

УДК 621.396.677

Исследование и разработка фазовращателей x-диапазона на основе МЭМС-ключей

05, май 2012

Зайцев О.О., Варавина Е.М.

*Студенты,
кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»*

*Научный руководитель: Р.В. Комягин,
к. т. н., доцент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
varavina.ekaterina@gmail.com;
elegat718@gmail.com

В статье рассмотрены два вида фазовращателей на основе микроэлектромеханических ключей. Проведен расчет фазочастотных характеристик и оптимизация фазовращателей по модулю коэффициента передачи и коэффициенту стоячей волны по напряжению.

С целью уменьшения потерь в фазовращателях с дискретным управлением целесообразным является использование коммутирующих элементов с низкими внесистемными потерями. К таким элементам можно отнести ключи на основе MEMS-технологии. MEMS-технология (MicroElectroMechanical Systems) в настоящее время является перспективной технологией производства СВЧ-устройств. Суть MEMS-технологии заключается в удалении отдельных областей подложки таким образом, чтобы оставшиеся её части оказались приподнятыми над основной поверхностью, или наоборот в том, чтобы нарастить заданную высокопрофильную структуру над ней.

MEMS-ключи имеют ряд преимуществ по сравнению с часто используемыми в фазовращателях p-n-диодными ключами:

- малая потребляемая мощность;
- малые потери в замкнутом состоянии;
- хорошая развязка в разомкнутом состоянии;
- крайне низкие нелинейные искажения.

Сравнение основных характеристик MEMS-ключей и p-n-диодных ключей приведено в таблице 1. К недостаткам MEMS-ключей можно отнести сравнительно невысокое быстродействие (время переключения из одного состояния в другое – не менее 10 мкс) и, в ряде режимов работы, небольшое количество переключений (10^4 - 10^8), а также высокое значение управляющего напряжения (десятки – сотни вольт).

Таблица 1. Основные характеристики pin-диодных ключей и MEMS-ключей

Характеристика	Pin-диодный ключ	MEMS-ключ
Последовательное сопротивление, Ом	1	< 1
Потери на частоте 1 ГГц, дБ	0.5-1.0	0.1
Развязка на частоте 1 ГГц, дБ	40	> 40
Габаритные размеры, мм ²	0.1	< 0.1
Управляющее напряжение, В	3-5	3-30
Ток срабатывания	10 мА	< 10 мкА

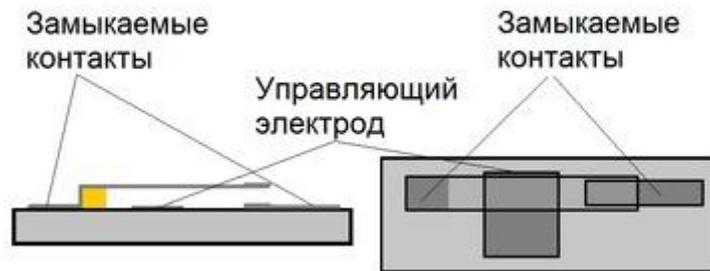


Рис. 1. Изображение MEMS ключа

Радиочастотный MEMS-ключ представляет собой планарную микрополосковую структуру с гибкой металлической перемычкой (рис. 1).

Один из концов этой перемычки постоянно соединён с входной линией, а другой может перемещаться под действием управляющего воздействия и замыкаться на выходную линию. В качестве управляющего механизма в MEMS-ключах используются электростатический, магнитостатический, пьезоэлектрический и электротермический механизмы. При электростатическом управлении используется притяжение двух противоположных зарядов. Для этого способа напряжения импульса переключения может достигать десятков вольт. При магнитостатическом управлении замыкание и размыкание ключа производится за счет изменения магнитного поля. Этот метод требует значительно меньших величин управляющего напряжения, но появляется необходимость использовать магнитные материалы в конструкции ключа. Достоинство этих методов состоит в том, что энергия в цепи управления тратится только в процессе переключения, а разомкнутое или замкнутое состояние удерживается за счет внутренних упругих сил. При пьезоэлектрическом механизме управления приложенное к отдельным элементам объемной структуры напряжение вызывает изменение их физических размеров, за счёт чего, в свою очередь, происходит коммутация. При электротермическом механизме протекающий через отдельные элементы объемной структуры ток вызывает их нагревание, изменяющее физические размеры.

В настоящей статье приведены результаты расчетов двух топологий микрополосковых фазовращателей, один из которых построен на переключаемых отрезках линий передачи, а другой в виде нагруженных линий передачи для младших разрядов и на базе направленных ответвителей для старших разрядов, с применением пакетов прикладных программ для моделирования СВЧ-устройств Ansoft HFSS и AWR Microwave Office.

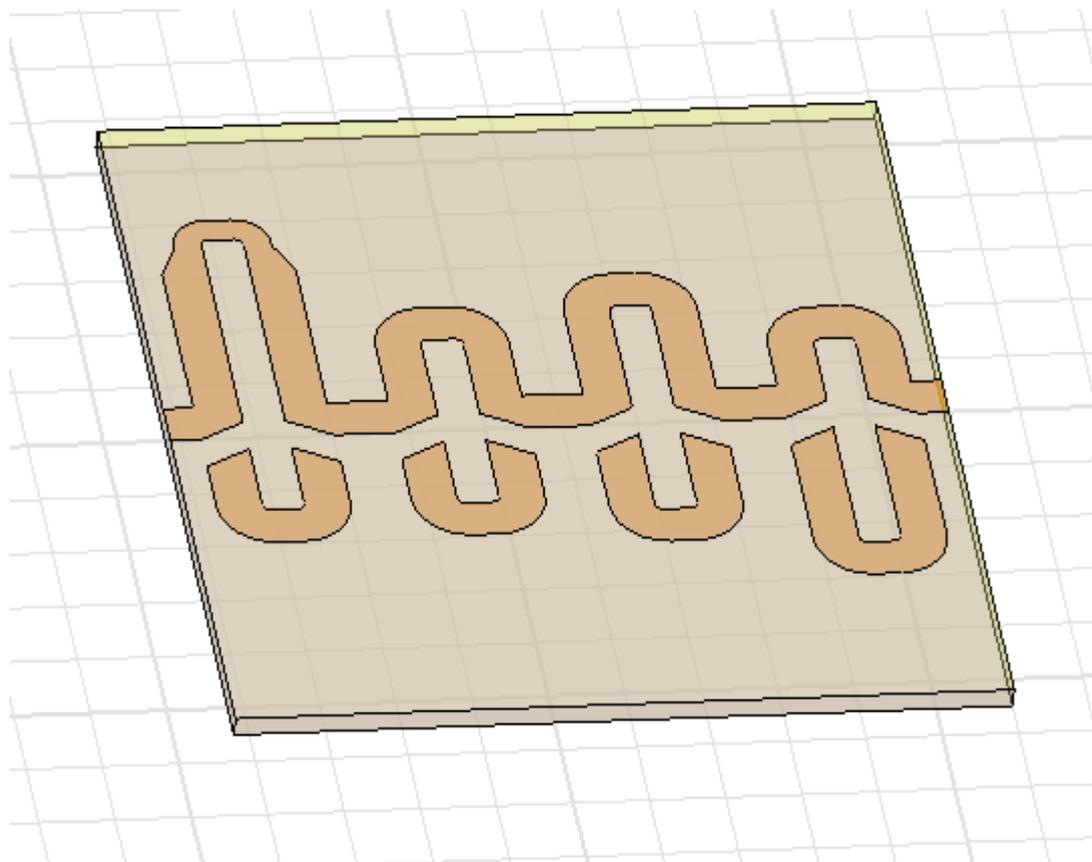


Рис. 2. Модель фазовращателя на переключаемых отрезках линий передачи в программе Ansoft HFSS

Модель фазовращателя на переключаемых отрезках линий передачи представлена на рис. 2. Фазовращатель состоит из 4-х разрядов, вносящих фазовые сдвиги 22.5, 45, 90 и 180 градусов. Расчет проводился в полосе частот 10 – 11 ГГц с помощью пакета прикладных программ HFSS. В модели использована подложка с диэлектрической проницаемостью 3.38 и высотой 0.5 мм. Ширина полосков выбрана из условия обеспечения волнового сопротивления 50 Ом и составляет 1.2 мм. Для уменьшения отражений на неоднородностях микрополосковой линии при ее поворотах в модели используются повороты со скруглением и промежуточные повороты под углом 45 градусов. Так же в целях согласования в разряде, вносящем фазовый сдвиг 180 градусов, использован плавный переход, который в значительной мере улучшил значение коэффициента передачи и коэффициента отражения. Выбор длин микрополосковых линий для внесения нужных значений фазового сдвига проводился на отдельных моделях, представляющих собой модели отдельных разрядов фазовращателя в целях сокращения времени машинных вычислений. Согласование разрядов между собой проводилось на полной модели фазовращателя, представленной на рис. 2, путем выбора длины микрополосковых линий, соединяющих отдельные разряды между собой. По проведенным расчетам размеры фазовращателя составляют 20.4 x 22 мм.

Как видно из результатов моделирования, приведенных в таблице 2, наихудшее значение коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВ) составляет 1.36, а наихудшее значение коэффициента передачи – -0.55 дБ. Среднее значение коэффициента передачи составляет -0.38 дБ. Во всех состояниях фазовращателя обеспечивается заданный фазовый сдвиг и вполне приемлемые значения коэффициента передачи и коэффициента стоячей волны по напряжению.

Таблица 2. Основные характеристики фазовращателя на переключаемых отрезках линий передачи во всех состояниях

Заданный фазовый сдвиг, град.	Получаемый фазовый сдвиг, град.	КСВ	Коэффициент передачи, дБ
0	0	1.25	-0.32
22.5	22.5	1.25	-0.24
45	45	1.215	-0.24
90	90	1.18	-0.29
180	180	1.28	-0.4
22.5+45 = 67.5	67.5	1.18	-0.28
22.5+90 = 112.5	112.5	1.19	-0.31
22.5+180 = 202.5	202.5	1.3	-0.46
45+90 = 135	135	1.29	-0.41
45+180 = 225	225	1.26	-0.4
90+180 = 270	270	1.36	-0.55
22.5+45+90 = 157.5	157.5	1.27	-0.36
22.5+45+180 = 247.5	247.5	1.36	-0.45
22.5+90+180 = 292.5	292.5	1.32	-0.55
45+90+180 = 315	315	1.2	-0.475
22.5+45+90+180 = 337.5	337.5	1.23	-0.49

Для обеспечения работы рассмотренной выше модели фазовращателя на переключаемых отрезках линий передачи необходимо использовать по 4 ключа на каждый разряд, что является причиной дополнительных потерь, вносимых ключами, и увеличивает стоимость всего фазовращателя. В качестве альтернативы в данной статье рассмотрена модель фазовращателя на основе нагруженных линий передачи для младших разрядов и направленных ответвителей для старших разрядов (рис. 3). В таком фазовращателе, при том же числе разрядов, используется в два раза меньше ключей.

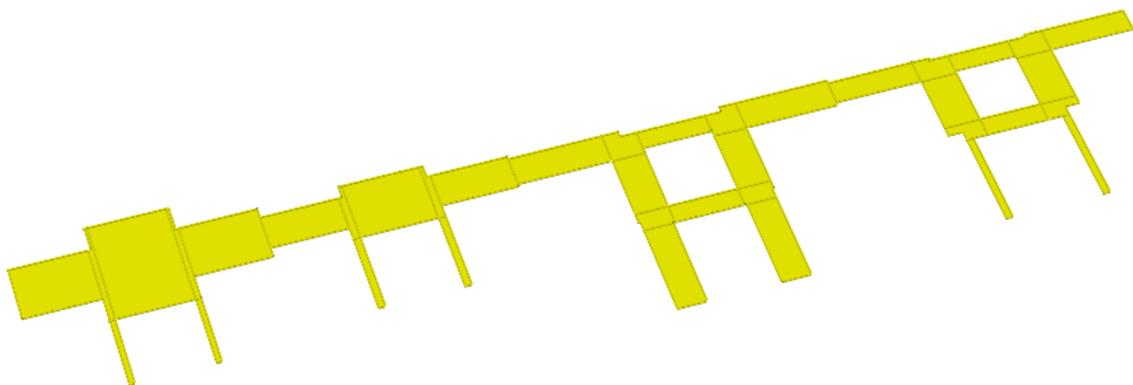


Рис. 3. Модель фазовращателя в виде нагруженных линий передачи для младших разрядов и на базе направленных ответвителей для старших разрядов

Аналогично первой модели фазовращателя, данная модель состоит из четырех разрядов, вносящих фазовые сдвиги 22.5, 45, 90 и 180 градусов: младшие разряды выполнены в виде нагруженных линий, а старшие – на базе направленных

ответвителей. Расчет проводился в полосе частот 10 – 11 ГГц с помощью пакета прикладных программ AWR Microwave Office. В модели использована подложка с диэлектрической проницаемостью 3.38 и высотой 0.5 мм. В целях согласования разрядов фазовращателя между собой и обеспечения значения входного сопротивления 50 Ом используются четвертьволновые трансформаторы, расположенные между разрядами фазовращателя. Так как размеры ключей сопоставимы с длиной волны в системе, то следует учитывать их влияние на электрическую длину короткозамкнутых (разомкнутых) отрезков разрядов фазовращателя путем увеличения их длины в короткозамкнутом состоянии на величину, равную длине ключа. По проведенным расчетам размеры фазовращателя составляют 64 x 15 мм, средний коэффициент передачи -0.7 дБ, а среднее значение коэффициента стоячей волны 1.4.

Таким образом, топология фазовращателя на переключаемых отрезках линий передачи (без учета влияния потерь, связанных с применением ключей) имеет меньшие размеры и более высокий коэффициент передачи, чем топология фазовращателя в виде нагруженных линий передачи. Однако, фазовращатель на основе переключаемых отрезков линий при том же дискрете регулировки фазы требует в два раза большего числа ключей, что увеличивает его конечную стоимость. Следовательно, выбор того или иного типа фазовращателя напрямую зависит от предъявляемых требований по размерам, стоимости и величине вносимых потерь.

Список литературы:

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток /Д.И. Воскресенский [и др.] М.: Радиотехника, 2003. 632 с.
2. ВЧ МЭМС и их применение /В. Варадан [и др.] М.: Техносфера, 2004. 528 с.