

*Балашов Е.В., Коротков А.С., Румянцев И.А.  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

## **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**

*Представлены результаты разработки и экспериментального исследования шестизрядного векторного фазовращателя S-диапазона частот с уменьшенной ошибкой установки фазы, изготовленного по 0,18 мкм КМОП-технологии. Для уменьшения ошибки установки фазы разработана бестрансформаторная архитектура высокочастотного тракта. Для компенсации влияния разброса технологических параметров применена калибровка фазовых состояний.*

**Ключевые слова:** Векторный фазовращатель, КМОП-технология, бестрансформаторная архитектура, калибровка фазовых состояний.

Фазовращатели являются неотъемлемой частью приемо-передающих модулей (ППМ) активных фазированных антенных решеток (АФАР), широко используемых в радиолокационных и телекоммуникационных системах для формирования направленного СВЧ излучения [1, 2]. Существуют различные типы фазовращателей: отражательные, на отрезках искусственных длинных линий с переменными параметрами, коммутируемые, векторные. Коммутируемые фазовращатели на основе арсенида галлия получили широкое распространение при реализации ППМ. Учитывая, что количество ППМ может исчисляться сотнями и тысячами штук, использование схем на основе кремния позволит снизить себестоимость АФАР. Возможность реализации на основе векторного фазовращателя векторного модулятора, совмещающего в себе функции как фазовращателя, так и аттенюатора, позволяет дополнительно снизить массогабаритные характеристики и себестоимость.

Векторный фазовращатель, структурная схема которого изображена на рисунке 1а, как правило, состоит из входного симметрирующего устройства (СУ), преобразующего небалансный сигнал в балансный, полифазного фильтра (ПФ), преобразующего балансный сигнал в пару дифференциальных ортогональных сигналов, усилителей с переменным коэффициентом усиления (УУ), изменяющих амплитуды входных сигналов, выходного усилителя (ВУ) и выходного симметрирующего устройства, преобразующего балансный сигнал в небалансный. Сложение квадратурных сигналов с различными амплитудами позволяет формировать сигнал с различными фазами относительно входного сигнала [3].

Каждый блок, осуществляющий преобразование входного сигнала, имеет собственные фазовые и амплитудные ошибки, которые в результате увеличивают максимальную ошибку установки фазы фазовращателя в целом. Таким образом, уменьшение количества преобразований входного сигнала должно привести к уменьшению ошибки установки фазы векторного фазовращателя. Структурная схема разработанного векторного фазовращателя с бестрансформаторной входной цепью изображена на рисунке

1б и состоит из входного полифазного RC-фильтра с небалансным входом (ПФ), усилителей с переменным коэффициентом усиления (УУ), схемы подавления синфазной составляющей (ПСС), активного преобразователя балансного сигнала в небалансный (ПР) и выходного усилителя (УМ) [4].

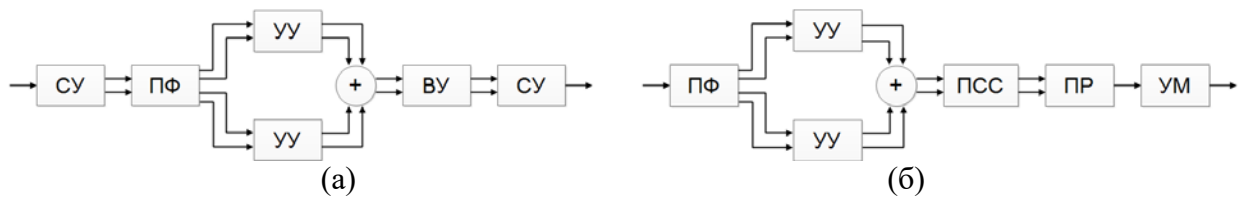


Рис. 1. (а) Структурная схема векторного фазовращателя; (б) структурная схема разработанного векторного фазовращателя с бестрансформаторной входной цепью

Принципиальная схема полифазного RC-фильтра с небалансным входом изображена на рисунке 2а. Векторные диаграммы, изображенные на рисунках 2б и 2в, поясняют принцип формирования выходного сигнала полифазного RC-фильтра с балансным и небалансным входом. Полифазный RC-фильтр преобразует входной балансный сигнал ( $I_{Np}$ ,  $I_{Nn}$ ) в два ортогональных балансных сигнала ( $Q_p$ ,  $Q_n$ ;  $I_n$ ,  $I_p$ ). В случае небалансного входного сигнала на выходе фильтра формируются четыре неортогональных сигнала ( $Q_p$ ,  $Q_n$ ,  $I_n$ ,  $I_p$ ), которые, тем не менее, при вычитании формируют пару ортогональных сигналов ( $dI$ ,  $dQ$ ).

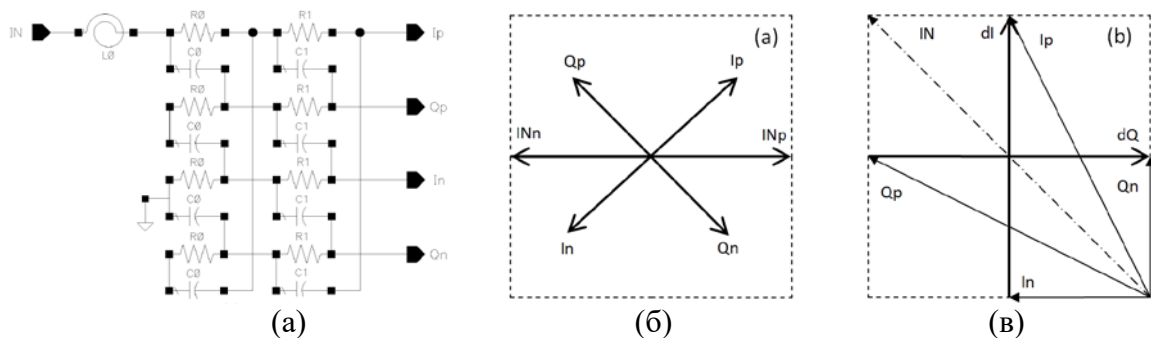


Рис. 2. (а) Принципиальная схема полифазного RC-фильтра; векторные диаграммы полифазного RC-фильтра с (а) балансным и (б) небалансным входом

Для компенсации влияния разброса технологических параметров использована калибровка фазовых состояний в процессе измерения характеристик схемы. На рисунке 3 представлена фотография кристалла разработанной схемы векторного фазовращателя. Кристалл, изготовленный по 0,18 мкм КМОП-технологии, содержит около 9000 транзисторов и занимает площадь 5,3 кв. мм, площадь активной часть схемы без учета кольца электростатической защиты примерно 3,3 кв. мм. Измерения характеристик разработанного кристалла проводились с использованием зондовой станции и анализатора цепей Rohde&Schwarz ZVA40. Для автоматизации измерений была разработана программа на LabVIEW. Результаты измерений представлены на рисунках 4 (а)-(г).

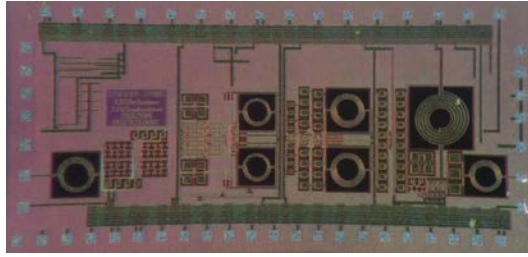


Рис. 3. Фотография кристалла векторного фазовращателя

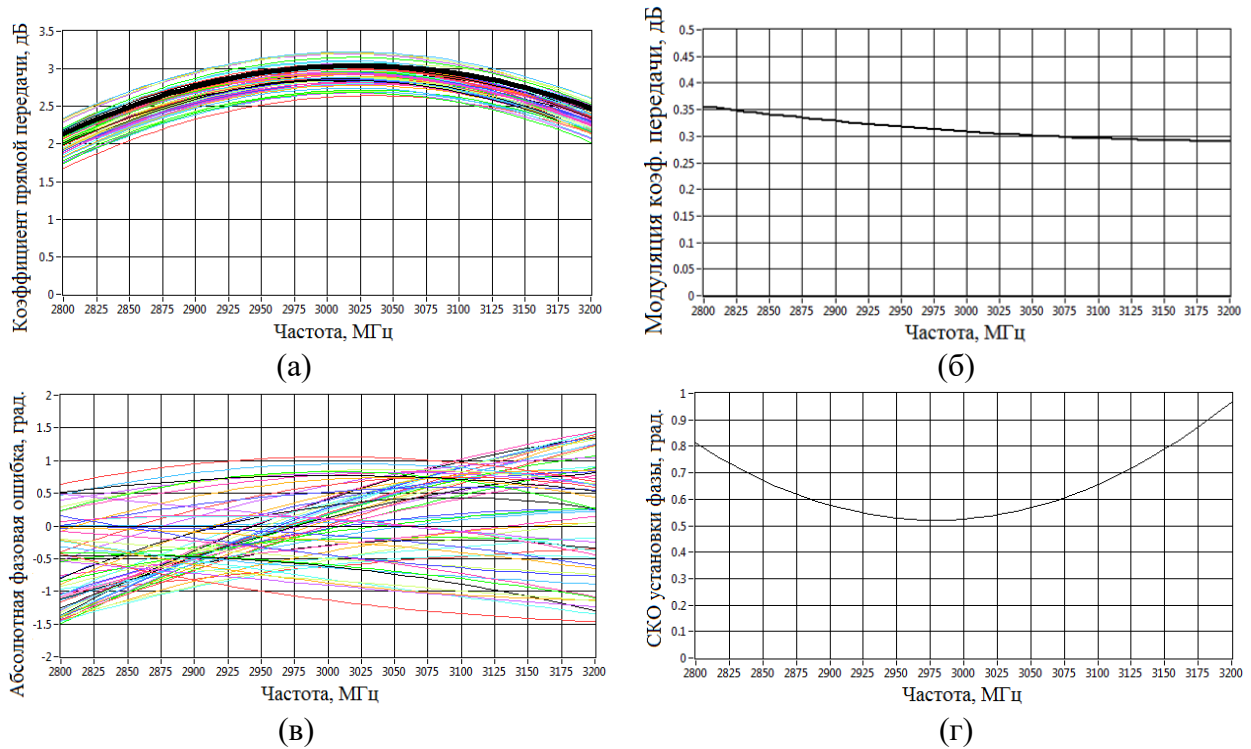


Рис. 4. Зависимости от частоты: (а) коэффициента прямой передачи, (б) модуляции коэффициента передачи, (в) ошибка установки фазы, (г) SKO ошибки установки фазы

Сравнение основных характеристик разработанного векторного фазовращателя с отечественными и зарубежными схемами представлено в таблице 1.

Табл. 1. Сравнение основных характеристик фазовращателей

	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	<b>Работа</b>
Диапазон рабочих частот, ГГц	3,5-6,0	3,0-6,0	3,4-4,0	1,5-2,4	0,1-1,5	<b>2,8-3,2</b>
Мин. коэффициент передачи, дБ	-8,0	-10,5	-5,0	-8,0	5,0	<b>1,7</b>
Макс. амплитудная ошибка, дБ	0,8	0,5	1,5	0,5	-	<b>0,4</b>
Макс. фазовая ошибка, град.	7	25	5	5	-	<b>1,5</b>
Макс. SKO фазовая ошибка, град.	4,3	4,0	-	-	-	<b>1,0</b>
Потребляемая мощность, мВт	5	54	38	620	350	<b>100</b>
Точка компрессии на 1 дБ, дБм	27	30	-	16	-17	<b>4</b>
Технология	GaAs	GaAs	GaAs	БиКМОП	БиКМОП	<b>КМОП</b>

Предложенная в данной работе схема фазовращателя обеспечивает по сравнению с иными решениями минимальные амплитудные и фазовые ошибки при приемлемом коэффициенте передачи. При сравнительно небольшой потребляемой мощности схема обладает высоким значением параметра «точка компрессии на 1 дБ». Уменьшение ошибки установки фазы достигнуто применением бестрансформаторной архитектуры схемы. Для

компенсации влияния разброса технологических параметров применена калибровка фазовых состояний. Следует подчеркнуть, что кристалл схемы фазовращателя изготовлен по стандартной КМОП-технологии.

#### Библиографический список

1. W. H. Theunissen et al., Development of an X-band phased array antenna using multilayer circuit board architecture, IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, , Waltham, MA, 2010, pp. 211-218.
2. M. Boers et al., A 16TX/16RX 60GHz 802.11ad chipset with single coaxial interface and polarization diversity, IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers, San Francisco, CA, 2014, pp. 344-345.
3. A. Asoodeh, M. Atarodi, A Full 360 Vector-Sum Phase Shifter With Very Low RMS Phase Error Over a Wide Bandwidth, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 60, no. 6, June 2012, pp. 1626-1634.
4. E. V. Balashov, I. A. Romyancev “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.
5. Техническая документация на микросхему [Электронный ресурс]: <http://cdn.macom.com/datasheets/MAPS-010165.pdf> (дата обращения: 04.04.2016)
6. Техническая документация на микросхему [Электронный ресурс]: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc649a.pdf> (дата обращения: 04.04.2016)
7. Техническая документация на микросхему [Электронный ресурс]: <http://www.micran.ru/productions/MIS/shifters/MP308/> (дата обращения: 04.04.2016)
8. Техническая документация на микросхему [Электронный ресурс]: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/evaluation-documentation/AD8341.pdf> (дата обращения: 04.04.2016)
9. Техническая документация на микросхему [Электронный ресурс]: <http://www.mri-progress.ru/products/all-lists/1338XK6Y.pdf> (дата обращения: 04.04.2016)