

Ферритовые переключатели

Часть 2

В. Геворкян, к. т. н.¹, В. Кочемасов, к. т. н.²

УДК 621.389 | ВАК 05.27.01

В первой части статьи, опубликованной в шестом номере журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2020 год, было рассказано о принципах построения и вариантах конструкций ферритовых переключателей. В данном номере рассматриваются различные модели таких устройств, выпускаемые разными производителями.

ПРОИЗВОДИТЕЛИ ФЕРРИТОВЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

На рынке предложений разных фирм переключатели сопутствуют ферритовым фазовращателям, так как последние являются их основой. По принципу построения эти устройства повторяют рассмотренные в предыдущем разделе, отличаясь в деталях, о чем свидетельствуют приведенные ниже типы переключателей различных производителей. При этом различия конкретных устройств связаны с особенностями аппаратуры определенного функционального назначения, в комплектацию которой они входят.

Компания Microwave Applications Group (MAG) – основана в 1969 году – позиционирует себя лидером в разработке и поставке ферритовых фазовращателей и устройств с их применением, выполняемых по правительственным, военным и коммерческим заказам. Называется цифра общей поставки на рынок 130 тыс. ферритовых изделий. Фирма рекламирует [2] линейку переключателей.

Внешний вид ряда моделей переключателей каналов в трактах большого уровня мощности различного функционального назначения приведен на рис. 8, а их характеристики сведены в табл. 1. Устройства построены с применением принципов, изложенных в предыдущем разделе. Так, на рис. 8д приведен внешний вид взаимного переключателя входного канала на три выходных канала, работающего в X-диапазоне и предназначенного для использования в радаре. В устройстве входной сигнал разделяется на два канала с использованием двойного тройника в H-плоскости. Сигнал каждого канала проходит через два включенных каскадно волноводных отрезка, каждый с фиксированным сдвигом поляризации на $+45^\circ$ или -45° . В результате, на выходе получается сигнал с поляризацией -90° , 0 или $+90^\circ$. Селекция выходного канала обеспечивается совпадением поляризации сигнала с допустимой поляризацией волноводного

канала. Итак, принцип селекции повторяет описанный для устройства, показанного на рис. 1.

Принципы построения остальных переключателей, приведенных на рис. 8, также соответствуют известным техническим решениям. На рис. 8г показан специализированный DPDT (дуплексный вход и два выходных канала) переключатель X-диапазона для систем военного назначения, представляющий собой четырехполюсник с высокой развязкой каналов. Изделие обеспечивает работу двух селективных выходных антенных портов (азимута и угла места).



Рис. 8. Модели переключателей каналов в трактах большого уровня мощности фирмы MAG: а – базовая модель SPDT-переключателя каналов для прецизионного радара; б – взаимный SPDT-переключатель каналов самолетного радара; в – SPDT-переключатель комплектации метеорологического радара; г – специализированный DPDT-переключатель обзорных РЛС ВМФ США; д – SP3T-переключатель для радаров; е – взаимный SPDT-переключатель каналов малых размеров (156,9×58,4×72,1 мм) и массы (726 г) на основе каскадного соединения секций ферритовых поляризаторов; ж – DPDT-переключатель каналов на базе циркулятора; з – компактный (размеры – 163×178×60 мм, масса – 1800 г) переключатель с высокой развязкой каналов

¹ НИУ «МЭИ», профессор.

² ООО «Радиокомп», генеральный директор.

Таблица 1. Характеристики ферритовых переключателей фирмы Microwave Applications Group (MAG)

Тип, иллюстрация	Название диапозона	Пиковая мощность в тракте, кВт	Средняя мощность, Вт	Обратные потери, макс., дБ	Развязка между каналами, мин., дБ	Вносимые потери, дБ	Время переключения каналов, меньше, мкс	Частота переключения, кГц	Диапазон рабочих температур, °С	Полоса рабочих частот, %*****
SPDT*, рис. 8а	X	50	150	17	25	0,5	50	4	-29...49	2
SPDT, рис. 8б	X	10	550	19,09	30	0,75	20	2,5	-55...55	11
SPDT, рис. 8в	C	300	300	20	30	0,6	50	1,5	-40...50	4
DPDT**, рис. 8г	X	200	Н/д	20	58	1,5	50	1,2	-15...55	4
SP3T***, рис. 8д	X	25	250	15	20	1	50	1,2	-40...71	10
SPDT, рис. 8е	X	50	100	17,7	25	0,5	25	2	-30...60	12
DPDT, рис. 8ж	X	75	400	17,7	25	0,85	35	4	-45...85	9
DP3T****, рис. 8з	X	50	200	16	25	1,2	25	Н/д	-30...60	9

* SPDT – Single Pole, Double Throw – один порт, который может быть подключен к одному из двух других портов;

** DPDT – Double Pole, Double Throw – два порта, которые могут быть подключены каждый к одному из двух других портов;

*** SP3T – Single Pole, Three Throw – один порт, который может быть подключен к одному из трех других портов;

**** DP3T – Double Pole, Three Throw – два порта, которые могут быть подключены к одному из трех других портов;

***** Здесь и в других таблицах полоса рабочих частот соответствует части диапазона частот, в которой функционирует устройство.

На рис. 8ж представлен переключатель на базе циркулятора, образованный двумя взаимными элементами, формирующими невзаимное устройство.

Отдельно рекламируется переключатель рис. 8з, позиционируемый как миниатюрное устройство, хотя его принцип построения не отличается оригинальностью.

Кроме того, среди рекламных предложений компании MAG есть краткая информация о двух устройствах,

перестраиваемых постоянным током (рис. 9), и переключателе поляризации, работающем в L-диапазоне (рис. 10).

Фирма Ferrite Domen Co. [3] (Санкт-Петербург) с 1959 года является ведущим предприятием СССР, а затем и России по разработке и созданию ферритовых устройств различного функционального назначения, в том числе и ферритовых переключателей.

Компания предлагает линейку волноводных ферритовых переключателей на основе Y-циркуляторов в диапазоне частот от 3 до 40 ГГц (рис. 11, табл. 2) со временем

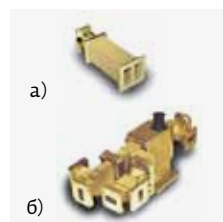


Рис. 9. Переключатели компании MAG, управляемые постоянным током: а - SPDT-переключатель каналов С-диапазона; б - DP4T-переключатель каналов X-диапазона на базе циркуляторов



Рис. 10. Мощный переключатель поляризации с вертикальной линейной на круговую правую и обратно в L-диапазоне (компания MAG)



Рис. 11. Внешний вид волноводных ферритовых переключателей на основе циркуляторов в диапазоне частот от 3 до 40 ГГц компании Ferrite Domen Co.

Таблица 2. Номенклатура переключателей фирмы Ferrite Domen Co.

Тип устройства	Диапазон рабочих частот, ГГц
Узкополосный переключаемый Y-циркулятор	8,2-40
Переключатель широкого применения	7,05-26,5
Криогенный (при температуре 20 °С) переключаемый Y-циркулятор	8,2-40
Различные ферритовые переключатели для космического применения	3,4-9

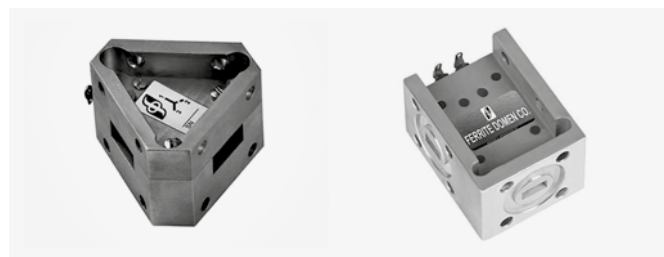


Рис. 12. Внешний вид волноводных ферритовых переключателей фирмы Ferrite Domen Co. в диапазоне частот от 8,2 до 40 ГГц

переключения от 1,5 мкс. Изделия отличаются простой конфигурацией, низкими вносимыми потерями, высокой развязкой каналов, широкими частотным диапазоном и диапазоном рабочих температур.

На рис. 12 представлен внешний вид узкополосных переключателей для диапазона частот 8,2–40 ГГц, а в табл. 3 – параметры ряда моделей. Приведенные данные соответствуют граничным значениям параметров в температурном диапазоне от 0 до 50 °С.

Внешний вид переключателей широкого применения для частот от 7,05 до 26,5 ГГц показан на рис. 13,



Рис. 13. Внешний вид волноводных ферритовых переключателей фирмы Ferrite Domen Co. широкого применения в диапазоне частот от 7,05 до 26,5 ГГц



Рис. 14. Охлаждаемый до температуры 20 °С переключаемый Y-циркулятор фирмы Ferrite Domen Co.

Таблица 3. Параметры дискретных переключателей диапазона частот от 8,2 до 40 ГГц фирмы FERRITE DOMEN Co.

Модель	Диапазон частот, ГГц	Полоса рабочих частот, %	Вносимые потери, (макс./мин.), дБ	Развязка между каналами (тип./мин.), дБ	КСВН, тип./макс.	Мощность, Вт	Время переключения, мкс	Энергия переключения, мкДж
4SWS[8-12]-1	8,2-12,4	5	0,2/0,25	30/25	1,1/1,15	5	2	200
4SWS[8-12]-3	8,2-12,4	15	0,2/0,25	23/20	1,19/1,22	5	2	200
4SWS[8-12]-6	8,2-12,4	15	0,3/0,35	20/18	1,22/1,3	100	2	200
4SWS[12-18]-1	12,4-18	5	0,2/0,25	30/25	1,1/1,15	20	2	180
4SWS[12-18]-2	12,4-18	10	0,2/0,25	25/20	1,15/1,22	20	2	180
4SWS[12-18]-3	12,4-18	15	0,25/0,3	20/18	1,22/1,3	20	2	180
4SWS[18-26]-1	18-26,5	5	0,2/0,25	25/20	1,15/1,22	20	2	180
4SWS[18-26]-2	18-26,5	10	0,25/0,3	20/18	1,22/1,3	3	2	180
4SWS[26-40]-1	26,5-40	5	0,2/0,25	20/18	1,2/1,35	1	1,5	150
4SWS[26-40]-2	26,5-40	5	0,4/0,5	20/18	1,25/1,35	20	1,5	150
4SWS[26-40]-3	26,5-40	10	0,4/0,5	20/18	1,25/1,35	1	1,5	150

а параметры ряда моделей в диапазоне рабочих температур от -60 до 85 °С сведены в табл. 4. Внешний вид и параметры переключаемого циркулятора с охлаждением до температуры 20 °С приведены на рис. 14 и в табл. 5 соответственно.

На рис. 15 приведены примеры переключаемых Y-циркуляторов, а в табл. 6 – параметры таких изделий. Устройства характеризуются ослаблением уровня внешних помех на 60 дБ, скоростью переключения 100 мс и частотой коммутации не более трех раз в час. Данные переключатели могут функционировать в широком диапазоне температур окружающей

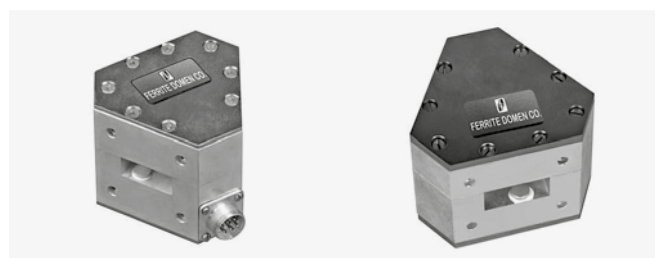


Рис. 15. Различные ферритовые переключатели для космического применения в диапазоне частот от $3,4$ до 9 ГГц фирмы Ferrite Domet Co.

Таблица 4. Параметры переключателей диапазона частот от $7,05$ до $26,5$ ГГц фирмы Ferrite Domet Co.

Модель	Диапазон частот, ГГц	Полоса рабочих частот, %	Вносимые потери, (макс./мин.), дБ	Развязка между каналами (тип./мин.), дБ	КСВН, тип./макс.	Мощность, Вт	Время переключения, мкс	Энергия переключения, мкДж
4SWY[7-10]-1	7,05-10	10	0,2/0,25	25/20	1,13/1,22	150	5	27/4
4SWY[7-10]-2	7,05-10	15	0,25/0,3	23/18	1,18/1,3	150	5	27/4
4SWY[7-10]-3	7,05-10	20	0,3/0,35	20/18	1,22/1,3	150	5	27/4
4SWY[8-12]-1	8,2-12,4	10	0,2/0,25	25/20	1,13/1,22	30	2,5	27/4
4SWY[8-12]-2	8,2-12,4	15	0,25/0,3	23/18	1,18/1,3	30	2,5	27/4
4SWY[8-12]-3	8,2-12,4	20	0,3/0,35	20/18	1,22/1,3	30	2,5	27/4
4SWY[10-15]-1	10-15	10	0,2/0,25	30/25	1,09/1,13	100	2,5	27/3
4SWY[10-15]-2	10-15	15	0,25/0,3	25/20	1,13/1,2	100	2,5	27/3
4SWY[10-15]-3	10-15	20	0,3/0,35	23/20	1,13/1,22	100	2,5	27/3
4SWY[18-26]-1	18,0-26,5	10	0,2/0,25	30/25	1,09/1,13	100	2,5	27/3
4SWY[18-26]-2	18,0-26,5	15	0,25/0,3	25/20	1,13/1,2	100	2,5	27/3
4SWY[18-26]-3	18,0-26,5	20	0,3/0,35	23/20	1,13/1,22	100	2,5	27/3

Таблица 5. Параметры криогенных переключателей диапазона частот от $8,2$ до 40 ГГц фирмы Ferrite Domet Co.

Модель	Диапазон частот, ГГц	Полоса рабочих частот, %	Вносимые потери, дБ	Развязка между каналами, дБ	КСВН, макс.	Мощность, Вт	Время переключения, мкс	Энергия переключения, мкДж
4SWC[8-12]-1	8,2-12,4	5	0,15	25	1,15	0,2	2	200
4SWC[8-12]-2	8,2-12,4	10	0,2	20	1,22	0,2	2	200
4SWC[12-18]-1	12,4-18,0	5	0,2	25	1,15	0,2	2	180
4SWC[12-18]-2	12,4-18,0	10	0,2	20	1,22	0,2	2	180
4SWC[18-26]-1	18,0-26,5	5	0,2	25	1,15	0,2	2	180
4SWC[18-26]-2	18,0-26,5	10	0,2	20	1,22	0,2	2	180
4SWC[26-40]-1	26,5-40	5	0,2	20	1,2	0,2	1,5	150
4SWC[26-40]-2	26,5-40	10	0,4	20	1,25	0,2	1,5	150

среды (от -60 до 90 °С), при низкочастотной гармонической вибрации до 30 г и механических ударных воздействиях до 500 г.

Переключателей с более сложной системой коммутации каналов, например аналогичных MAG, в рекламных предложениях фирмы Ferrite Domen Co. нет.

Еще один производитель ферритовых переключателей – компания CERNEX, Inc. [4]. Параметры переключателей этой фирмы серии CZS приведены в табл. 7. Данные устройства построены на основе вращения плоскости поляризации волны TE_{11} в волноводе круглого поперечного сечения.

Серию поляризационных переключателей, предлагаемых компанией Millimeter Wave Products (Mi-Wave) [5], иллюстрируют рис. 16 и табл. 8.

Анализ истории развития рынка предложений ферритовых переключателей и, соответственно, производителей таких устройств показывает, что число последних со временем сократилось и в настоящее время ограничивается несколькими крупными фирмами (например, отмеченные выше MAG и Ferrite Domen Co.). Тем не менее, в недавнем прошлом (лет пять назад) на рынке существовали предложения и других производителей, причем продукция этих фирм и в настоящее

Таблица 6. Различные ферритовые переключатели для космического применения в диапазоне от 3,4 до 9 ГГц фирмы Ferrite Domen Co.

Модель	Диапазон частот, ГГц	Полоса рабочих частот, %	Вносимые потери, (макс.), дБ	Развязка между каналами (мин.), дБ	КСВН, макс.	Передаваемая мощность, Вт	Отраженная мощность, Вт
3SWY36-1	3,4–3,9	14	0,2	25	1,2	100	10
3SWY[6,0-8,0]-1	6,85–8,2	10	0,4	23	1,25	1	0,1
3SWS[7-10]-1	7,0–10,0	8	0,2	25	1,2	90	9
3SWS[7-10]-1	7,0–10,0	7	0,3	25	1,2	1	0,1
3SWS76-1	7,4–7,7	4	0,2	25	1,2	120	12
3SWS80-1	8,025–8,4	5	0,2	20	1,2	20	2
3SWS80-1	8,028–9,0	11,5	3,0	20	1,5	20	2

Таблица 7. Параметры ферритовых переключателей компании CERNEX, Inc., работающих в различных диапазонах

Параметры	Ka	Q	U	V	E	W	F
Тип волновода	WR-28	WR-22	WR-19	WR-15	WR-12	WR-10	WR-8
Диапазон частот, ГГц	26,5–40	33–50	40–60	50–75	60–90	75–110	90–140
Вносимые потери в полосе 1%, дБ	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	1,0
Коэффициент кроссполяризации, дБ	20	20	20	20	20	20	20
КСВН (макс.)	1,25	1,25	1,25	1,25	1,30	1,30	1,30
Допустимая средняя мощность, Вт	12,0	8,0	3,0	3,0	2,0	1,5	1,0
Пиковая мощность, кВт	4,0	2,5	1,0	1,0	0,7	0,5	0,3
Полоса рабочих частот, ГГц	2	2	2	3	3	3	3
Сопrotивление обмотки управления, Ом	12	12	12	5	5	5	3
Индуктивность обмотки управления, мГн	4	4	4	2	2	2	1,5
Скорость переключения, мкс	5–10	5–10	5–10	2–5	2–5	2–5	2–5
Ток управления, мА	0–250						

время продолжает наполнять рынок, даже под маркой уже не существующих фирм, которые вошли в состав других компаний или холдингов.

Укажем на такие фирмы. Одна из них – THALES MESL Ltd. (позднее MESL Microwave). Пример ее продукции иллюстрирует рис. 17. На нем показан внешний вид переключателя фазовых сдвигов Ka-диапазона с параметрами: пиковая мощность в тракте – 1,4 МВт, средняя мощность – 150 Вт, развязка каналов в полосе 5% – 30 дБ, вносимые потери – 0,6 дБ, время переключения каналов – 2 мкс. Фиксированные фазовые сдвиги в устройстве реализуют ферритовые фазовращатели.

Ряд моделей переключателей фирмы THALES MESL Ltd. был построен на основе невзаимного тороидального SPDT-переключателя. На рис. 18 приведена функциональная схема построения такого переключателя. Его типичные параметры: центральная частота – 35 ГГц; полоса рабочих частот – 10% от центральной частоты; пиковая мощность в тракте – 1,4 кВт; средняя мощность – 120 Вт; КСВН (макс.) – 1,25; развязка между каналами (мин.) – 25 дБ; вносимые потери (макс.) – 0,6 дБ; время переключения каналов – меньше 2 мкс; частота (скорость) переключения – 5 кГц; температурный диапазон – от –30 до 80 °С; волноводный тракт – WR28; интерфейс – TTL; мощность цепи управления – +15 В, 100 мА и –15 В, 20 мА.

Ферритовые переключатели компании COM DEV International – специальные функциональные устройства различной конфигурации на основе ферритовых циркуляторов. На рис. 19 представлены тороидальные переключатели С-диапазона, параметры которых приведены в табл. 9. На рис. 20 показан вид двух переключателей



Рис. 16. Поляризационные переключатели серии 145 фирмы Mi-Wave



Рис. 17. SPDT-переключатель дифференциальных фазовых сдвигов Ka-диапазона фирмы THALES MESL Ltd.

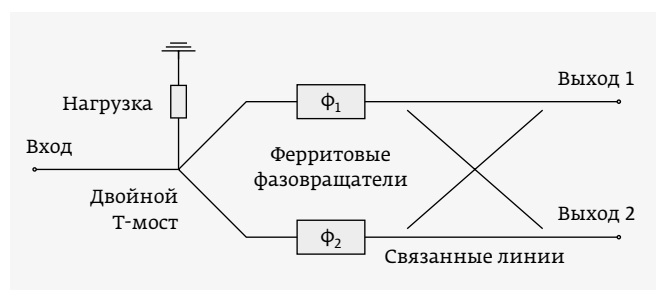


Рис. 18. Схема построения невзаимного тороидального SPDT-переключателя Ka-диапазона фирмы THALES MESL Ltd.

Таблица 8. Параметры поляризационных переключателей серии 145 фирмы Mi-Wave

Параметры	145A	145B	145U	145V	145E	145W	145F
Диапазон частот, ГГц	26,5–40	33–50	40–60	50–70	60–90	75–110	90–140
Вносимые потери в полосе 1%, дБ	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Коэффициент кроссполяризации, дБ	20	20	20	20	20	20	20
КСВН (макс.)	1,25	1,25	1,25	1,25	1,30	1,30	1,30
Средняя мощность, Вт	12,0	8,0	3,0	3,0	2,0	1,5	1,0
Пиковая мощность, кВт	4,0	2,5	1,0	1,0	0,7	0,5	0,3
Ширина полосы, ГГц	2	2	2	3	3	3	3
Сопротивление обмотки, Ом	12	12	12	5	5	5	3
Индуктивность обмотки, мГн	4	4	4	2	2	2	1,5
Скорость переключения, мкс	5–10	5–10	5–10	2–5	2–5	2–5	2–5
Ток управления, мА	0–250						



Рис. 19. Торoidalные переключатели каналов С-диапазона фирмы COM DEV International: а - SP2Т; б - SP4Т



Рис. 20. Ферритовые переключатели фирмы COM DEV International: а - SP3Т-переключатель каналов Х-диапазона; б - SP3Т-переключатель каналов Ка-диапазона на базе пяти переключаемых циркуляторов



Рис. 21. Комбинация переключателей на основе Y-циркуляторов с применением цифровых систем управления. Время переключения каналов - <math>< 2 \mu\text{s}</math>, частота коммутации - 6 кГц

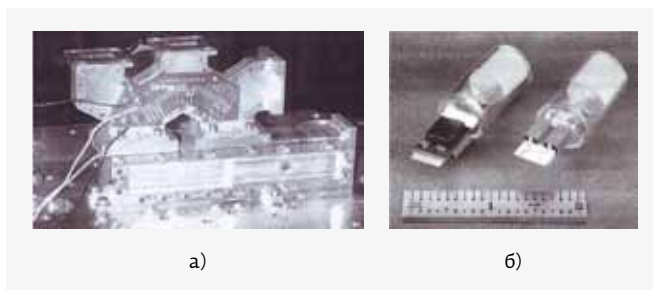


Рис. 22. Устройства компании EMS Technologies: а - трехканальный переключатель для антенных систем геостационарных спутников; б - комплектация переключателя на основе поляризационного фазовращателя в Х-диапазоне (вид без металлизации стенок корпуса)

Таблица 9. Характеристики ферритовых переключателей различных типов фирмы COM DEV International

Характеристики	SP2Т*	SP4Т	SP3Т**	SP3Т
Функциональное назначение, структурные особенности	Торoidalный переключатель	Взаимный переключатель	Переключатель каналов	Переключатель каналов
Иллюстрация	Рис. 19а	Рис. 19б	Рис. 20а	Рис. 20б
Диапазон частот, ГГц или название диапазона	5-6,5	С	Х	Ка
Пиковая мощность в тракте, кВт	50	1,4	300	1
Средняя мощность, Вт	1500	150	300	30
КСВН, макс.	1,2***	Н/д	Н/д	Н/д
Обратные потери, макс., дБ	Н/д	Н/д	23	Н/д
Развязка между каналами, мин., дБ	20	30	23	20
Вносимые потери, дБ	0,3	0,6	1	0,3
Время переключения каналов, меньше, мкс	2	2	50	Н/д
Частота (скорость) переключения, кГц	6	Н/д	1,5	Н/д
Температурный диапазон, °С	-40...50	Н/д	-30...70	Н/д
Полоса рабочих частот, %	Н/д	5	7	Н/д

* Питание: ± 15 В, 200 мА; +5 В, 0,5 А; волновод - WR-187; масса - 9 кг.

** Драйвер - RS-485; волновод - WG-16 / WR-90.

*** По всем портам.

Таблица 10. Характеристики ферритовых переключателей различных типов фирмы EMS Technologies

Характеристики	SP3T*	SP2T**
Иллюстрация	Рис. 22а	Рис. 22б
Диапазон частот, ГГц	19,95	8...10
Пиковая мощность в тракте, кВт	Н/д	300
Средняя мощность, Вт	135	20
КСВН, макс.	1,2	Н/д
Обратные потери, макс., дБ	25	20
Развязка между каналами, мин., дБ	40	Н/д
Вносимые потери, дБ	0,25	0,6
Время переключения каналов, меньше, мкс	0,35	1
Частота (скорость) переключения, кГц	14	Н/д
Полоса рабочих частот, %	2,5	5

* Волновод – WR-51.

** Энергия переключения – 15 мкДж; размеры – 12,5 × 5 × 12,5 мм; масса – 2 г.

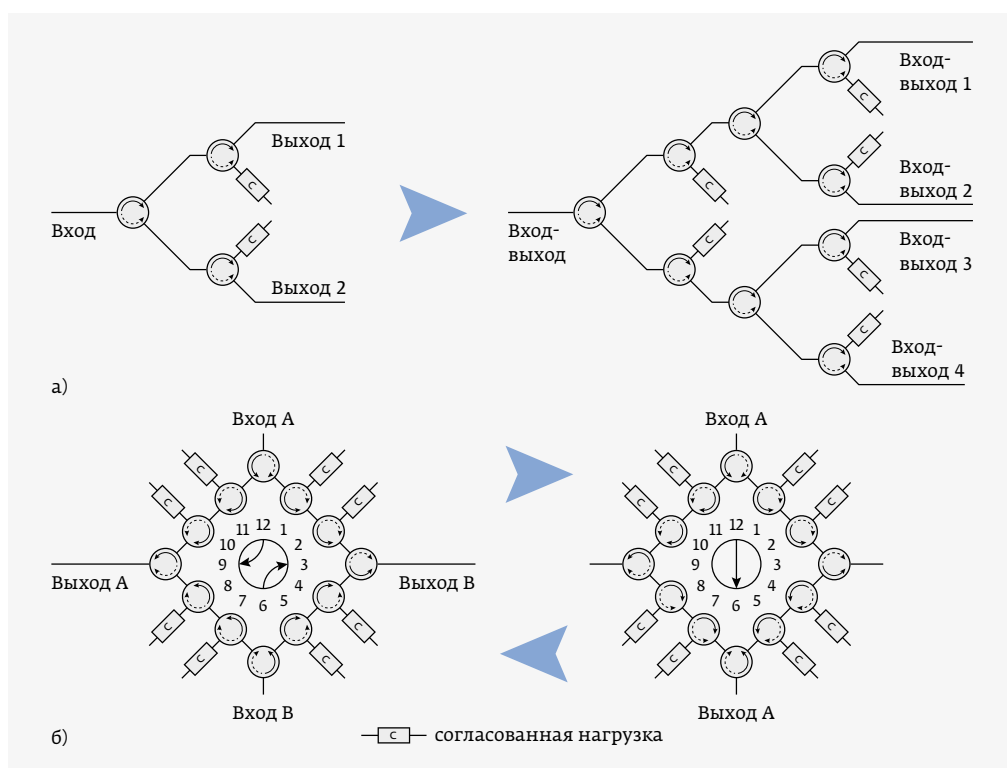
типа SP3T фирмы COM DEV International, характеристики которых также представлены в табл. 9. Рис. 21 демонстрирует внешний вид переключателей этой компании с цепями управления.

Компания EMS Technologies разработала широкий набор устройств и комплектующих для систем и сетей спутниковой и наземной связи, в частности, ряд устройств, включающих ферритовые переключатели и узлы управления ими. На рис. 22а изображен трехканальный переключатель на базе Y-циркуляторов, а на рис. 22б – фрагменты комплектации поляризационного ферритового переключателя,

Таблица 11. Параметры переключателя на базе трех циркуляторов фирмы EMS Technologies

Параметры	Типичные значения
Диапазон частот, ГГц	29,5-30
Вносимые потери, дБ	0,15
Развязка каналов, дБ	40
Отражение по входу, дБ	25
Отражение по выходу, дБ	25
Диапазон рабочих температур, °С	0-75
Масса, г	19

предназначенного для построения фазированных антенных решеток. Параметры этих устройств приведены в табл. 10. Ряд переключателей компании EMS Technologies выполнен на базе матриц Y-циркуляторов, построенных по схемам, показанным на рис. 23, аналогичным известным схемам построения, представленным на рис. 7 (а и б). Особенности

**Рис. 23.** Блок-схемы переключателей компании EMS Technologies, построенных на базе Y-циркуляторов: а – линейный вариант; б – кольцевое включение

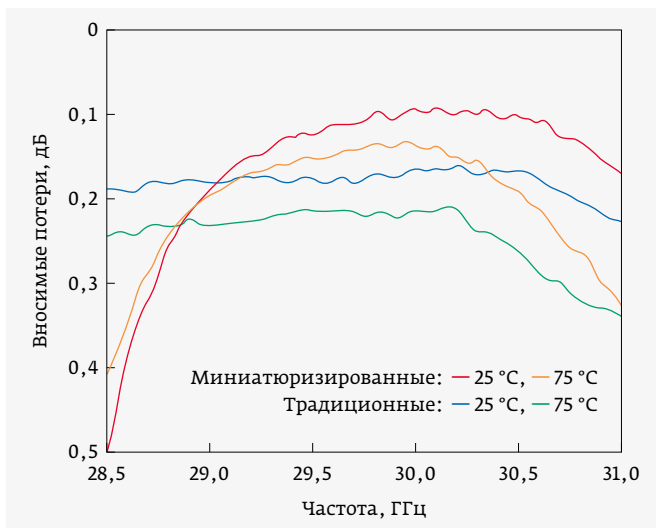


Рис. 24. Частотные зависимости вносимых потерь при различных температурах окружающей среды в варианте традиционной компоновки переключателя на основе трех циркуляторов и в варианте миниатюризированной сборки

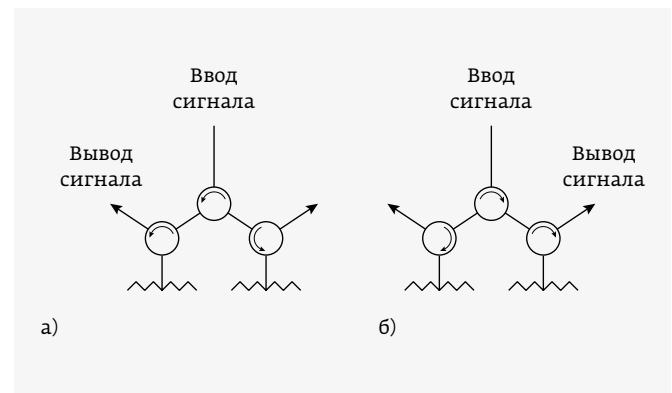


Рис. 25. Блок-схемы переключателей фазы компании EMS Technologies для спутниковой системы слежения и ретрансляции данных, построенные на базе Y-циркуляторов: а – состояние системы до переключения; б – состояние системы после переключения

переключателей фирмы EMS Technologies в сравнении с традиционными сборками циркуляторов – меньшие размеры и более высокие электрические

Таблица 12. Параметры переключателей на основе Y-циркуляторов фирмы DORADO. Рабочий диапазон температур от 0 до 50 °С. Время коммутации 2 мкс

Модель	Диапазон частот, ГГц	Полоса рабочих частот, %	Вносимые потери, дБ	Развязка каналов, дБ	КСВН, макс.	Допустимая средняя мощность, Вт	Волновод
4SWS10-1	8,2-12,4	5	0,25	25	1,35	5	WR-90
4SWS10-2	8,2-12,4	10	0,25	20	1,35	5	WR-90
4SWS10-3	8,2-12,4	15	0,25	20	1,35	5	WR-90
4SWS10-4	8,2-12,4	5	0,30	20	1,30	100	WR-90
4SWS10-5	8,2-12,4	10	0,35	20	1,35	100	WR-90
4SWS10-6	8,2-12,4	15	0,35	18	1,35	100	WR-90
4SWS15-1	12,4-18,0	5	0,25	25	1,35	20	WR-90
4SWS15-2	12,4-18,0	10	0,25	20	1,35	20	WR-62
4SWS15-3	12,4-18,0	15	0,30	18	1,35	20	WR-62
4SWS22-1	18,0-26,5	5	0,25	20	1,30	3	WR-42
4SWS22-2	18,0-26,5	10	0,30	18	1,35	3	WR-42
4SWS22-3	18,0-26,5	15	0,35	18	1,35	3	WR-42
4SWS33-1	26,5-40,0	5	0,25	18	1,35	1	WR-28
4SWS33-2	26,5-40,0	5	0,50	18	1,35	20	WR-28
4SWS33-3	26,5-40,0	10	0,50	18	1,35	1	WR-28

Примечание: Системы питания всех устройств имеют напряжение 20 В и ток 7 А.

характеристики, что достигается особенностью соединения циркуляторов. При этом применение каскадного включения интересно тем, что обеспечивает большие развязки между портами переключателя.

В табл. 11 приведены характеристики переключателя на основе миниатюризированной сборки циркуляторов, на рис. 24 показаны для сравнения температурные характеристики миниатюризированных сборок и традиционных компоновок из каскадного соединения циркуляторов. Из рис. 24 следует, что традиционные переключатели при нескольких больших потерях обладают более широкой полосой.

Пример реализации переключателя сдвига фаз для спутниковой системы слежения и ретрансляции данных (Tracking and Data Relay Satellite System – TDRS) на основе Y-циркуляторов приведен на рис. 25.

Завершая обзор, отметим, что наряду с расширением частотного диапазона применения ферритовых переключателей в область высоких частот появляются новые сообщения различных, как правило, непрофильных фирм о создании ферритовых устройств (например, [6] (см. табл. 12), [7], [8]) и новые публикации с предложениями технических решений построения ферритовых переключателей [9, 10]. Анализ этих источников показывает, что предлагаемые технические решения отличает от описанных в монографии [1] лишь только применение современных материалов и технологий для реализации известных принципов построения ферритовых переключателей.

* * *

В заключение можно сказать, что принципы построения ферритовых переключателей, за полвека развития СВЧ-техники сложившиеся в законченную теоретическую базу, лежат в основе современных ферритовых устройств данного типа. Конкретные реализации этих устройств, представленные на рынке рядом ведущих производителей данной элементной базы,

демонстрируют многообразие их возможного рационального применения.

В последние десятилетия основной интерес для внедрения ферритовых переключателей представляют антенные решетки, где ниша, занимаемая переключателями, ограничена коммутацией фазовых сдвигов. Это определило основное движение конструкторской мысли по совершенствованию переключателей, направленное на стремление миниатюризировать эту элементную базу (включая цепи управления), причем без ухудшения электрических параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Микаэлян А. Л.** Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 663 с.
2. Microwave Applications Group (MAG). – Интернет-ресурс www.magsmx.com
3. Ferrite Domet Co. – Интернет-ресурс www.ferrite-domet.com
4. CERNEX, Inc. – Интернет ресурс www.cernex.com
5. Millimeter Wave Products. – Интернет ресурс <http://www.miww.com/>
6. DORADO. – Интернет ресурс <http://www.dorado-intl.com/>
7. **Billings R., Edridge T.** Ferrite circulator switches and their applications. – Интернет ресурс <http://www.m2global.com/resources/ferrite-circulator-switches/>
8. **Billings R., Edridge T.** Ferrite circulator switches and their applications. – Microwave Journal, Nov. 2003.
9. **Boyd Ch. R.** High Power Reciprocal Ferrite Switches Using Latching Faraday Rotators. – IEEE S-MTT International Microwave Symposium Workshop: Issues in Ferrites and Dielectrics for High Power Applications. Philadelphia, PA, June, 2003.
10. **Kroening A. M.** Advance in Ferrite Redundancy Switching for Ka-band Receiver Application // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2016. V. 64. No. 6. PP. 1911–1917.

ВЧ/СВЧ радиокомпоненты и устройства на их основе

www.radiocomp.ru



РАЗРАБОТКА
ПРОИЗВОДСТВО
ИСПЫТАНИЯ
ПОСТАВКА

РАДИОКОМП

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО в модульном и блочном исполнении:

Устройства формирования и обработки сигналов, фильтры ВЧ/СВЧ и устройства на их основе



ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

алгоритмов обработки сигналов в радиотехнических системах

ИСПЫТАНИЯ

в широкой области аккредитации: сертификационные и периодические

ПОСТАВКА

радиокомпонентов и измерительного оборудования