

Фазовращатели на основе МЭМС

Виктор КОЧЕМАСОВ,
К. Т. Н.
info@radiocomp.ru
Александр МАЙСТРЕНКО
alexandermaster@mail.ru

Современную связную и радиолокационную аппаратуру невозможно представить без сканирующих антенных решеток, использующих фазовращатели с электронным управлением. Требования малых потерь, высокой линейности, низкой мощности управления, компактности и невысокой стоимости заставляют разработчиков таких фазовращателей обратить внимание на МЭМС-переключатели как основу для их построения.

Фазовращатель — один из основных компонентов сканирующих антенных решеток, применяемых в радиолокационных и связных системах, в частности активных фазированных антенных решеток (АФАР). АФАР может состоять из нескольких сотен, тысяч и даже миллионов элементов, каждый из которых содержит фазовращатель, поэтому основные технические параметры антенной системы во многом определяются характеристиками установленных фазовращателей.

Фазовращатель представляет собой линейное двухпортовое устройство, которое в соответствии с сигналом управления меняет фазу сигнала выходного порта по отношению к фазе сигнала входного порта. Управление фазовращателем может быть цифровым, аналоговым и цифро-аналоговым.

В случае цифрового управления фазовращатель состоит из n последовательно включенных ячеек, способных по сигналу управления формировать фазовые сдвиги соответственно $180, 90, 45, \dots, 360/2^n$ угловых градусов. Фазовый сдвиг выходного сигнала может принимать только дискретные значения, причем величина дискрета определяется последней ячейкой и зависит от разрядности фазовращателя n . Например, для пятиразрядного фазовращателя фазовый дискрет составляет $11,25^\circ$.

При аналоговом управлении фазовый сдвиг монотонно и непрерывно зависит от управляющего напряжения, которое подается на управляемый элемент, например варактор. Недостаток аналогового управления обычно заключается в нелинейной зависимости фазового сдвига от управляющего напряжения. Преодолеть его можно с помощью схем линеаризации.

Цифро-аналоговый способ управления предусматривает преобразование управляющего кода в аналоговое напряжение, а нелинейность характеристики управления устраняется, например, с помощью ПЗУ, в котором записана корректирующая функ-

ция с обратной нелинейностью. Разрядность цифро-аналоговой системы управления может быть любой, но обычно она не превышает 12.

В АФАР фазовращатели устанавливаются сдвиг фазы для каждого элемента. Для работы в составе АФАР от фазовращателя требуется хорошее согласование по импедансу, низкое вносимое затухание, возможность работать с достаточно мощными сигналами, малая мощность в цепи управления и малое время установления. Для бортовых АФАР важны компактные размеры и вес, а также устойчивость к вибрациям и ударам. В современной аппаратуре используются фазовращатели с электронным управлением на основе:

- ферритов;
- сегнетоэлектриков (ферроэлектриков);
- PIN-диодов;
- полевых транзисторов (ПТ, FET);
- микроэлектромеханических систем (МЭМС, MEMS).

Каждый тип электронных фазовращателей имеет свои преимущества и недостатки. Ферритовые фазовращатели могут работать с мощными сигналами, имеют низкие потери и обеспечивают низкую погрешность установки фазы. Однако у них высокая стоимость, большие габариты, они требуют высокой мощности в цепях управления и более инерционны по сравнению со всеми остальными типами фазовращателей.

Применение сегнетоэлектриков в фазовращателях весьма перспективно из-за высокой скорости управления фазовым сдвигом, широкого динамического диапазона, простоты изготовления и низкой стоимости. К недостаткам сегнетоэлектрических фазовращателей следует отнести сравнительно высокий температурный коэффициент диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика и в ряде случаев существенное изменение тангенса диэлектрических потерь от управляющего напряжения, вызывающее паразитную модуляцию выходного сигнала.

Полупроводниковые фазовращатели на ПТ- и PIN-диодах имеют невысокую стоимость, малый вес и габариты. Среди их недостатков низкая допустимая мощность сигнала и значительные вносимые потери, достигающие 4–6 дБ для частот 12–18 ГГц и 7–10 дБ для 30–100 ГГц. PIN-диоды обеспечивают более низкие потери по сравнению с ПТ, но требуют большей мощности в цепи управления. Время переключения полупроводниковых фазовращателей находится в диапазоне наносекунд.

Серьезную альтернативу полупроводниковым фазовращателям составляют приборы, управляемые МЭМС-переключателями [1]. Фазовращатели на основе МЭМС демонстрируют более низкие потери по сравнению с полупроводниковыми, особенно в диапазонах частот 8–120 ГГц. В [2] приводятся потери четырехразрядного фазовращателя диапазона 40 ГГц на МЭМС, составляющие 2,25 дБ, в то время как аналогичный фазовращатель на РНЕМТ имеет потери 6,5 дБ. Снижение потерь в трехразрядном фазовращателе на основе МЭМС по сравнению с аналогичным прибором на основе GaAs-FET составляет от 3 дБ на частоте 10 ГГц до 6–7 дБ на частоте 100 ГГц (табл. 1). Снижение потерь сигнала означает повышение вероятности обнаружения цели или дальности связи без увеличения энергетического потенциала станции, что особенно актуально для автономных бортовых систем.

Фазовращатели строятся по схемам (рис. 1), в которых используются либо МЭМС-переключатели с резистивным кон-

Таблица 1. Средние потери трехразрядных фазовращателей на МЭМС и GaAs-FET для разных диапазонов частот

Диапазон (частота, ГГц)	Потери МЭМС, дБ	Потери GaAs-FET, дБ
X (8–12)	0,9–1,0 (0,3/разряд)	3–4 (1,2/разряд)
Ka (27–40)	1,7–2,0 (0,6/разряд)	6–7 (2,2/разряд)
V (40–75)	2,3–2,5 (0,8/разряд)	8–9 (2,8/разряд)
W (75–110)	2,7–3,3 (1,0/разряд)	9–11 (3,3/разряд)

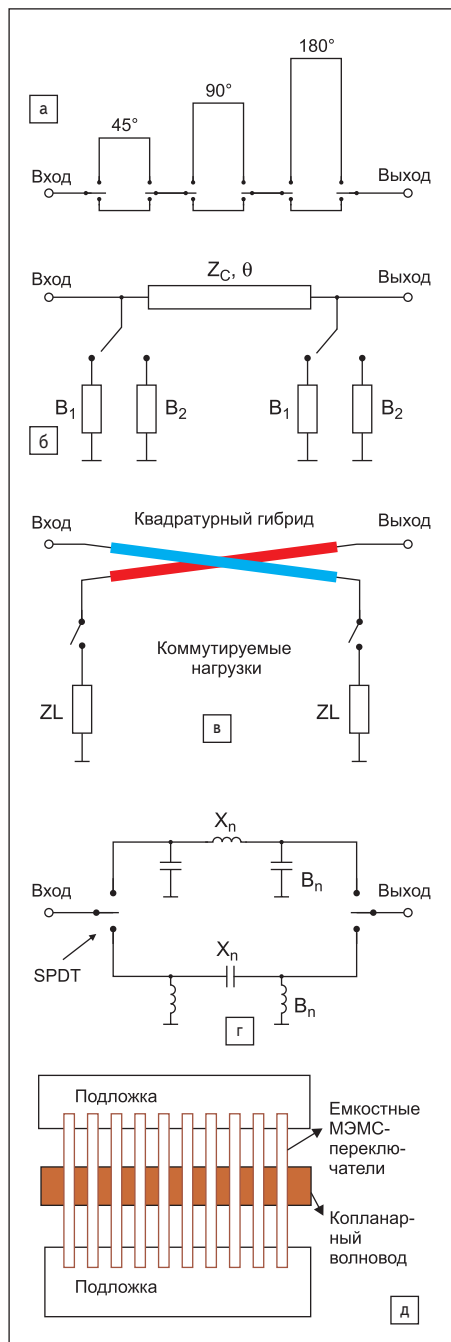


Рис. 1. Фазовращатели на основе МЭМС:

- а) с коммутацией линий задержки;
 б) с нагруженной линией;
 в) отражательного типа;
 г) с коммутацией НЧ- и ВЧ-фильтров;
 д) с коммутацией распределенных нагрузок (DMTL)

тактом «металл-металл» для коммутации сигнальных трактов, либо переключатели с емкостным контактом «металл-диэлектрик-металл» для дискретного изменения емкости в больших пределах. Так, на рис. 1а показан фазовращатель с коммутацией линий задержки. Линии задержки различной длины обеспечивают фазовые сдвиги 180, 90, 45, 22,5, 11,25° и т. д. в последовательно включенных ячейках. В таком фазовращателе используются резистивные МЭМС-переключатели.

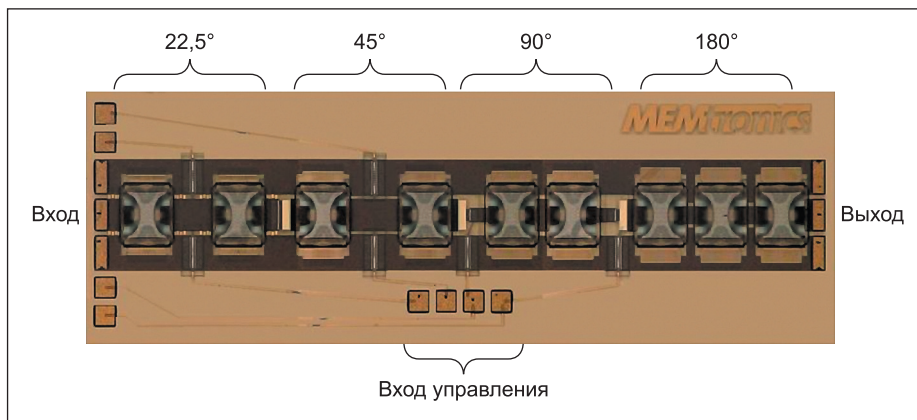


Рис. 2. Четырехразрядный МЭМС-фазовращатель разработки фирмы MEMtronics

На рис. 1б представлен фазовращатель с нагруженной линией. Нагрузки с различным волновым сопротивлением коммутируются емкостными или резистивными МЭМС-переключателями.

Фазовращатель отражательного типа, содержащий квадратурный гибридный с реактивными нагрузками, коммутируемыми емкостными или резистивными МЭМС-переключателями, изображен на рис. 1в.

Фазовращатель с коммутацией НЧ- и ВЧ-фильтров на LC-элементах показан на рис. 1г. Для коммутации используются резистивные МЭМС-переключатели.

Решение под названием DMTL (Distributed MEMS Transmission Line) представляет собой линию с распределенными МЭМС. Это фазовращатель на основе распределенных по длине копланарного волновода (CPW) МЭМС-переключателей с емкостными контактами (рис. 1д).

Все схемы, кроме DMTL, могут быть реализованы также с помощью PIN-диодов и ПТ, представляющих собой управляемые резисторы, в то время как для DMTL необходимы управляемые конденсаторы. В DMTL-фазовращателе используется копланарный волновод с высоким волновым сопротивлением, на котором периодически размещены МЭМС-переключатели с емкостным контактом. Подача на волновод управляющего напряжения вызывает срабатывание переключателей; их емкость значительно (до 100 раз) увеличивается, что приводит к изменению волнового сопротивления волновода, скорости распространения волны в нем и, соответственно, фазы выходного сигнала.

В качестве подложки МЭМС-структур обычно используется кремний с высоким удельным сопротивлением. Изготовленные на такой подложке фазовращатели для диапазонов 24 и 77 ГГц показали потери соответственно 2,3 и 3 дБ [3]. В качестве активных элементов в них предусмотрены МЭМС-переключатели с емкостным контактом.

Одно из перспективных направлений развития МЭМС — применение подложки из органических материалов, в частности

жидкокристаллических полимеров (Liquid Crystal Polymer, LCP). Это класс термопластов, характеризующийся легкостью, прочностью, низким коэффициентом теплового расширения, относительно высокой температурой плавления и низким значением диэлектрической проницаемости. Использование LCP позволяет создавать недорогие МЭМС и на их основе фазовращатели с высокими электрическими параметрами. На базе LCP разработан одноразрядный фазовращатель с потерями 0,59 дБ на частоте 14 ГГц [4]. Дальнейшее развитие этой технологии позволило создать четырехразрядный фазовращатель на переключаемых линиях с общими потерями 0,96 дБ, или 0,24 дБ на разряд. Погрешность установки фазы на частоте 14 ГГц не превышала 3,96° [5].

Схемы, стабилизирующие фазу выходного сигнала в рабочей полосе частот, например с квадратурным гибридом или с нагруженной линией, могут использоваться в измерительных системах, но не в АФАР. Для управления АФАР необходимы фазовращатели с линейной фазочастотной характеристикой, в частности с переключаемыми линиями или DMTL.

На основе емкостных МЭМС-переключателей фирма MEMtronics выпускает фазовращатели для пассивных фазированных антенных решеток диапазонов X (8–12 ГГц), Ka (26,5–40 ГГц) и более высокочастотных. На рис. 2 показан четырехразрядный фазовращатель для диапазона Ka, его размеры 1,7×5,4 мм. Разработчики отмечают его высокую линейность: точка пересечения третьего порядка IP_3 выше 66 дБм.

Фирма RF Microtech разработала пятиразрядный МЭМС-фазовращатель (рис. 3) для диапазона K (17–18 ГГц). На центральной частоте он обеспечивает фазовый сдвиг до 348,75° с шагом 11,25° и погрешностью 3°. Собственные потери фазовращателя составляют 4 дБ. МЭМС-переключатели управляются напряжением 70 В.

В турецком университете Sabanci University создан четырехразрядный фазовращатель для автомобильных приложений на частоте 77 ГГц (рис. 4). В фазовращателе исполь-

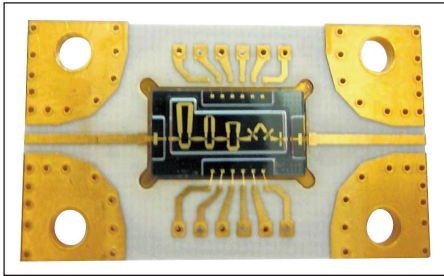


Рис. 3. Пятиразрядный МЭМС-фазовращатель для диапазона К разработки фирмы RF Microtech

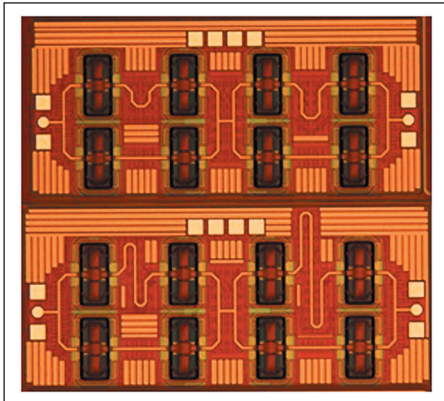


Рис. 4. Четырехразрядный фазовращатель для частоты 77 ГГц разработки Sabanci University

зуется метод коммутации линий различной длины МЭМС-переключателями. Полоса пропускания составляет 8 ГГц, потери 9,3 дБ, фазовая ошибка до 10°. Конструктивно фазовращатель разбит на две секции: управляемая двумя младшими разрядами секция обеспечивает фазовый сдвиг до 90° с шагом 22,5°, а управляемая двумя старшими сдвигает фазу до 360° с шагом 90°. Размер каждой секции 2×0,9 мм.

Для фазовращателей с разрядностью более четырех предложен метод одновременного снижения их потерь и занимаемой площади. В [6] предлагается метод уменьшения потерь пятиразрядного фазовращателя на коммутируемых линиях до уровня трехразрядного. В случае традиционного пятиразрядного фазовращателя на коммутируемых линиях сигнал должен пройти через десять переключателей — по два на каждый одноразрядный каскад. Разработчики сократили число каскадов до трех, в этом случае сигнал проходит через шесть переключателей (рис. 5). Соответственно, два каскада стали двухразрядными, первый обеспечивает фазовые сдвиги до 33,75° с шагом 11,25°, а второй до 135° с шагом 45°. Третий каскад одноразрядный, он формирует сдвиги 0 и 180°. На частоте 17 ГГц потери фазовращателя составили 2,65 дБ, фазовая ошибка менее 0,68°, размеры 4,7×2,8 мм.

В качестве дальнейшего развития идеи многоразрядных каскадов предложена схема на рис. 6. Первый, трехразрядный каскад, фазовращателя формирует фазовые сдвиги до 78,75° с шагом 11,25°, второй, двухразрядный, каскад — до 270° с шагом 90°. Достоинство этой схемы — более низкий уровень вносимых потерь, поскольку сигнал проходит не через шесть, а через четыре МЭМС-переключателя. В числе ее недостатков — увеличенные размеры и занимаемая на подложке площадь, а также несколько пониженная надежность из-за возросшего числа необходимых МЭМС-переключателей: в предыдущей схеме их 20, а в этой 24. Износостойкость МЭМС-переключателей составила 10 млн циклов при мощности проходящего сигнала 0,1–2 Вт.

В [7] приводится сравнение МЭМС-фазовращателей, один из которых построен по схеме коммутации линий (рис. 7а), а второй по схеме изменения параметров нагруженной линии (рис. 7б). Оба фазовращателя представляют собой однобитные ячейки с волновым сопротивлением 50 Ом, обеспечивающие на частоте 20 ГГц фазовый сдвиг 22,5 или 45°. Потери в режиме 22,5° составили 1,1 дБ для фазовращателя на переключаемых линиях и 1,3 дБ для фазовращателя

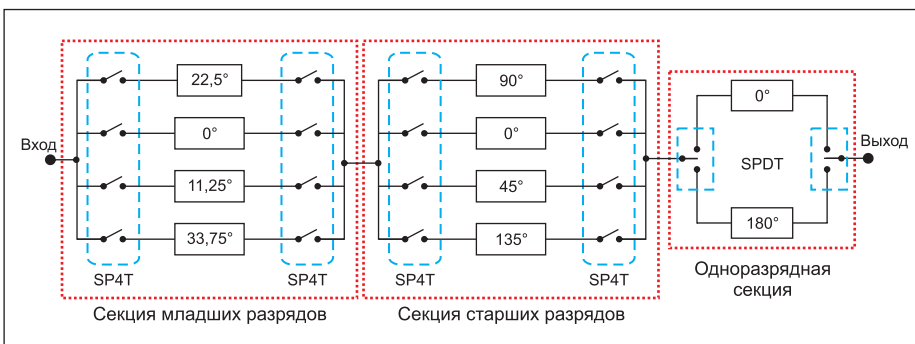


Рис. 5. Схема пятиразрядного фазовращателя с использованием двух- и одноразрядных каскадов

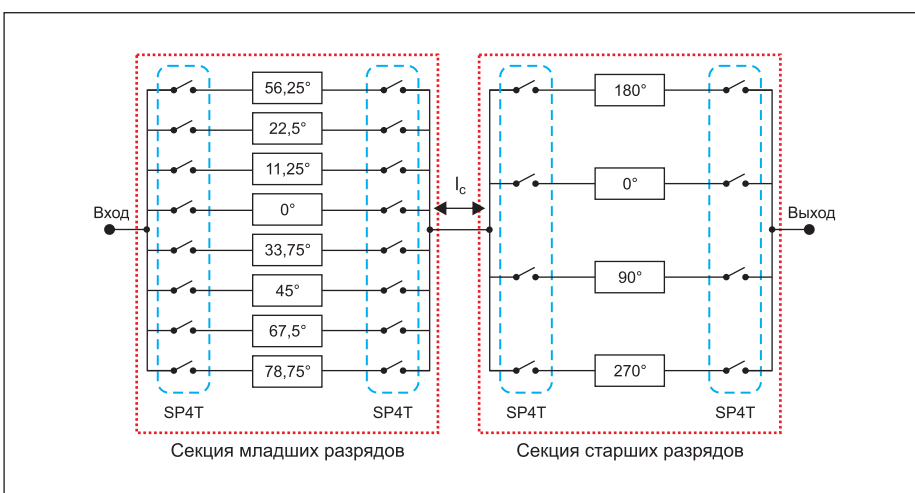


Рис. 6. Схема пятиразрядного фазовращателя с использованием трех- и двухразрядных каскадов

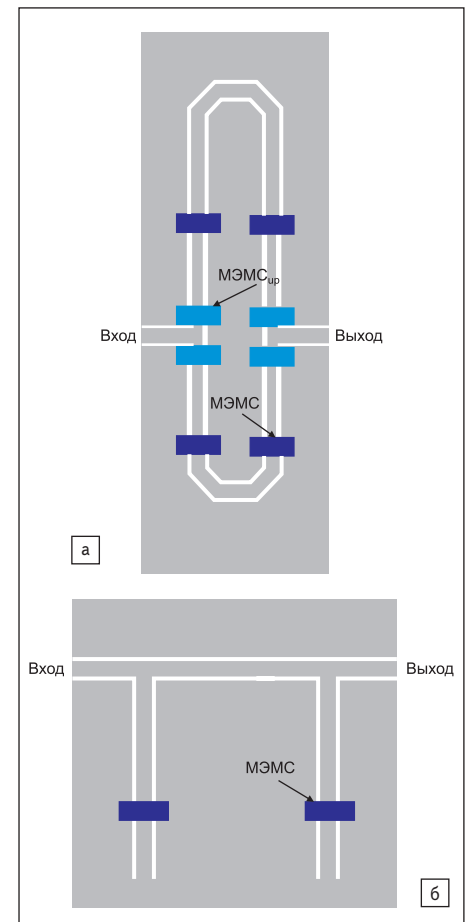


Рис. 7. Топология одноразрядных фазовращателей: а) по схеме коммутации линий; б) по схеме изменения параметров нагруженной линии

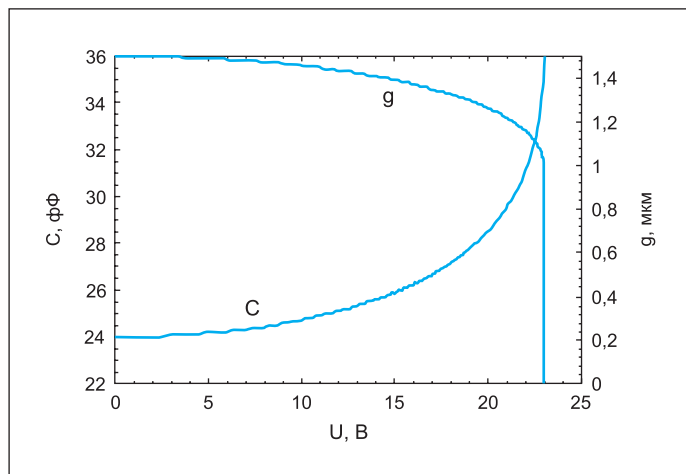


Рис. 8. Изменение емкости и положения мембраны конденсаторной МЭМС-ячейки от управляющего напряжения

на нагруженных линиях. В режиме 45° потери достигли соответственно 1,2 и 1,4 дБ. Для управления МЭМС-переключателями требовалось напряжение 25 В.

Наиболее низкие потери обеспечивают DMTL-фазовращатели. На частоте 10 ГГц при фазовом сдвиге 150° достигнуты потери 1 дБ [8]. Двухрядный DMTL-фазовращатель со сдвигом 180° на частоте 17 ГГц показал уровень потерь 0,87 дБ [9].

Возможны не только цифровые, но и аналоговые способы управления фазовращателями на основе МЭМС. При изменении управляющего напряжения мембрана МЭМС-конденсатора сначала изгибается, при этом его емкость плавно растет, и лишь затем она падает на подложку (рис. 8). Диапазон контролируемого перемещения мембраны составляет 1/3 ее исходной высоты над подложкой, далее она становится неуправляемой [10].

В [11] описан DMTL-фазовращатель с плавно перестраиваемыми в широком диапазоне МЭМС-конденсаторами. В результате был создан широкополосный ФВ с непрерывной перестройкой и низкими потерями. На частоте 40 ГГц при потерях 1 дБ достигнута перестройка 170° , на линии длиной 1 см возможно получить перестройку 538° . В схеме использованы МЭМС-конденсаторы с изменением емкости в 3,4 раза.

МЭМС позволяют создавать управляемые фазовращатели и на основе волноводов. В [12] предлагается концепция волноводного фазовращателя, в котором для плавного управления фазой используется однополюсный фильтр, перестраиваемый с помощью распределенной шунтирующей емкости. Волновод содержит секцию с низким волновым сопротивлением, в которой размещен полу-волновый гребень и электростатический узел МЭМС, управляющий расположенными в этой секции проводящими механическими пальцами (рис. 9). Угол подъема пальцев пропорционален приложенному к МЭМС управляющему напряжению; при напряжении 26 В пальцы поднимаются на максимальный угол $7,6^\circ$. Размеры волновода $1,5 \times 1$ мм, диапазон рабочих частот фазовращателя 96–106 ГГц. При максимальном подъеме пальцев фазовращатель обеспечивает изменение фазы $22,4^\circ$ на частоте 96 ГГц и $46,4^\circ$ на частоте 106 ГГц, вносимые потери составляют 0,23 дБ.

Разработка МЭМС-фазовращателей проводится и российскими специалистами. В ЛЭТИ для систем связи создана серия фазовращателей с коммутацией линий на частоты от 2,4 до 25,5 ГГц [13]. Сигнальные линии выполнены в виде печатных проводников, для их коммутации использованы корпусированные МЭМС-переключатели. Производитель переключателей и их модель не раскрывается. Параметры фазовращателей приведены в таблице 2.

Российская компания «Базовые технологии» разработала шестирядный DMTL-фазовращатель для X-диапазона [14]. Фазовращатель позволяет получить фазовый сдвиг в диапазоне от $5,6$ до 180°

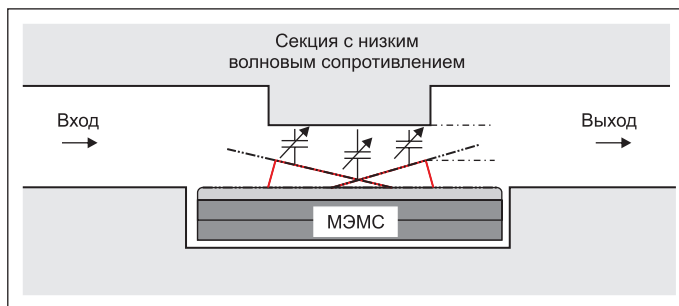


Рис. 9. Волноводный фазовращатель с плавным управлением фазой с помощью МЭМС

Таблица 2. Параметры МЭМС-фазовращателей разработки ЛЭТИ

Центральная частота, ГГц	2,4	2,8	5,75	9,1	25,5
Полоса частот, МГц	200	200	300	300	300
Вносимые потери, дБ	1,1	1,2	1,2	1,2	1,8
Фазовый дискрет, град.	45	22,5	45	45	45
Погрешность, град.	± 3	± 3	± 3	± 3	± 4
Время установки фазы, мкс	10				
Средняя мощность сигнала, мВт	100				
Пиковая мощность сигнала, мВт	1000				

с шагом $5,6^\circ$, вносимые потери составляют не более 2 дБ для режима 180° . Благодаря малым размерам этот фазовращатель может быть использован в составе интегральных микросхем.

Выводы

С момента своего появления в 90-е годы прошлого века СВЧ-переключатели на основе МЭМС прошли долгий путь совершенствования и теперь представляют собой особый класс электро-механических компонентов, позволяющих создавать фазовращатели с уникальными параметрами. К числу их достоинств относятся компактность, линейность, малые вносимые потери, низкая мощность управления, достаточно высокое быстродействие и приемлемая надежность. Такое сочетание параметров делает МЭМС-фазовращатели привлекательными для использования в аппаратуре как гражданского, так и ответственного применения.

Литература

1. Кочемасов В. Н., Майстренко А. П. СВЧ-переключатели на основе МЭМС // СВЧ-электроника. 2016. № 1.
2. Pillans B., Eshelman S., Malczewski A., Ehmke J., Goldsmith C. Ka-Band RF MEMS Phase Shifters. IEEE Microwave and Guided Wave Letters. Vol. 9. No. 12. December 1999.
3. Buck T., Kasper E. RF MEMS phase shifters for 24 and 77 GHz on high resistivity silicon. Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF). Topical Meeting on, 2010.
4. Kingsley N., Wang G., Papapolymerou J. 14 GHz Microstrip MEMS Phase Shifters on Flexible, Organic Substrate. IEEE Xplore Conference: Microwave Conference European, 2005. Vol. 1.
5. Kingsley N., Papapolymerou J. Organic Wafer-Scale packaged miniature 4-bit RF MEMS phase shifter. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 54, No. 3.
6. Dey S., Koul S. K. Reliability Analysis of Ku-Band 5-bit Phase Shifters Using MEMS SP4T and SPDT Switches. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 63. No. 12.
7. Puyal V., Dubuc D., Grenier K., Bordas C., Vendier O., Cazaux J.-L. Design of Robust RF-MEMS Phase Shifters in Ka-band. Romanian Journal of Information Science and Technology. 2008. Vol. 11. No. 2.
8. Sugesh M., Nataraj B. Design and Modeling of RF MEMS Phase Shifters Using Various Structures of Coplanar Waveguides. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). June 2015. Vol. 2. No. 3.

9. Prithvirajan V., Venkatakrishnan P., Punitha A. Low Loss 2-Bit Distributed MEMS Phase Shifter using Chamfered Transmission Line. *Indian Journal of Science and Technology*. March 2015. Vol. 8. No. 6.
10. Barker N.S., Rebeiz G.M. Distributed MEMS True-Time Delay Phase Shifters and Wide-Band Switches. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. November 1998. Vol. 46. No. 11.
11. McFeetors G., Okoniewski M. Distributed MEMS Analog Phase Shifter With Enhanced Tuning. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. January 2006. Vol. 16. No. 1.
12. Psychogiou D., Li Y., Hesselbarth J., Kuhne S., Peroulis D., Hierold C., Hafner C. Millimeter-Wave Phase Shifter Based On Waveguide-Mounted RF-MEMS. *Microwave and Optical Technology Letters*. March 2013. Vol. 55. No. 3.
13. Косьмин Д. М., Котельников И. В., Осадчий В. Н., Лучинин В. В., Козырев А. Б. Фазовращатели для связанных фазированных антенных решеток диапазона частот 2–30 ГГц. СПб государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 2012. www.mwelectronics.ru/2012/Poster/C22_D.M.%20Kos'min_Fazovraschateli%20dlya%20svyazny%60h.pdf
14. www.btlabs.ru/mems