

ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ

При создании высокочастотных узлов переключения резервных блоков, блоков управления мощностью, задержкой и положением диаграмм направленности антенн постоянно возникают задачи коммутации сигналов и цепей СВЧ-диапазона. Взрывное развитие цифровых технологий вызвало необходимость построения устройств, коммутирующих СВЧ-сигналы за время, сравнимое с периодом несущих колебаний и быстродействующих аналого-цифровых модуляторов сигналов. При создании таких узлов необходимо предотвратить возможность возникновения противоречий, способных привести к ограничению интервала рабочих частот, скорости переключения, мощности коммутируемого сигнала, росту потерь и ухудшению развязки. Что же делается ведущими мировыми производителями современных электронных компонентов в этом направлении?

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОММУТАТОРОВ

Простейший коммутатор электрической цепи — однополюсный включатель/выключатель на одно направление (SPST) с нулевым сопротивлением между контактами в замкнутом состоянии и бесконечно большим — в разомкнутом (рис. 1а). Возможны и более сложные схемы коммутации, различающиеся числом одновременно переключаемых контактов, последовательностью переключения, числом входных и выходных цепей (рис. 1). Например, кольцевая (transfer) двухпозиционная схема (рис. 1д) с поворотом ротора на 90° удобна для включения дополнительного усилителя в разрыв цепи или для переключения антенны между режимами передачи и приёма (T/R). Подобная схема с тремя контактами и поворотом ротора на 120° эквивалентна схеме однополюсного переключателя на два направления (SPDT) (рис. 1б) и удобна в волноводной электромеханической реализации. Кольцевая трёхпозиционная схема с поворотом ротора на 45° (рис. 1е) позволяет комбинировать различные варианты соединения по двум цепям из четырех, приближаясь по комбинационным свойствам к матричным переключателям.

Время переключения электромеханических коммутаторов составляет десятки миллисекунд. При этом могут проявиться паразитные процессы, например "дребезг" пружинных контактов, зависимость состояния контактов от значения проходящего тока, неодновременное переключение нескольких контактов, деградация переключателя после определенного числа циклов работы, влияние на его работу направления и уровня механических воздействий. В СВЧ-диапазоне



Л. Белов

коммутатор одной цепи можно представить четырехполюсником, для которого связь между падающими и отраженными волнами описывается матрицей передачи (иногда ее называют матрицей рассеяния) размером 2x2. Элементы матрицы — коэффициент отражения по входу S_{11} ; коэффициент передачи с выхода на вход S_{12} ; коэффициент передачи с входа на выход S_{21} ; коэффициент отражения от выхода S_{22} . Значения этих коэффициентов зависят от частоты и состояния коммутатора. При коммутации изменяются все комплексные коэффициенты матрицы передачи: коэффициенты отражения (RL — Return Loss) и передачи в открытом (IL — Insertion Loss) и закрытом (Iso) состояниях. На СВЧ возникают и дополнительные паразитные явления: влияние емкостных связей некоммутируемых контактов; реакция входных или выходных узлов на изменение коэффициентов отражения в результате коммутации; несовпадение момента коммутации с определённой фазой колебания; появление высших типов волн в линии передачи.

В случае применения быстродействующих (время переключения — десятки наносекунд) твердотельных переключателей с управляемым нелинейным сопротивлением необходимо также учитывать такие факторы, как изменение импеданса цепи в открытом и закрытом состояниях; характер процессов перехода из одного состояния в другое и обратно; соответствие уровней сигналов управляющих узлов и используемых полупроводниковых элементов; зависимость сопротивления коммутатора от уровня проходящей мощности и возможность искажения передаваемого сигнала.

Для технической корректной оценки качества СВЧ-коммутирующего элемента используются следующие основные параметры:

- тип переключателя в соответствии со схемой соединения контактов;
- интервал рабочих частот (обычно от постоянного тока до частоты, на которой коэффициент передачи в открытом состоянии уменьшается на 3 дБ);

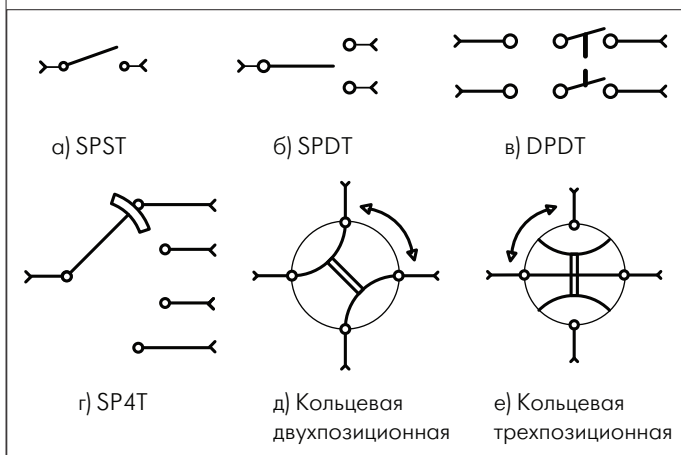


Рис. 1. Варианты схем коммутации

- потери в открытом состоянии IL (измеряемые в децибелах);
- коэффициент стоячей волны (КСВ) или коэффициент отражения RL (в децибелах);
- развязка (изоляция, Iso) разомкнутой цепи (в децибелах);
- мощность входного сигнала, при которой коэффициент передачи сигнала в открытом состоянии уменьшается на 1 дБ;
- импеданс, необходимый для согласования коммутатора по входу и выходу (в омах);
- время включения и выключения соединения (в наносекундах);
- групповое запаздывание сигнала в коммутаторе (в наносекундах);
- вид и уровни управляющих сигналов;
- конструктивное оформление.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ КОММУТАТОРЫ

Простейшие электромеханические переключатели высокочастотных сигналов (на частоту до 100 МГц) – герконовые магнитоуправляемые реле. Для СВЧ-диапазона с повышенной мощностью сигнала переключаемых цепей разработаны специализированные коммутаторы микрополоскового, коаксиального, волноводного типов с электромеханическими реле (EMR – Electro-Mechanical Relays) (табл. 1). Лидер в области производства таких устройств – фирма Dow-Key Microwave [1]. Конкурентоспособные модели выпускают компании Mini-Circuits, Peregrine, Filtronic Sage Labs, Flann Microwave, Narda Microwave и др. Базу данных по разным типам коммутаторов СВЧ-сигналов можно найти на сайте ООО "Радиокомп" (www.radiocomp.ru).

В спецификациях электромеханических переключателей помимо основных параметров приводятся также следующие дополнительные данные:

- тип переключения, т.е. состояние переключателя при снятии управляющего воздействия: запоминание предшествующего состояния (Failsafe); возвращение в исходное состояние (Self Cutoff); переключение на определенное время после поступления фронта управляющего воздействия (Pulse Latching);
- наличие встроенного драйвера для управления переключающим реле при помощи стандартных сигналов ТТЛ-уровня;
- наличие контрольной цепи постоянного тока для индикации или сигнализации о состоянии переключателя;
- допустимые уровень и частота вибраций и ударов (например, для изделий компании Dow-Key Microwave во время работы допустимы вибрации с ускорением до 10–20 g и частотой 20–2000 Гц, а также удары при отсутствии управляющего воздействия с ускорением до 50 g);
- напряжение и ток потребления обмотки переключения (например, постоянное напряжение 6–48 В, ток 360–150 мА).

Кроме того, приводятся значения импеданса входной и выходной цепей (например, 50 или 75 Ом), а также пробивного напряжения; соответствие используемых материалов нормам экологической безопасности; методы испытания коммутатора – горячий (при действии максимально допустимой высокочастотной мощности) или холодный (при малой проходящей мощности). В конструкции некоторых коммутаторов предусмотрена схема автоматического сброса в исходное состояние (Set Reset Circuit), а для подавления колебательных процессов в обмотке управления используются шунтирующие диоды.

Наибольшая коммутируемая мощность $P_{\text{вх}}$ в электромеханических EMR-переключателях ограничена явлением искрения (пробоя) и падает с повышением рабочей частоты (рис.2). В переключателях с наибольшей мощностью СВЧ-сигнала используются специализированные SC-соединители, потребляемая мощность которых по постоянному току цепи управления составляет 3–5 Вт.

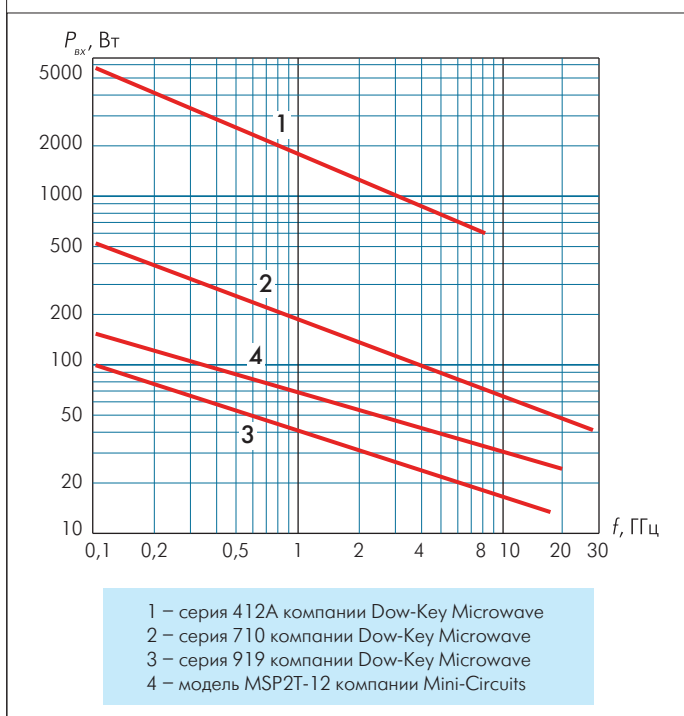


Рис.2. Зависимость максимальной коммутируемой мощности от частоты сигнала

Большинство электромеханических коммутаторов переключаются при помощи реле или шагового двигателя ротора, хотя некоторые имеют ручной или комбинированный механизм переключения (см. табл.1). Время переключения варьируется от 10 до 100 мс в зависимости от модели, типа СВЧ-линии или размера волновода. Модели с встроенным драйвером сигналов ТТЛ-уровня содержат, как правило, дополнительную цепь для установления соответствия между уровнями логических сигналов на входе и нормальным (при отсутствии сигнала управления) состоянием контактов. В конструкции ряда моделей (например, в SPDT-переключателях серии 521 фирмы Dow-Key Microwave) предусмотрено подключение согласующих резисторов взамен размыкаемого контакта, что улучшает согласование. На частоте 12 ГГц максимальный КСВ таких переключателей составляет 1,5:1; изоляция – 60 дБ; потери в замкнутом состоянии – 0,5 дБ.



Рис.3. Переключатель KSW100NAE002 SP6T-типа (0–20 ГГц; IL = 0,2 дБ; Iso = 80 дБ; τ = 10 нс)

Многопозиционные переключатели фирмы Dow-Key Microwave выпускаются на диапазон частот 0–26 ГГц с числом позиций до 12. При этом согласующие внешние нагрузки к разомкнутым цепям в моделях серии 5C1 подключаются отдельными соединителями, а в серии 5E1 используются встроенные резисторы с сопротивлением 50 Ом. Кольцевой переключатель серии 417LP в непрерывном режиме коммутирует СВЧ-мощность 4 кВт с частотой 100 МГц или 1 кВт с частотой 2 ГГц. Малогабаритные (15×10×10 мм) переключатели серии 409 типа SPDT для диапазона частот 0–3 ГГц коммутируют мощность до 70 Вт за время менее 20 мс при КСВ не более 1,2:1 и изоляции не менее 70 дБ.

Таблица 1. Параметры электромеханических коммутаторов типа EMR

Серия или модель (сайт)	Особенность	Диапазон частот, ГГц	Потери/изоляция в зависимости от частоты, дБ		τ , мс	Мощность $P_{1дБ}$ на частоте 1 ГГц, Вт	Срок жизни, млн. циклов	Диапазон температур, °С
			2 ГГц	12 ГГц				
401 (www.dowkey.com)	SPDT	0–26	0,15/80	0,3/60	15	250	1	-55...65 (стандартный) -55...85 (расширенный)
919 (www.dowkey.com)	SPDT, Д	0–18	0,2/80	0,45/60	20	40	1	-55...85
412 (www.dowkey.com)	К, Д, И	0–12,4	0,2/80	0,5/60	20	700	1	-55...65 (стандартный) -55...85 (расширенный)
565 (www.dowkey.com)	SP6T, И	0–26,5	0,2/70	0,4/60	20	400	1	-55...65 (стандартный) -55...85 (расширенный)
5C1 (www.dowkey.com)	SP12T	0–18	0,2/70	0,6/60	15	250	1	-55...65 (стандартный) -55...85 (расширенный)
30C01200 (www.dowkey.com)	В, И	7,5–18	0,25/60	0,25/60	100	1700	0,2	-54...84
511H (www.dowkey.com)	ВМ, Д, К	1–8,8	0,15/65	0,24/65	–	1800	1	-55...85
MSP2T-18 (www.minicircuits.com)	SPDT, О	0–18	0,15/70	0,2/65	–	25	10	-15...65
SXM (www.sagelabs.com)	MPDT, Р	0–18	0,3/60	0,5/60	Р	200	0,1	-10...65
334-2E (www.flann.com)	В, К, И	8,2–140	–	0,2/60	20	–	0,1	-10...60
(www.astswitch.com)	В/К	–	0,05/70	0,3/60	100	5000	0,1	-10...60
130 (www.nardamicrowave.com)	К, DPDT	0–26,5	0,1/80	0,2/70	15	–	1	-35...70
N6120 (www.nardamicrowave.com)	М, Д, И	0–26,5	0,1/60	0,2/50	15	–	1	-35...70
KSW160NAE002 (www.kmwinc.com)	SP6T	0–20	0,1/80	0,2/80	10	200	1	-30...85

Примечание. К – кольцевой; Д – встроенный драйвер для управления сигналами TTL-уровня; ВМ – высокой мощности; В – волноводный; О – отражающий; Р – ручной режим; И – индикация состояния; М – матричная логика соединений; В/К – комбинированная волноводно-коаксиальная конструкция; SPxT – однополюсный переключатель на x направлений; MPDT – многополюсный переключатель на два направления; DPDT – двухполюсный переключатель на два направления.

В конце 2005 года компания Dow-Key выпустила матричный переключатель типа SP12T с внутренними контактами, доступ к кото-

рым обеспечивают SMA-соединители. Это позволяет включать резервное устройство в одну из 12 основных линий сети. Такая технология двойного применения перспективна для средств беспроводной связи, особенно наземных станций спутниковых систем связи и оборудования беспроводных сетей. Частота входного сигнала SP12T составляет 0–18 ГГц, максимальные потери IL – от 0,2 дБ (при частоте 0–4 ГГц) до 0,8 дБ (при 16–18 ГГц), минимальная изоляция Iso – от 70 дБ (при 0–4 ГГц) до 55 дБ (при 16–18 ГГц). Управление может осуществляться через полноскоростной (12 бит/с) порт USB 2.0. Такие переключатели имеют оптоэлектронную схему индикации состояния, контролирующую перемещение приводов ВЧ-контактов. Возможна поставка вариантов с встроенными резисторами с сопротивлением 50 Ом каждый. Время переключения прибора, оснащенного приводом возвращения в исходное состояние и переключения на определенное время после поступления фронта управляющего воздействия, – 50 мс.

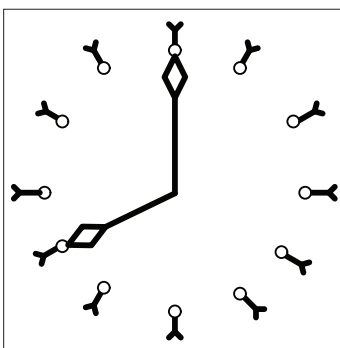


Рис.4. Схема соединений матричного коаксиального переключателя N6120 (две линии из 12; 0–26,5 ГГц; IL = 0,5 дБ; Iso = 50 дБ; τ = 20 мс; T = -35...70°С)

Интерес представляет многопозиционный матричный переключатель N6120 фирмы Narda Microwave, позволяющий выбрать пару соединяемых коаксиальных входов-выходов из 12 (рис.4), так что возможно до 66 различных комбинационных сочетаний.

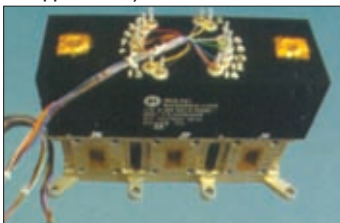


Рис.5. Волноводный переключательный блок 222D50600 фирмы Dow-Key. Волновод WR-51; частота 18-20 ГГц; потери IL = 0,08 дБ; изоляция Iso = 53 дБ; KCB 1,1:1; размер 83×120×54 мм; масса 527 г

Волноводные коммутаторы (рис.5) отличаются от микрополосковых или коаксиальных меньшими потерями в открытом состоянии, лучшей изоляцией за-

крытого канала и высоким уровнем коммутируемой мощности. Однако полоса рабочих частот, в которой гарантируется отсутствие высших типов волн или запредельная отсечка в используемом волноводе, у них более узкая. Обычный тип переключения – Failsafe или Latching, схема – SPDT или кольцевая. Потери в открытом состоянии не превышают 0,05–0,1 дБ, развязка закрытого канала 60–80 дБ, время переключения порядка 15–20 мс, гарантируемое число циклов переключения – не менее 0,2 млн. Производятся волноводные коммутаторы сдвоенного типа, содержащие одновременно волноводные и коаксиальные входы-выходы. Фирма Dow-Key Microwave выпускает стандартные волноводные переключатели с 20 номиналами волноводов для частот 2,6–18 ГГц, а по заказам – ещё восемь номиналов волновода до частоты 64 ГГц. А фирма Flann Microwave составляет серию волноводных переключателей для частот до 140 ГГц (см. табл.1). Для решения вопросов получения разрешений и таможенной очистки при закупке волноводных коммутаторов целесообразно воспользоваться услугами ООО "Радиоком" [2].

На основе простейших многопозиционных электромеханических коммутаторов создаются переключательные матрицы (рис.6) для сигналов с частотой 0–18 ГГц и мощностью до 40 Вт на максимальной частоте. Кросс-развязка такой матрицы фирмы Dow-Key Microwaves равна 50–70 дБ (серии 4101, 4402). Представляют интерес коаксиальные матрицы типа 2x8, 6x6, 1x6 и даже 10x10, которые обладают двунаправленными свойствами или могут содержать встроенные усилители. Во многих изделиях этого типа предусмотрена возможность изменения конфигурации матрицы электрическим сигналом.



Рис.6. Коммутируемая коаксиальная матрица серии 4402 фирмы Dow-Key Microwave

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ КОММУТАТОРЫ
Для переключения шинных сигналов с полосой частот до 500 МГц в цифровой технике передачи данных используются твердотельные ключи, замыкающие линию на общий провод за несколько наносекунд (табл.2). Сегодня уже выпускаются сотни моделей твердотель-

Таблица 2. Параметры быстродействующих полупроводниковых коммутаторов

Модель (сайт)	Особенность	Диапазон частот, ГГц	IL/Iso на 2 ГГц, дБ	τ_1 , нс	Мощность на 2 ГГц, дБмВт		Управляющие сигналы, В	Размеры, мм
					$P_{1дБ}$	P_{IP3}		
HMC190MS8 (www.hittite.com)	SPDT, O	0–3	0,4/27	10	30	50	0/3	3×3×0,7
HMC427LP3 (www.hittite.com)	K, Д	0–8	1,2/42	4	26	43	0/5	3×3×0,8
HMC484MS8G (www.hittite.com)	T/R, Д, BM	0–3	0,5/30	2	40	70	0/5	3×5×0,7
SW-393 (www.macom.com)	SPST	0,5–2	1,6/42	2000	26	53	0/5	4×6×1,7
SWG5-0214 (www.macom.com)	SPDT	0–3	2/32	50	20	35	0/5	15×10×2,6
M3SWA-2-50DR (www.minicircuits.com)	SPDT, П, Д	0–4,5	0,6/85	10	25	–	0/5	–
PE-4259 (www.peregrine-semi.com)	SPDT, O	0–3	0,3/30	1500	33	55	0/3,3	2,2×1,3×0,8
RF2436 (www.rfmd.com)	T/R, K, П	0–2,5	0,5/24	н/д	27	39	0/0,7	2,9×2,8×1
SSW-524 (www.sirenta.com)	SPST	0–8	0,9/45	–	25	35	–	–
UPG2027TQ (www.cel.com)	BM, SPDT	0,1–2,5	0,5/19	1000	36	38	0/3	2,5×2,3×0,6
UPG2163T5N (www.cel.com)	УТ	2–6	0,4/35	50	31	35	0/3	1,5×1,5×0,4
UPG183GR (www.cel.com)	4x2	0,95–2,15	7/26	1500	0	10	0/5	5,5×5,2×0,2
AT-204 (www.synergy.com)	SPST	0,01–1	3,5/50	2000	0	–	0/5	0,8×0,4×0,4
PE9354 (www.peregrine-semi.com)	SPDT	0,01–3	0,55/30	–	30	50	0/3,3	6,3×3,8×1,8

Примечание. К – кольцевой; Д – встроенный драйвер для управления ТТЛ уровнями; T/R – переключатель приём-передача; МП – многопозиционный; BM – высокой мощности; O – отражающий; 4x2 – матрица 4 входа, 2 выхода; УТ – ультратонкий.

ных ключей для СВЧ-диапазона (рис.7), обеспечивающих также и широкополосное согласование импедансов. Так, только фирма Peregrine Semiconductor поставляет более 50 моделей ключей разной конфигурации для частот от 0 до 20 ГГц. В таких коммутаторах для изменения коэффициента передачи СВЧ-цепи используются переключательные диоды или полевые транзисторы, что обеспечивает высокое быстродействие по цепи управления и исключает чувствительность к внешним механическим воздействиям. На основе простых ключей выпускаются микросхемы переключательных матриц.

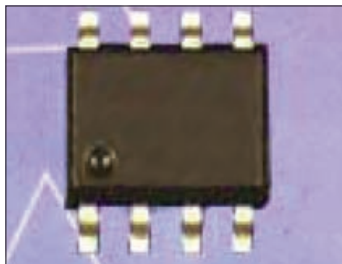


Рис.7. Переключатель SPST модели SW-393 фирмы M/A-Com

Правда, более широкому применению полупроводниковых ключей и повсеместной замене ими электромеханических EMR-переключателей препятствуют такие факторы, как достаточно высокие коэффициенты потерь и отражения, а также продолжительное время переключения и необходимость развязки разомкнутых цепей.

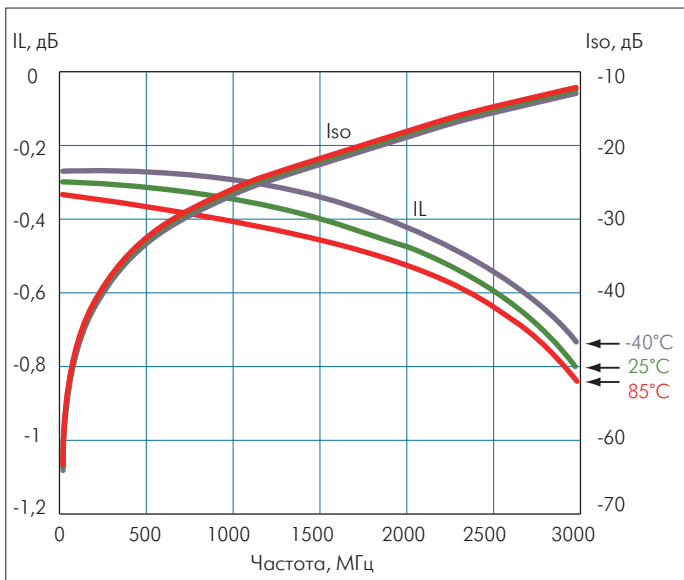


Рис.8. Частотная зависимость коэффициента отражения IL от входа S_{11} и коэффициента изоляции Iso в разомкнутом состоянии S_{12} (при разных значениях температуры) для коммутатора PE4259 компании Peregrine Semiconductor

К тому же, проходящая мощность полупроводниковых коммутаторов составляет доли ватта. Динамический диапазон мощности коммутируемых сигналов ограничен явлениями пробоя, перегрева или значением P_{IP3} , т.е. входной высокочастотной мощностью, при которой уровень нежелательных комбинационных продуктов высшего порядка на выходе равен уровню полезного сигнала. Значение P_{IP3} в большинстве моделей на 10–15 дБ превышает уровень $P_{1дБ}$. Применение ключей на полевых транзисторах увеличивает эту разницу до 20–25 дБ.

В коммутаторах неотражающего типа каждая входная цепь имеет встроенный дополнительный согласованный резистор, подключаемый к входу одновременно с размыканием рабочей цепи. В результате повышается развязка разомкнутых цепей и улучшается согласование.

В сверхширокополосных коммутаторах СВЧ-сигналов критические параметры (комплексные коэффициенты матрицы рассеяния) в сильной степени зависят от рабочей частоты (рис.8), от схемы включения и от импеданса нагрузки. Ведущие производители в сопроводительной документации приводят таблицы или годографы изменения этих параметров.

Для выполнения встроенных логических схем преобразования уровней управляющих сигналов с требуемой скоростью переключения ведущие мировые производители СВЧ-ключей применяют собственные, обычно патентованные, технические решения (рис.9).

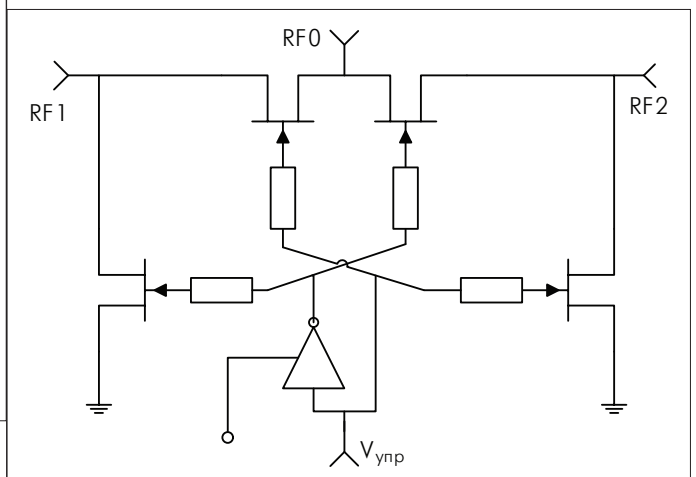


Рис.9. Принципиальная электрическая схема КМОП-переключателя на полевых транзисторах фирмы Peregrine Semiconductor

Скорость коммутации СВЧ-ключей определяют два параметра: постоянная времени τ_1 (t_{RISE} , t_{FALL}), соответствующая времени изменения уровня СВЧ-мощности с 10 до 90% максимального значения или обратно, и τ_2 (t_{ON} , t_{OFF}), равная времени достижения управляющим сигналом среднего значения между логическими уровнями и 90%-ным уровнем СВЧ-мощности, то есть параметр, учитывающий задержку фронта сигнала управления. Значение τ_2 обычно в два-четыре раза превышает значение τ_1 .

Из числа коммутаторов, характеристики которых приведены в табл.2, следует обратить внимание на модель HMC484MS8G, которая за необычайно короткое время $\tau_2 = 2$ нс переключает цепи передачи и приёма повышенной мощности (до 10 Вт) при уровне P_{R3} до 70–72 дБмВт.

Интерес представляет и выпускаемая фирмой Peregrine Semiconductor на рынок, наряду с другими СВЧ-компонентами, серия радиационно стойких ключей. Так, SPDT переключатель модели PE9354 может функционировать в интервале температур -55...125°C при дозе ионизирующей радиации до 100 крад/с.

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ (MEMS) СВЧ-КОММУТАТОРЫ

В последние три-пять лет исключительно активно развивается новая нанотехнология микроэлектромеханических систем (Micro-Electro-Mechanical Systems – MEMS). С учетом перспектив применения MEMS-технологии в электронных системах, медицинском оборудовании, при создании датчиков ускорения, вибраций, гироскопов в мире ведутся интенсивные разработки как самой технологии, так и изделий на её основе. В частности, производятся LC-фильтры для поверхностного монтажа, резонансная частота которых перестраивается в пределах 1,5–2,5 ГГц за счёт перемещения электростатическим полем электрода на 1–3 мкм. MEMS-технология открывает новые возможности и в технике СВЧ-ключей (табл.3).

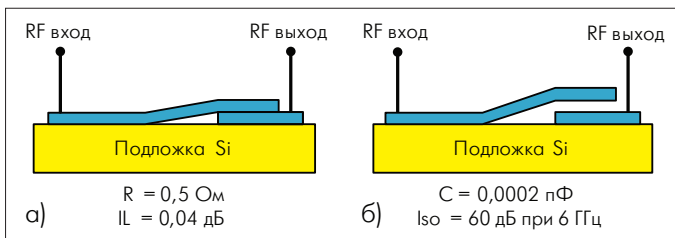


Рис. 10. Схема MEMS-ключа в замкнутом (а) и разомкнутом (б) состояниях

Радиочастотный MEMS-ключ имеет выполненную на кремниевой подложке планарную микрополосковую структуру с гибкой металлической перемычкой, один конец которой постоянно соединён с входной линией, а другой может перемещаться под действием статического электрического заряда и замыкаться на выходную линию (рис.10). В некоторых MEMS-ключах для перемещения перемычки используется статическое магнитное поле. В замкнутом состоянии переходное сопротивление контактов составляет доли ома, благодаря чему потери IL в линии на рабочей частоте до 6 ГГц не превыша-

ют сотых долей децибела. В разомкнутом состоянии в линии передачи, ёмкость которой составляет десятые доли фемтофарады, возникает разрыв, в результате чего развязка (изоляция Iso) на той же рабочей частоте равна 60 дБ. На рис.11 показана топология двойного MEMS-ключа фирмы WiSpry в бескорпусном исполнении.

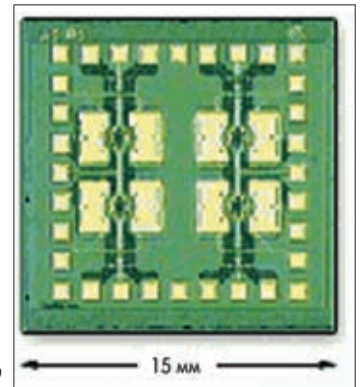


Рис. 11. Топология двойного MEMS-ключа SPDT-типа диапазона 0–6 ГГц фирмы WiSpry

Важнейшее **достоинство** MEMS-ключей – возможность их интегрирования с активными КМОП, биполярными, SiGe-, GaAs-элементами и полевыми транзисторами. Кроме того, заслуживают внимание и другие их достоинства:

- малые габариты (размер в бескорпусном исполнении – 1,5×1,5×0,7 мм, в корпусе фирмы TeraVista – 3,2×4,5×1,2 мм);
- более высокое, чем у полупроводниковых p-i-n-, КМОП- и GaAs-структур, соотношение коэффициентов потерь в разомкнутом (Iso) и замкнутом (IL) состояниях;
- практически нулевое потребление мощности после замыкания или размыкания за счёт использования электростатических сил (ток удержания – единицы наноампер);
- высокая устойчивость к дестабилизирующим факторам окружающей среды благодаря монтажу в герметичные вакуумированные керамические корпуса;
- более высокий, по сравнению с полупроводниковыми твердотельными ключами, уровень допустимой СВЧ-мощности (до 30 Вт для ключей фирмы WiSpry), высокое пробивное напряжение (до 2 кВ) и линейная вольт-амперная характеристика;
- меньшее на три порядка время коммутации в сравнении с электромеханическими коммутаторами типа EMR;
- низкая стоимость MEMS-конструкции.

Основной **недостаток** – значительно более низкое, в сравнении с полупроводниковыми ключами, быстродействие (время переключения менее 100 мкс), которое к тому же зависит от того, размыкается или замыкается контакт. Кроме того, для электростатического управления ключом необходимо формировать импульс переключающего напряжения $V_{упр}$ с размахом 40–120 В.

Рассмотрим некоторые типы представленных на рынке MEMS-ключей. Фирма WiSpry поставляет SP2T-переключатель модели WSS0112H, который может находиться в трех состояниях: вывод RF соединён с выводами RF1, RF2 или разомкнут. Переключатель WSS0114H может находиться в четырех состояниях, соединяя вывод RF с одним из четырех выводов RF1–RF4. Допустимая СВЧ-мощность этих моделей составляет 10 Вт, ток удержания не превосходит 2 мкА, диапазон рабочих температур – -45...85°C, а ёмкость на входе управления – 1 пФ.

Переключатель типа TT712-68CSP на два состояния компании TeraVista Technologies – разработчика и производителя MEMS-к-

Таблица 3. Параметры микромеханических MEMS-коммутаторов

Серия или модель (сайт)	Особенность	Диапазон частот, ГГц	IL/Iso на частоте 1 ГГц, дБ	RL на частоте 1 ГГц, дБ	$\tau_{вкл}/\tau_{выкл}$, мкс	$V_{упр}$, В	Ресурс, млн. циклов	Размер, мм
WSS0112H (www.wispry.com)	SPDT	0–6	0,2/45	-20	10/50	30	10^3	4×4×1
WSS0112H (www.wispry.com)	SP4T	0–6	0,2/50	-20	10/50	30	10^3	4×4×1
TT712-68CSP (www.teravista.com)	SPDT	0–7	0,1/35	-20	10/70	68	10^2	3,2×4,5×1,2
ML06 (www.magfusion.com)	SPDT	0–6	0,1/45	-20	50/50	5	10	5,9×5,9×2,8
RMSW200 (www.radantmems.com)	SPST	0–40	0,2/25	-20	3/5	±40	10^4	1,5×1,5×0,06
RMSW100 (www.radantmems.com)	SPST	0–12	0,1/30	-35	3/5	±40	10^4	1,5×1,5×0,06
RMSW220D (www.radantmems.com)	SPDT	0–12	0,3/32	-20	5/5	100	10^4	1,5×1,5×0,06

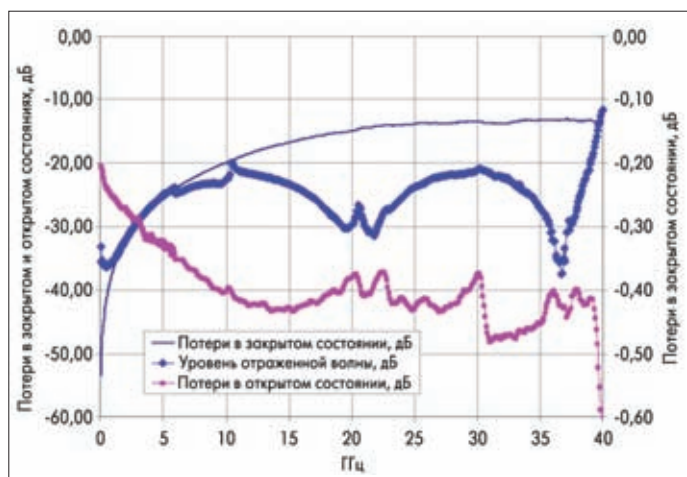


Рис. 12. Частотные характеристики потерь в открытом состоянии I_L , в закрытом состоянии I_{so} и уровень отражённой волны RL для MEMS-ключа RMSW200 на полосе частот 0–40 ГГц

чей — характеризуется чрезвычайно низкими значениями потерь в линии и потребляемой мощности цепи питания по постоянному току в режиме удержания — 3 мВт (при напряжении 3 В). Ключ, смонтированный в малогабаритном корпусе CSP-12 (3,25x4,5x1,25 мм), предназначен для применения в автоматическом тестовом оборудовании, контрольно-измерительной аппаратуре и других системах, где важное значение имеют такие характеристики, как малые потери, высокие линейность и изоляция.

Ключ ML06 компании Magfusion содержит консоль, встроенную планарную катушку, постоянный магнит и необходимые электрические контакты. В нём используется магнитное управление положени-

ем замыкающего контакта, благодаря чему напряжение питания снижено до 10 В при токе 10 мА. Размер этой микросхемы на диапазон частот 0–6 ГГц в бескорпусном исполнении 2x1,8 мм.

Ключи фирмы Radant работают при повышенном до 100 В напряжении цепи электростатического управления, время переключения их не превышает 5 мкс, а модель RMSW220D не только обеспечивает коммутацию типа SPDT, но и позволяет коммутировать сигналы с рабочей частотой до 40 ГГц (рис. 12). Дополнительно можно отметить следующие характеристики этой серии: сопротивление разомкнутого контакта не менее 1 ГОм; увеличенный ресурс работы до 10^{10} циклов в режиме холодных испытаний и до 10^9 циклов при предельной СВЧ-мощности 10 Вт; интервал рабочих температур $-40...80^\circ\text{C}$. Фирма Radant производит по заказу и другие варианты СВЧ-коммутаторов: SP4T, SP4T, шунты (замыкатели) линии передачи, кольцевые переключатели для частот 0–40 ГГц.

Твердотельные коммутаторы СВЧ-сигналов применяются для создания согласованных сверхширокополосных аттенуаторов с цифровым управлением, линий задержки, управляемых кодом, реконфигурируемых антенн, фильтров, генераторов сигналов, антенных переключателей. Основная тенденция развития цифровых систем связи — повышение скорости передачи информации за счёт использования сигналов с новыми видами манипуляции параметрами — требует применения управляемых цифровыми сигналами модуляторов СВЧ-колебаний со сверхмалым временем переключения.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.dowkey.com. Сайт фирмы Dow-Key Microwave Corp.
2. www.radiocomp.ru. Сайт ООО "Радиокомп".
3. Santos, De Los, H. RF MEMS Circuit Design for Wireless Communications: Artech House, 2002. — 250 p.