

**А.И. Задорожный<sup>1,2</sup>, О.Г. Вендик<sup>1</sup>, М.Д. Парнес<sup>2</sup>,  
С.К. Тихонов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>2</sup> ООО «Резонанс»

## Высокоточный аналоговый фазовращатель для полуактивной ФАР

*Доклад посвящен разработке аналогового фазовращателя на полупроводниковых варикапах с фазовым сдвигом 0 - 360 градусов и шириной полосы рабочих частот 8%. Рассматривается вопрос минимизации модуляции амплитуды коэффициента передачи в различных фазовых состояниях. Была разработана специальная схема трансформации волновых сопротивлений, что позволило использовать варикапы с достаточно низкой добротностью. Также описано создание схемы цифрового управления аналоговым фазовращателем.*

**Радар, фазированная антенная решетка, электронное сканирование, фазовращатель, поверхностный монтаж, варикап**

Аналоговые фазовращатели в составе фазированной антенной решетки (ФАР) имеют ряд преимуществ по сравнению с дискретными [1], [2]. В дискретных фазовращателях фазовые сдвиги больше 180 градусов получаются сложением фазовых сдвигов нескольких младших разрядов, соответственно их фазовые ошибки складываются. Таким образом, суммарная фазовая ошибка может достигать  $\pm 20$  градусов. Эта ошибка может быть существенно уменьшена, так как аналоговый фазовращатель, в отличие от дискретного, не является каскадным соединением нескольких разрядов. Кроме того, применение аналогового фазовращателя позволяет вносить произвольный фазовый сдвиг, что делает возможным формирование нулей в диаграмме направленности ФАР в направлениях, откуда приходят помехи [2]. В ходе работы, проведенной в ООО «Резонанс», был разработан проходной аналоговый фазовращатель, работающий в нижней части С-диапазона частот и предназначенный для применения в приемной ФАР. В качестве управляющего элемента были выбраны кремниевые варикапы с диапазоном емкостей 1,6 – 0,4 пФ, коэффициент перекрытия 4. Последовательное сопротивление  $r$ , определяющее добротность варикапа, равно 2,1

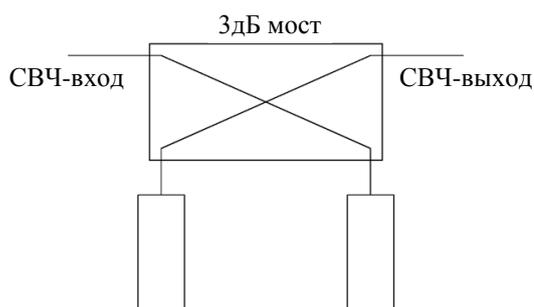


Рис. 1

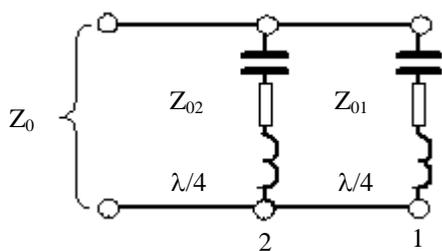


Рис. 2

Ом. Ключевым моментом проектирования стала минимизация модуляции амплитуды коэффициента передачи в различных фазовых состояниях. Для создания проходного фазовращателя была выбрана схема с двумя отражательными фазовращателями, подключенными к плечам гибридного моста [3], [4] (рис. 1). При этом авторы отказались от классической схемы из двух последовательно включенных каскадов, сдвигающих фазу на 180 градусов каждый, из-за большого

значения модуляции амплитуды. Резонансный минимум коэффициента передачи проходит через область рабочих частот при изменении управляющего напряжения. При невысоких значениях добротности варикапов этот минимум достаточно глубок. Вместо двух последовательно включенных каскадов была предложена схема отражательной секции, приведенная на рисунке 2, которая обеспечивает нужный фазовый сдвиг  $0-360^\circ$  с помощью одного каскада.

Как видно из рисунка 2, кроме двух резонансных контуров, отражательная секция содержит два четвертьволновых трансформатора. Первый трансформатор с волновым сопротивлением  $Z_{01}$  обеспечивает диапазон управления фазой от 0 до 360 градусов, а второй трансформатор с сопротивлением  $Z_{02}$

служит для преобразования входного сопротивления по отношению к сопротивлению подводящей линии  $Z_0 = 50$  Ом. При этом коэффициент отражения на входе секции максимален, что обеспечивает достаточно малые потери отраженной волны и, в конечном счете, позволяет уменьшить модуляцию амплитуды. Фотография фазовращателя приведена на рисунке 3. Кроме самого фазовращателя, разработанный модуль содержит устройство защиты приемника и малошумящий усилитель с коэффициентом усиления 10дБ. Амплитудная характеристика полного модуля, приведенная на рисунке 4, показывает, что модуляция составляет  $\pm 0,7$  дБ, что приемлемо для его использования в ФАР. Все компоненты, использованные в модуле фазовращателя, предназначены для установки по технологии автоматизированного

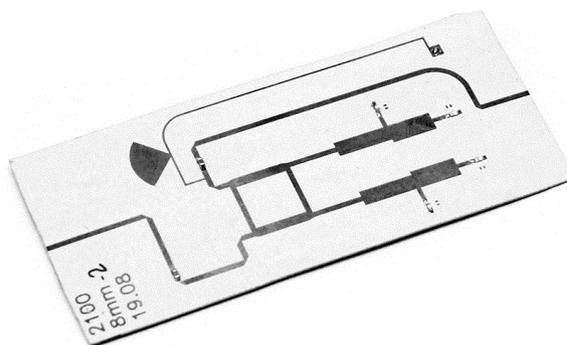


Рис. 3

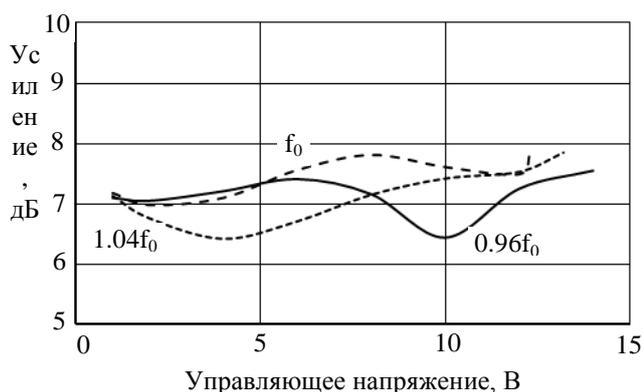


Рис. 4

поверхностного монтажа, а качество подложки использован органический фольгированный диэлектрик, допускающий механическую обработку, сверление и металлизацию отверстий.

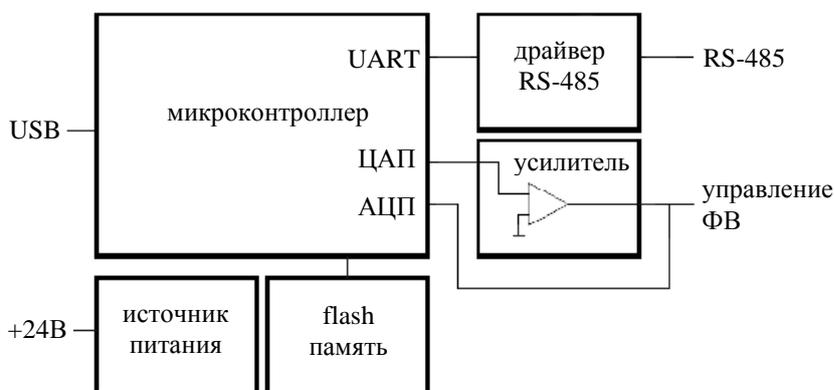


Рис. 5

Тестирование модуля осуществляется с помощью автоматического измерительного

стенда и занимает не более 30 секунд. На данный момент разработанное устройство выпускается серийно.

Кроме того, поскольку в аналоговом фазовращателе вносимый фазовый сдвиг является непрерывной функцией управляющего напряжения, в аналоговом фазовращателе может быть применена схема с индивидуальным управлением каждым фазовращателем, что может быть реализовано с



Рис. 6

помощью микроконтроллеров. В каждый из микроконтроллеров занесена информация о том, какое должно быть подано напряжение на управляющий элемент, чтобы каждый фазовращатель на рабочей частоте вносил требуемый фазовый сдвиг. Сигналом управления в таком случае является цифровой код частоты и фазового состояния. Это позволяет свести фазовую ошибку к минимуму. В микроконтроллер также может быть внесена информация об изменении фазового сдвига в зависимости от температуры. Такая плата управления была разработана и успешно прошла лабораторные испытания. Блок-схема ее приведена на рисунке 5, а фотография самой платы приведена на рисунке 6.

Достаточно невысокая стоимость использованных варикапов и других электронных компонентов, а также диэлектрической подложки, делает его коммерчески конкурентоспособным. Найденные схемотехнические решения могут быть использованы для проектирования модуля на основе полупроводниковой интегральной технологии. Предложенная схема цифрового управления позволяет получить высокую точность установки фазы, ограниченную лишь разрядностью ЦАП и измерительного оборудования. Также при таком подходе отсутствует необходимость настройки начальной фазы фазовращателей, что очень существенно при серийном производстве.

#### Библиографический список

1. Хижа Г. С., Вендик И. Б., Серебрякова Е. А. СВЧ-фазовращатели и переключатели. М.: Радио и связь, 1984.
2. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электрическим сканированием (Введение в теорию) / под ред. Л.Д. Бахраха. М.: Сайнс-Пресс. 2002.
3. Pedram Mousavi, Mohammad Fakharzadeh, S. Hamidreza Jamali, Kiarash Narimani, Mircea Hossu, Hamid Bolandhemmat, Gholamreza Rafi, and Safieddin Safavi-Naeini. A Low-Cost Ultra Low Profile Phased Array System for Mobile Satellite Reception Using Zero-Knowledge Beamforming Algorithm. IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 56, no.12, december 2008.
4. Малорацкий Л. Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. М.: Сов. радио, 1976.