U)_{err} = \frac{\pi}{2} - \left(\operatorname{atg} \left(1 - \frac{2 C_L}{X C} \right) + \operatorname{atg} \left(1 + \frac{2 C_L}{X C} \right) \right).$$

Зависимость фазового дисбаланса от нормированной нагрузочной емкости при $X = 2$ изображена на рис. 2.

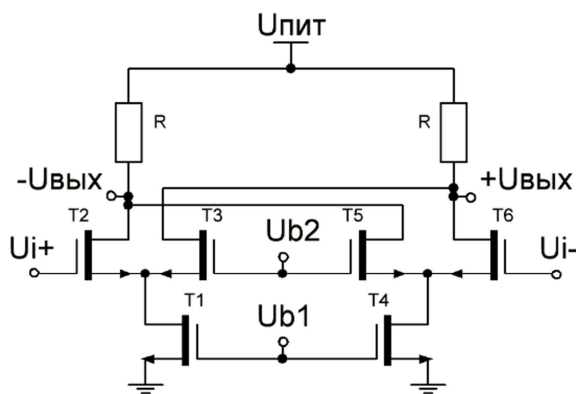


Рис. 1

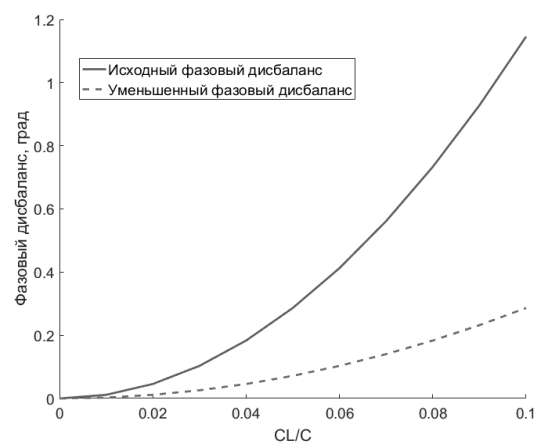


Рис. 2

Другой, предлагаемой в диссертации методикой снижения ошибок, является методика формирования квадратурных сигналов с использованием

полифазного RC -фильтра в небалансном включении. Данная методика позволяет исключить из схемы входное симметрирующее устройство и связанный с ним амплитудно-фазовый дисбаланс. Принципиальная схема RC -фильтра в небалансном включении и соответствующие векторные диаграммы изображены на рис. 3 и 4 соответственно. В работе проведен анализ схемы и получено аналитическое выражение, описывающее зависимость фазового дисбаланса выходных сигналов полифазного RC -фильтра в небалансном включении от коэффициента подавления синфазной составляющей $CMRR$:

$$\arg(A_U)_{err} = \arccos\left(\frac{CMRR(1 + CMRR)(1 + (\omega RC)^2)}{\omega RC \sqrt{(\omega RC)^4 + 4(\omega RC)^2(1 + (\omega RC)^2) + 2CMRR^2(1 + (\omega RC)^2)^2 + 1}}\right) - \frac{\pi}{2}$$

Показано, что для обеспечения фазового дисбаланса не более 1 градуса необходимо обеспечить коэффициент подавления синфазной составляющей не менее 35 дБ.

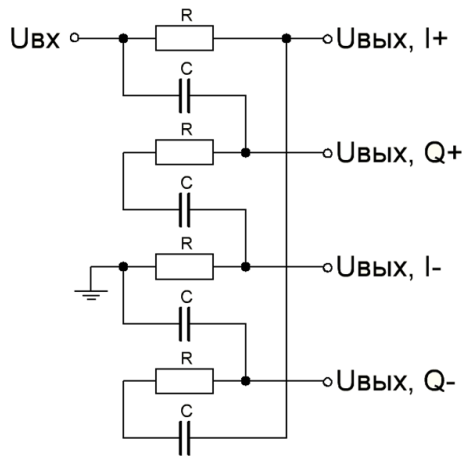


Рис. 3

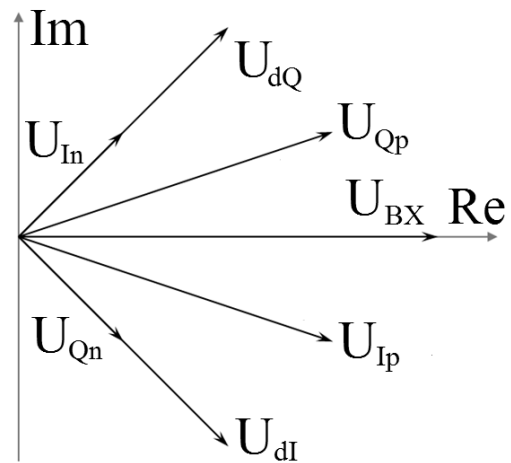


Рис. 4

В связи с разбросом параметров технологического процесса и влиянием паразитных эффектов происходит отклонение характеристик интегральных схем от номинальных значений. Калибровка является эффективным способом снижения влияния разброса параметров технологического процесса и паразитных эффектов на характеристики разрабатываемого устройства. Оптимальным, с точки зрения количества измерений, является вычисление

управляющих сигналов на основе измеренных зависимостей коэффициентов передачи усилителей с регулируемым коэффициентом передачи от управляющих напряжений для каждого усилителя отдельно. Однако, вследствие просачивания квадратурных сигналов, возможно отклонение рассчитанных управляющих сигналов от значений, обеспечивающих минимизацию амплитудной и фазовой ошибок. В диссертации предлагается алгоритм калибровки, который представляет своего рода компромисс между измерением всех амплитудно-фазовых состояний и измерением только зависимостей модуля и фазы коэффициента передачи каждого усилителя отдельно, основными этапами которого являются:

1. Измерение модуля $|S_{21_{i,j}}|$ и фазы $\arg(S_{21_{i,j}})$ коэффициента передачи с заданным шагом k по управляющим напряжениям U_i и U_j .

2. Двухмерное интерполирование измеренных зависимостей.

3. Определение модуля $|S_{21_{i_0,0}}|$ и фазы $\arg(S_{21_{i_0,0}})$ коэффициента передачи в нулевом фазовом состоянии.

4. По заданной амплитудной ошибке $\Delta\alpha_{max}$ усечение интерполированных зависимостей по критерию:

$$\left| |S_{21_{i,j}}| - |S_{21_{i_0,0}}| \right| \leq \Delta\alpha_{max}.$$

5. По заданной фазовой ошибке $\Delta\varphi_{max}$ поиск управляющих напряжений U_i и U_j для каждого фазового состояния φ_k по критерию:

$$\left| \arg(S_{21_{i,j}}) - \arg(S_{21_{i_0,0}}) - \varphi_k \right| \leq \Delta\varphi_{max}.$$

В третьем разделе предложена методика параметрического синтеза векторных фазовращателей, основные положения которой кратко формулируются следующим образом:

1. На основе заданных амплитудной $\Delta\alpha_{max}$ и фазовой $\Delta\varphi_{max}$ ошибок определить требования к амплитудно-фазовому дисбалансу схем формирования квадратурных сигналов.

2. На основе заданного диапазона рабочих частот Δf и данных из п.1 рассчитать схемы формирования квадратурных сигналов.

3. На центральной частоте определить значения коэффициентов передачи G_{i_k} и G_{q_k} усилителей с регулируемым коэффициентом передачи, обеспечивающие необходимые фазовые сдвиги φ_k .

4. Задать коэффициент передачи выходного усилителя $S_{21_{\text{ВУ}}}$, исходя из требуемого коэффициента передачи $S_{21_{\text{мин}}}$ фазовращателя.

5. Провести моделирование фазовращателя с учетом паразитных элементов топологии. Определить амплитудную $\Delta\alpha$ и фазовую $\Delta\varphi$ ошибки фазовращателя. Если ошибки превышают заданные значения $\Delta\alpha_{\text{max}}$ и $\Delta\varphi_{\text{max}}$, то необходимо перейти к п. 3 и скорректировать коэффициенты передачи G_{i_k} и G_{q_k} .

С использованием параметрического синтеза определены оптимальные значения элементов по критерию минимизации амплитудной и фазовой ошибок векторного фазовращателя УВЧ диапазона, высокочастотный тракт которого состоит из (рис. 5) входного и выходного симметрирующих устройств (СУ) на элементах с сосредоточенными параметрами, полифазного RLC -фильтра (ПФ), усилителей с регулируемым коэффициентом передачи (УУ), реализующих метод удвоения частоты единичного усиления по току, и выходного усилителя (ВУ).

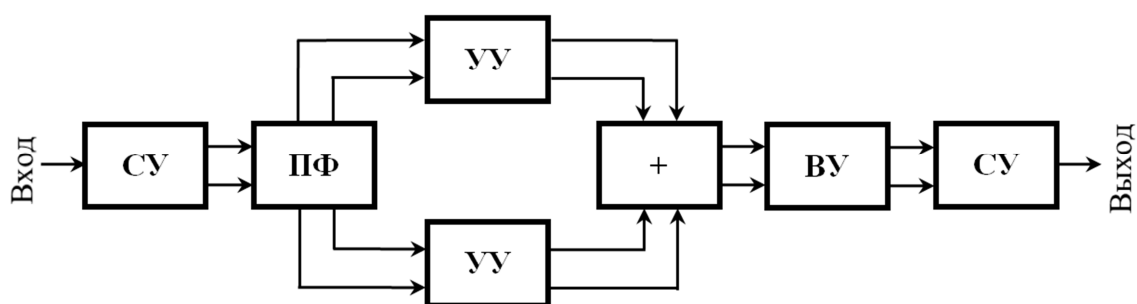


Рис. 5

Предложена новая структурная схема векторного фазовращателя на основе методики формирования квадратурных сигналов полифазным RC -фильтром в небалансном включении. С использованием параметрического синтеза определены оптимальные значения элементов по критерию минимизации амплитудной и фазовой ошибок. Разработанный векторный

фазовращатель состоит из (рис. 6) полифазного RC -фильтра в небалансном включении (ПФ), усилителей с регулируемым коэффициентом передачи (УУ), схемы подавления синфазной составляющей (ПСС), активного симметрирующего устройства (СУ) и выходного усилителя (ВУ).

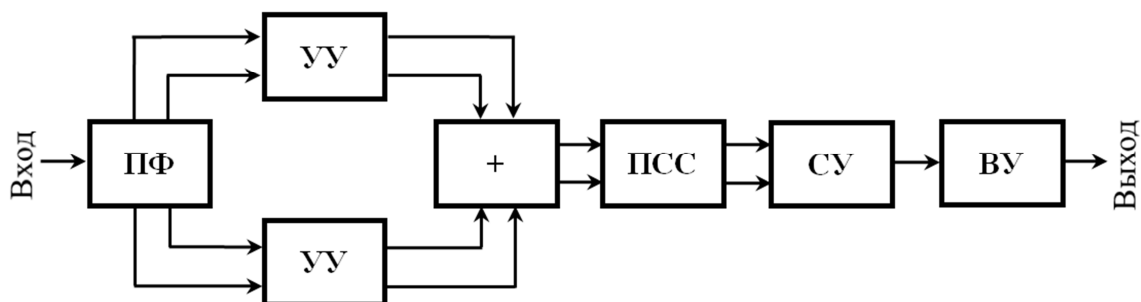


Рис. 6

В четвертом разделе представлены результаты экспериментальных исследований кристаллов интегральных схем разработанных векторных фазовращателей изготовленных по программе Европрактика по 0,18 мкм КМОП-технологии. Измерения проводились с использованием зондовой станции Cascade Microtech EP6RF и векторного анализатора цепей ZVA40. Для изменения фазовых состояний использовались: лабораторный комплекс NI ELVIS II (для фазовращателя УВЧ диапазона) и плата Arduino Mega совместно с цифроаналоговым преобразователем MAX5533 (для фазовращателя СВЧ диапазона). Управление измерительным оборудованием осуществлялось с помощью разработанных программ автоматизированного измерения, калибровки и обработки результатов. Микрофотографии кристаллов интегральных схем векторных фазовращателей УВЧ и СВЧ диапазонов показаны на рис. 7 и 8 соответственно.

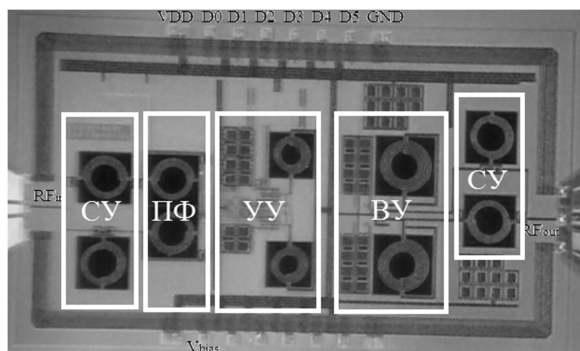


Рис. 7

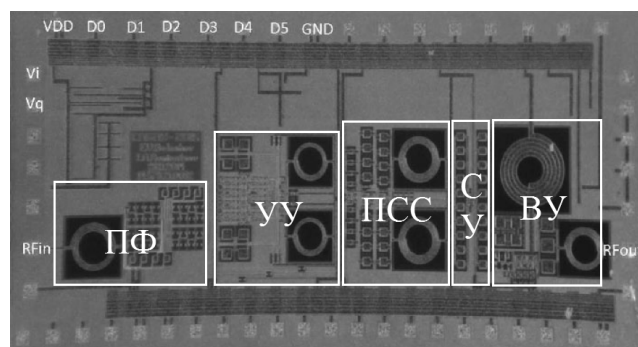


Рис. 8

Зависимости модуля коэффициента передачи векторного фазовращателя УВЧ диапазона от частоты для всех фазовых состояний изображены на рис. 9. Зависимости среднеквадратичного отклонения (СКО) фазовой ошибки от частоты изображены на рис. 10. В результате анализа экспериментальных данных установлено, что основной вклад в ошибки фазовращателя внесен симметрирующим устройством и полифазным фильтром вследствие разброса параметров технологического процесса. Исключение амплитудно-фазового дисбаланса данных блоков позволит обеспечить СКО фазовой ошибки не более 1,4 градуса.

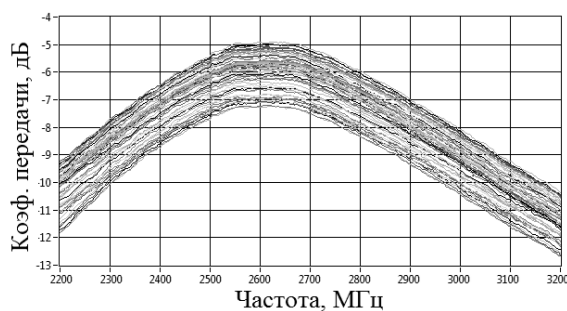


Рис. 9

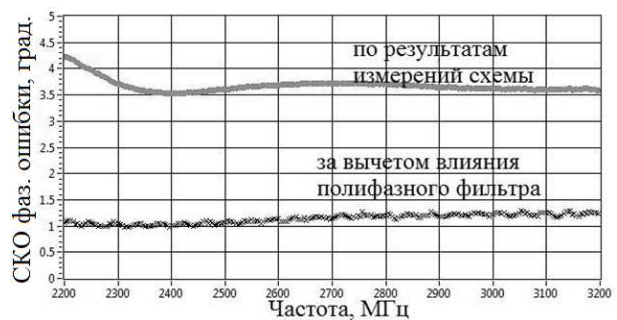


Рис. 10

Зависимости коэффициента передачи векторного фазовращателя СВЧ диапазона от частоты для всех фазовых состояний изображены на рис. 11. Зависимость СКО фазовой ошибки от частоты изображена на рис. 12. Благодаря предложенной структуре фазовращателя и калибровке фазовых состояний СКО фазовой ошибки не превышает 0,9 градуса.

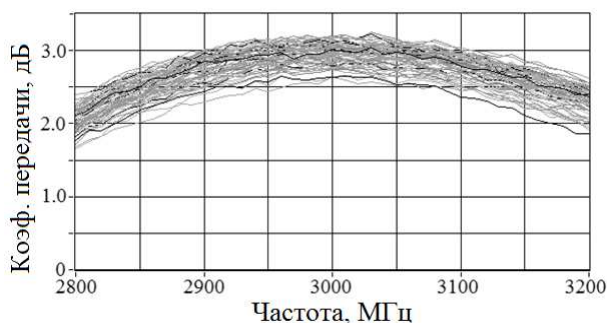


Рис. 11

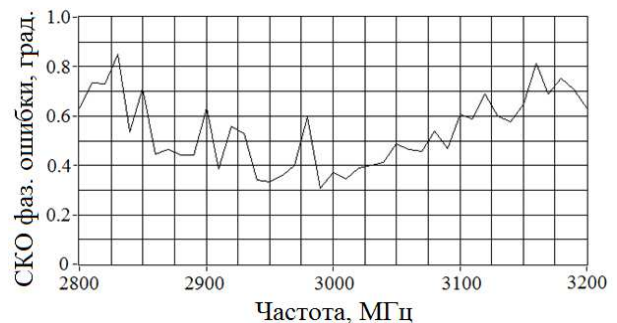


Рис. 12

В заключении сформулированы выводы по диссертационной работе. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1) Установлено, что амплитудная ошибка определяется преимущественно амплитудным дисбалансом квадратурных компонент, в то

время как фазовая ошибка определяется как амплитудным, так и фазовым дисбалансом квадратурных компонент. При этом для обеспечения разрядности шесть бит, т.е. фазовой ошибки не более 2,8 градуса, при амплитудном дисбалансе 0,5 дБ, фазовый дисбаланс не должен превышать 1,9 градуса.

2) Показано, что снижение нагрузочной емкости полифазного *RLC*-фильтра за счет использования усилителей на основе модифицированной ячейки Гильберта, реализующих принцип удвоения частоты единичного усиления по току, позволяет снизить фазовый дисбаланс до четырех раз.

3) Показано, что использование полифазного *RC*-фильтра в небалансном включении позволяет сформировать четыре выходных сигнала с различными амплитудами и фазами, при вычитании которых формируются дифференциальные квадратурные сигналы, что позволяет исключить из схемы симметрирующее устройство и связанный с ним дисбаланс.

4) Предложена новая структурная схема и соответствующая методика расчета в части параметрического синтеза высокочастотного блока векторного фазовращателя на основе методики формирования квадратурных сигналов с использованием *RC*-фильтра в небалансном включении.

5) Показано, что при использовании полифазного *RC*-фильтра в небалансном включении для обеспечения фазового дисбаланса квадратурных сигналов не более 1 градуса коэффициент подавления синфазной составляющей фазовращателя должен быть не менее 35 дБ.

6) Предложен алгоритм калибровки, заключающийся в измерении модуля и фазы коэффициента передачи фазовращателя при изменении управляющих напряжений с заданным шагом и последующем двухмерном интерполировании полученной матрицы значений, который позволяет сократить количество измерений (до 40 раз) по сравнению с измерением всех амплитудно-фазовых состояний.

7) Разработаны принципиальные схемы и топологии векторных фазовращателей и изготовлены кристаллы интегральных схем по КМОП-

технологии с разрешением 0,18 мкм. Площади кристаллов фазовращателей УВЧ и СВЧ диапазонов, исключая элементы электростатической защиты, составили около 6 и 3 кв. мм соответственно.

8) Проведено экспериментальное исследование кристалла векторного фазовращателя УВЧ диапазона и определены следующие характеристики: максимум коэффициента передачи минус 5 дБ на частоте 2,6 ГГц, минимальное значение коэффициента передачи в полосе 2,4-2,8 ГГц минус 9 дБ, амплитудная ошибка не более 1,2 дБ, фазовая ошибка не более 7,5 градусов, СКО фазовой ошибки до 4 градусов. Входная мощность при компрессии на 1 дБ составила 4 дБм при потребляемой мощности 94 мВт. В результате анализа полученных данных установлено, что основной вклад в амплитудную и фазовую ошибки вносит амплитудно-фазовый дисбаланс схем формирования квадратурных сигналов. Исключение их влияния позволяет снизить амплитудную ошибку с 1,2 до 0,5 дБ, фазовую ошибку с 7,5 до 2,5 градусов, а СКО фазовой ошибки с 4,0 до 1,3 градуса.

9) Проведено экспериментальное исследование векторного фазовращателя СВЧ диапазона и определены следующие характеристики: максимум коэффициента передачи составил 3,2 дБ на частоте 3,0 ГГц, минимум коэффициента передачи в полосе 2,8-3,2 ГГц составил 1,7 дБ, амплитудная ошибка не более 0,4 дБ, фазовая ошибка не более 1,5 градуса, СКО фазовой ошибки не более 0,9 градуса. Входная мощность при компрессии на 1 дБ составила 4 дБм при потребляемой мощности 99 мВт.

10) Разработанные интегральные схемы векторных фазовращателей по своим характеристика не уступают известным аналогам, представленным в научной и справочной литературе. Так, амплитудная ошибка разработанного фазовращателя СВЧ диапазона ниже на 0,2-1,0 дБ, а СКО фазовой ошибки до 1,5-3,0 раз меньше известных аналогов за счет использования новой структуры фазовращателя и калибровки фазовых состояний. При этом уровень входной мощности при компрессии на 1 дБ до 20 дБ выше аналогов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, входящих в **Перечень ВАК**:

1. Балашов Е.В., Коротков А.С., Румянцев И.А., Интегральный шестиразрядный векторный фазовращатель S-диапазона частот со сниженной ошибкой установки фазы // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем. Сборник трудов. Часть III. / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемповского. – М.: ИППМ РАН, 2016. – С. 39-44.

2. Балашов Е.В., Коротков А.С., Румянцев И.А., КМОП интегральные схемы диапазона СВЧ: опыт разработки – Электроника: наука, технология, бизнес. – № 7. – 2016. – С.104-113.

Статьи в изданиях, индексируемых в международной базе данных **Scopus**:

3. Balashov E. V., Romyancev I. A., A Fully Integrated 6-bit Vector-Sum Phase Shifter in 0.18 μm CMOS, Proc. of the 11th Int. Siberian Conference on Control and Communications, 21-23 May 2015, Omsk, Russia, pp. 1-5.

4. Balashov E. V., Romyancev I. A., An Unbalanced Transformerless Vector-Sum Phase Shifter Architecture, Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, 2-3 February 2016, St. Petersburg, Russia, pp. 528-531.

Прочие опубликованные работы:

5. **Патент РФ** № 2607673 Российская Федерация МПК H01P 1/18. Высокочастотный фазовращатель на МОП-транзисторах / Балашов Е.В., Румянцев И.А. 2015145037; заявка 20.10.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.

6. Румянцев И.А., Энергонезависимая однократно программируемая память на основе стандартной КМОП-технологии // Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015.– С. 194-196.

7. Балашов Е.В., Иванов Н.В., Коротков А.С., Румянцев И.А., КМОП фазовращатель S-диапазона разрядностью 6 бит с векторной модуляцией // Сборник докладов VIII Научно-технической конференции молодых специалистов по радиоэлектронике. ОАО «Авангард» – СПб.: Изд-во «Трактат», 2016. – С. 60-64.

8. Балашов Е.В., Коротков А.С., Румянцев И.А., Разработка и экспериментальное исследование интегральной схемы фазовращателя СВЧ диапазона частот с уменьшенной погрешностью установки фазы на основе кремниевой КМОП-технологии для приемопередающих трактов телекоммуникационных систем // Сб. статей пятой всероссийской конференции Электроника и микроэлектроника СВЧ. – Том 2. – 30 мая - 2 июня 2016. – С. 209-212.