

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СВЧ-ФАЗОВРАЩАТЕЛИ

ЧАСТЬ 1

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

УДК 621.389
ВАК 05.27.00

Фазовращатели – одни из наиболее востребованных в радиоэлектронике компонентов. Чаще всего они применяются в приеме-передающих модулях систем с фазированной антенной решеткой (ФАР), в предрискающих схемах линейаризованных усилителей, системах автоматизированного тестирования различного оборудования и др. [1]. О фазовращателях разных типов рассказывается в статье.

Твердотельными фазовращателями можно управлять цифровым или аналоговым способом. Фазовращатели являются цифровыми в том случае, когда фаза в них изменяется дискретно посредством переключения отдельных ячеек, сдвиг фазы в которых может принимать значения 180°, 90°, 45°, 22,5°, 11,25°, 5,625° и т.д. Подобные фазовращатели называются также цифровыми переключаемыми (digital switched phase shifters) или цифровыми ступенчатыми (digital step phase shifters). Однако чаще всего для таких устройств используют термин цифровой фазовращатель (digital phase shifter).

К аналоговым фазовращателям относятся устройства, в которых фазовый сдвиг под действием управляющего напряжения меняется непрерывно. Во многих случаях управление такими фазовращателями выполняют цифровым кодом, преобразуемым в аналоговый вид. В силу монотонной зависимости сдвига фаз от управляющего напряжения разрядность используемых цифро-аналоговых преобразователей может быть сколь угодно большой. На практике обычно ограничиваются 12-разрядными ЦАП. Фазовращатели этого типа можно отнести к классу цифро-аналоговых. В англоязычной литературе для них иногда используется термин Digitally controlled analog phase shifter или просто Digitally controlled phase shifter.

Фазовращатели – это линейные двухпортовые устройства, которые изменяют фазу входного сигнала

$U_{вх}(t) = U_{вх} \sin \omega t$ в соответствии с требуемым значением фазового сдвига Φ . Выходной сигнал реального фазовращателя $U_{вых}(t) = U_{вх} (1 + \alpha(\omega, \Phi)) \sin(\omega t + \Phi + \varphi(\omega, \Phi))$ отличается от входного не только требуемым сдвигом фазы Φ , но и вносимыми амплитудными $\alpha(\omega, \Phi)$ и фазовыми $\varphi(\omega, \Phi)$ искажениями. В технических характеристиках фазовращателей эти искажения представлены своими максимальными величинами $\alpha_{макс}$ и $\varphi_{макс}$, либо среднеквадратичными значениями $\alpha_{скз}$ и $\varphi_{скз}$.

Реализация фазосдвигающих цепей может быть достигнута многими способами. Три из них представлены на рис.1.

Фазовращатель отражательного типа (рис.1а), включающий квадратурный гибридный мост (КГМ), подключенный к емкостным нагрузкам, обеспечивает на своем выходе синфазное сложение отраженных от нагрузок сигналов, а на входе их противофазное суммирование. Теоретически достижимый фазовый сдвиг равен 180°. Однако в реальных схемах он обычно несколько меньше. При необходимости получения большего сдвига фаз используют каскадное включение таких фазовращателей.

Фазовращатели второго типа (рис.1б) основаны на переключении двух каналов, которые различаются длиной отрезков L_1 и L_2 линии передачи, а следовательно и фазовыми сдвигами Θ_{L_1} и Θ_{L_2} . Вносимый в этом случае фазовый сдвиг

$$\Phi(\omega_0) = \Theta_{L_2}(\omega_0) - \Theta_{L_1}(\omega_0) = \frac{\Delta L \cdot \omega_0}{c}$$

на частоте ω_0 зависит от разницы длин переключаемых линий передачи $\Delta L = L_2 - L_1$ и скорости света c . Линейная зависимость фазовых сдвигов Θ_{L_1} и Θ_{L_2} от частоты (рис.2а)

¹ ООО "Радиокомп", генеральный директор, vkochemasov@radiocomp.ru.

² ЗАО "МИКРО-ВИС", руководитель проектов, shadskij@mail.ru.

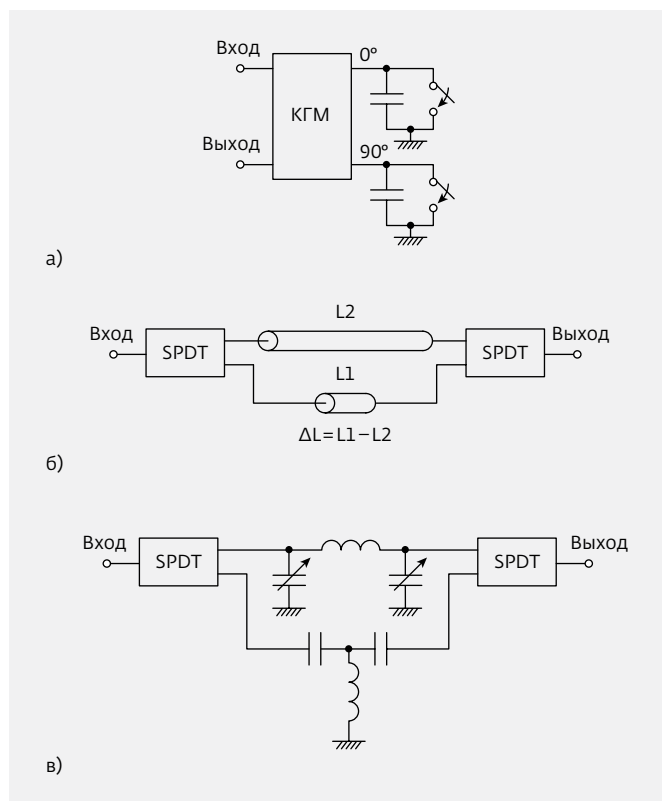


Рис.1. Примеры реализации фазосдвигающих цепей: а - отражательного типа; б - на переключаемых линиях задержки; в - на переключаемых фильтрах. SPDT - переключатель с одним входом и двумя выходами

означает, что подобный фазовращатель является элементом задержки (true time delay). Это обстоятельство иногда ограничивает его применение. Однако в ФАР использование подобных фазовращателей оказывается предпочтительным.

Снизить зависимость фазового сдвига от частоты можно при использовании в двух каналах фильтровых цепей (рис.1в), разность $\Phi = \Theta_{\text{фвч}}(\omega) - \Theta_{\text{фнч}}(\omega)$ фазочастотных характеристик которых в рабочей полосе частот остается примерно постоянной величиной (рис.2б).

Еще один способ получения необходимых фазовых сдвигов основан на использовании векторного модулятора, обеспечивающего независимое изменение амплитуды и фазы входного сигнала.

ЦИФРОВЫЕ ФАЗОВРАЩАТЕЛИ

Цифровые фазовращатели – важнейший элемент приемо-передающих модулей ФАР, к которым предъявляются жесткие требования по скорости переключения, точности обеспечения фазовых и амплитудных характеристик.

Цифровые фазовращатели (рис.3) включают в себя секции, обеспечивающие сдвиги фаз $180^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 22,5^\circ, \dots, 180^\circ/2^{n-1}$.

В зависимости от области применения количество секций может меняться от трех до восьми. В фазовращателях для ФАР их количество выбирается на компромиссной основе исходя из требований к вносимым потерям, размерам, стоимости и др.

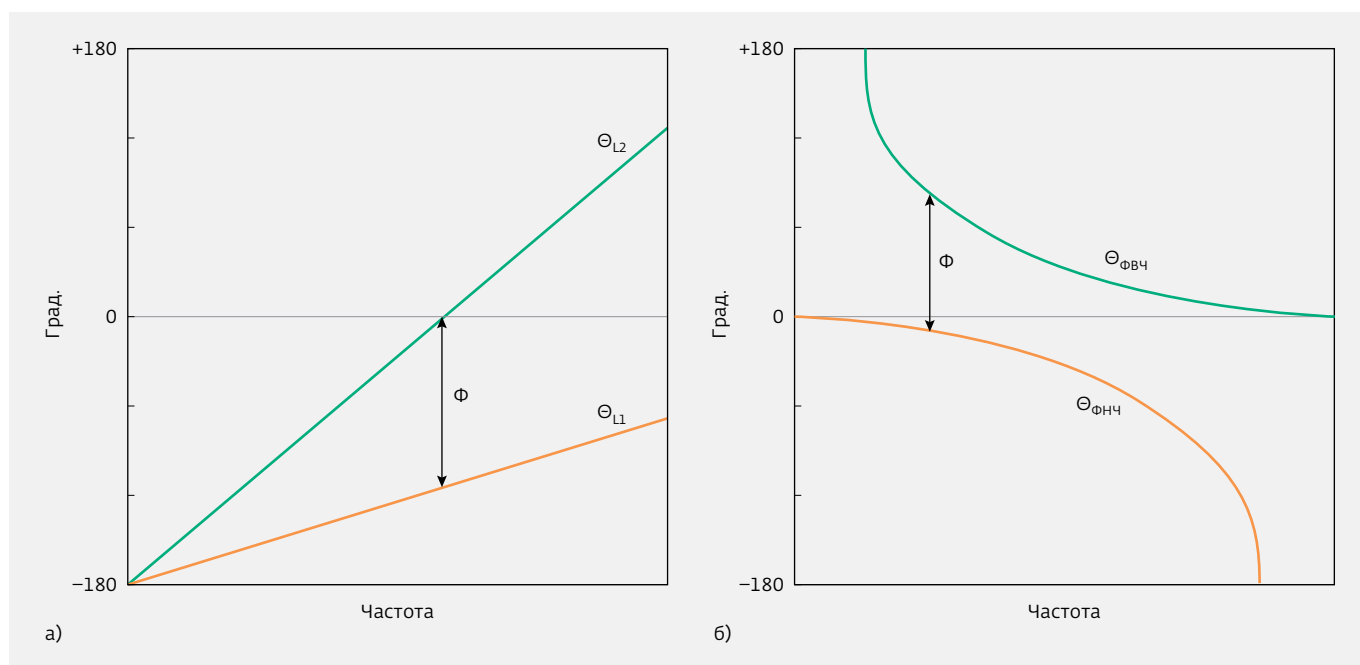


Рис.2. Зависимость фазового сдвига от частоты: а - в фазовращателе на переключаемых линиях задержки; б - в фазовращателях на переключаемых фильтрах

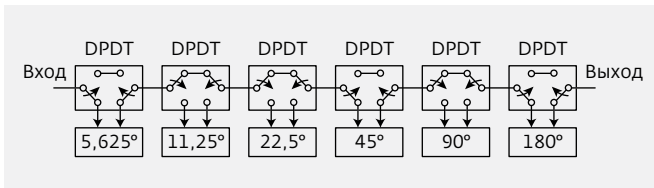


Рис.3. Упрощенная структурная схема цифрового фазовращателя на DPDT-переключателях. DPDT – переключатель с двумя входами и двумя выходами

Цифровые фазовращатели могут выпускаться в модульном и интегральном исполнениях. Первые представлены на рынке не один десяток лет, а вторые начали появляться относительно недавно. В модульных фазовращателях (табл.1) чаще всего используются рип-диодные переключатели, выполненные по кремневой (Si) или арсенид-галлиевой (GaAs) технологии. Конструктивно такие модули могут быть оснащены коаксиальными соединителями (рис.4а) и микрополосковыми выводами (рис.4б).

Скорость переключения цифровых фазовращателей составляет от нескольких десятков до несколь-



Рис.4.

Примеры конструктивного выполнения модульных цифровых фазовращателей: а – с коаксиальными соединителями, б – с микрополосковыми выводами

ких сотен наносекунд. Допустимые значения входных мощностей обычно находятся в диапазоне 10–25 дБм. Однако в отдельных изделиях эти величины могут достигать 50–100 Вт. Точность поддержания амплитуды выходного сигнала и необходимого фазового сдвига определяется применяемыми схемотехниче-

Таблица 1. Характеристики цифровых фазовращателей в модульном исполнении

Фирма	Модель, серия	Диапазон частот, ГГц	Максимальный фазовый сдвиг, град	Число разрядов управления	Фазовая ошибка, град	Вносимые потери, дБ
Jersey Microwave*	DPL серия	1,2-1,4	360	6	±4	-
Miteq**	DPS-00650155-180-7-IF-IF	0,65-1,55	180	7	±1	1,5
Pulsar Microwave	DST-12-480/1S	1,0-2,0	360	8	-	3,5
Pulsar Microwave	DST-13-480/1S	2,0-4,0	360	8	-	6,0
Пульсар	АПНТ. 434830.041ТУ	2,3-4,1	360	6	-	-
PMI	PDPS-5F-6	5,4-5,9	~360	6	±6	6,5
RF-Lambda	RFPSHT0408N5	4,0-8,0	348,75	5	±10	5,5
ET Industries	DPS-28-4	2,0-8,0	-	4	5 (СКЗ)	12,0
AKON	A50-8X003	8,0-8,4	360	5	4 (СКЗ)	-
PMI	PDPS-510-6	5,0-10,0	~360	6	±6	6,5
RF-Lambda	RFPSHT1218N6	12,0-18,0	354,5	6	±10	9,0
Meuro	MPS250250B5H	25,0	360	5	±2	10
RF-Lambda	RFPSHT2832D5	28,0-32,0	360	5	-	7,5

* P_{вх} = 100 Вт, ** P_{вх} = 20 Вт.

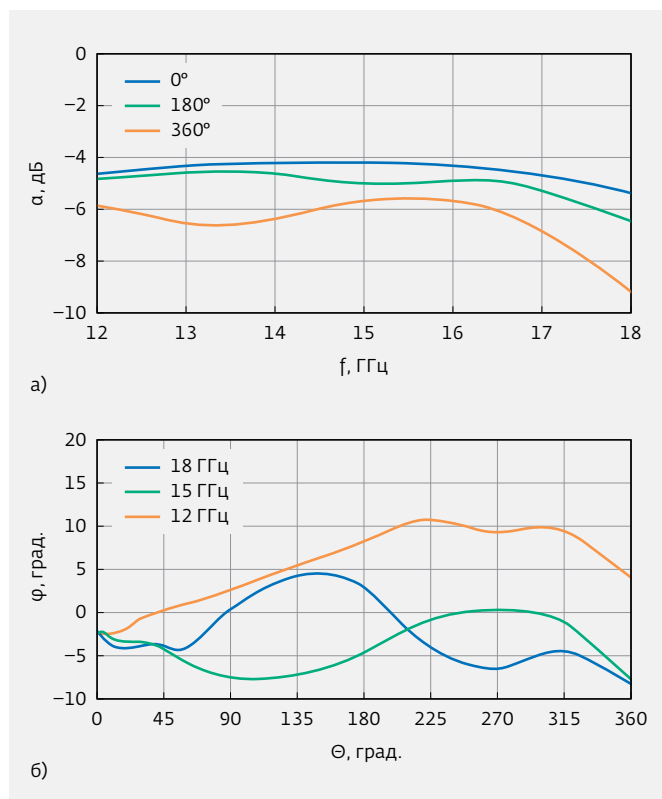


Рис.5. Зависимости вносимых потерь от частоты (а) и фазовой ошибки от устанавливаемого сдвига фаз (б) для фазовращателя RFPST1218N6, выпускаемого компанией RF-Lambda

скими решениями и шириной полосы рабочих частот (рис.5).

Реализованный на переключаемых фильтрах 4-разрядный модульный фазовращатель [2] обеспечивает в диапазоне частот 530–1090 МГц фазовые ошибки не более $5,9^\circ$ при вносимых потерях 2,3–3,0 дБ. При изготовлении фильтров были использованы дискретные индуктивности и конденсаторы серий LQW и GJM компании Murata, а также SPDT-переключатели марки HMC545 компании Hittite Microwave.

Шестиразрядный фазовращатель большой мощности ($P_{\text{вх}} = 50,2$ дБм) на переключаемых рпн-диодами отрезках линии передачи, реализованных в виде встречно-штыревых структур [3], состоит из двух секций, первая из которых обеспечивает фазовые сдвиги $5,625^\circ$, $11,25^\circ$, $22,5^\circ$ и 45° (рис.6а), а вторая – 90° и 180° (рис.6б). Черными квадратиками на этих рисунках показаны рпн-диодные переключатели. В рабочем диапазоне частот (9,2–9,8 ГГц) такой фазовращатель обеспечивает 360° -ный сдвиг фазы с шагом $5,625^\circ$ при вносимых потерях менее 1,3 дБ и небольших фазовых ошибках. Устройство имеет размеры $60 \times 40 \times 2$ мм.

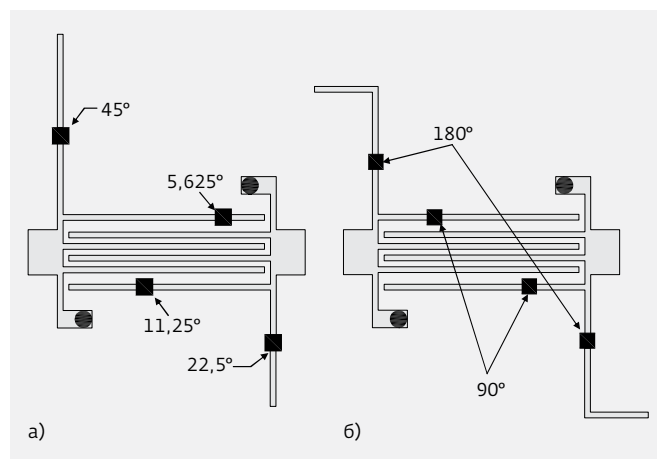


Рис.6. Топология 6-разрядного модульного фазовращателя на переключаемых линиях передачи с фазовыми сдвигами $5,625^\circ$, $11,25^\circ$, $22,5^\circ$, 45° в первой секции (а) и 90° и 180° во второй секции (б)

В модульном исполнении могут выпускаться изделия с дополнительными функциональными возможностями. Так, модель A50-8X003 компании AKON с полосой рабочих частот 8,0–8,4 ГГц содержит входной усилитель, 5-разрядный фазовращатель и быстродействующий переключатель SP4T на рпн-диодах, подключающий один из четырех выходных усилителей. Усиление составляет 20 дБ, выходная мощность 100 мВт, КСВН 1,5:1. Фазовая и амплитудная ошибки в рабочем диапазоне частот и в интервале температур $-15...60^\circ\text{C}$ не превосходят 4° (СКЗ) и $\pm 0,5$ дБ соответственно. Уровень интермодуляционных искажений и высших гармоник на выходе не превышает -20 дБн, а дискретных спектральных составляющих -50 дБн. Изделие поставляется в герметичном корпусе размером $76 \times 83 \times 20$ мм с SMA-соединителями.

При создании интегральных цифровых фазовращателей могут использоваться различные технологии. Реализация 6-разрядного фазовращателя на SiGe

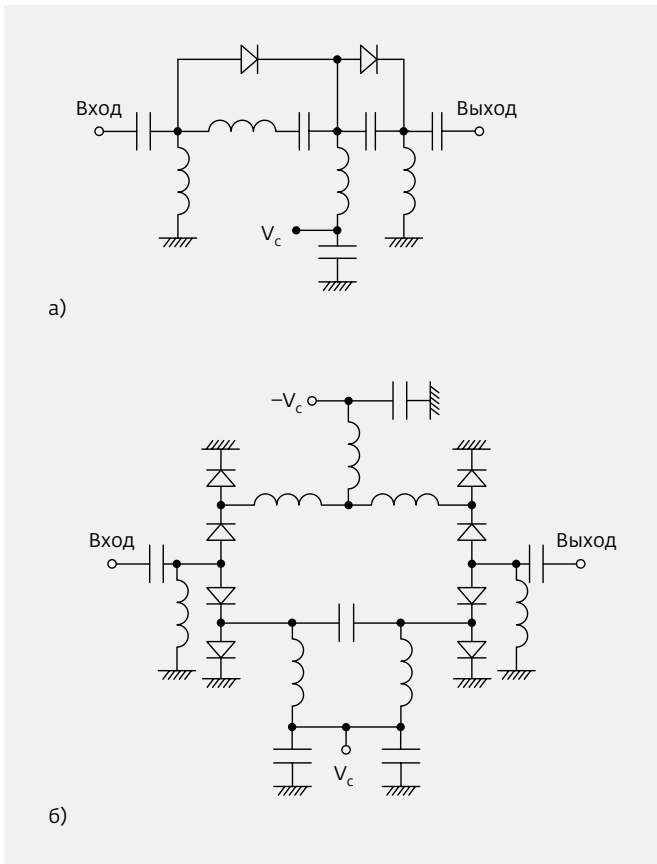


Рис.7. Принципиальные схемы ячеек рiп-диодных фазовращателей для реализации фазовых сдвигов 5,625° и 11,25° (а) и 22,5°, 45°, 90° и 180° (б)

рiп-диодах в диапазоне 7–11 ГГц рассмотрена в [4]. Шесть секций фазовращателя соединяются последовательно (см. рис.3). Малые значения фазовых сдвигов 5,625° и 11,25° реализуются посредством переключения индук-

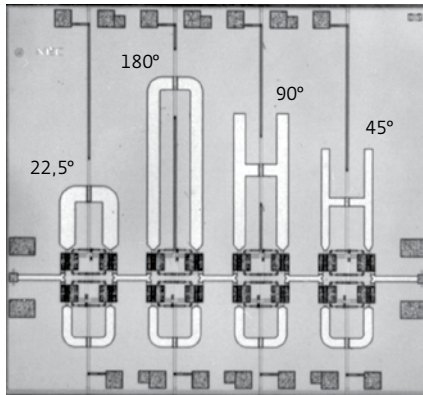


Рис.9. Фотография микрочипа 4-разрядного фазовращателя

тивных и емкостных реактивностей (рис.7а). В секциях со сдвигами 180°, 90°, 45° и 22,5° используется переключение НЧ/ВЧ-цепей посредством переключателей на рiп-диодах (рис.7б). Реальный размер чипа 14,4 мм², вносимые потери 10 дБ. Точность реализации фазовых сдвигов составляет ±10° для секций со сдвигами 90° и 180°.

Применение в цифровых фазовращателях MESFET/HEMT-технологий позволяет существенно уменьшить размеры чипа и значительно снизить вносимые потери, КСВ и среднеквадратичные фазовые ошибки. Помимо этого, по сравнению с рiп-диодами полевые транзисторы (ПТ) обеспечивают более высокое быстродействие и малую мощность потребления по цепям управления. Примеры схем фазовращателей на ПТ для Х/Ки-диапазона [1] представлены на рис.8.

Компания "Микран", используя сертифицированный Европейским космическим агентством GaAs-процесс EDO2AH компании OMMIC, разработала с использованием полевых транзисторов 6-разрядный фазовращатель Х-диапазона в чип-исполнении (3,0×1,8×0,1 мм) для АФАР космического применения. В диапазоне

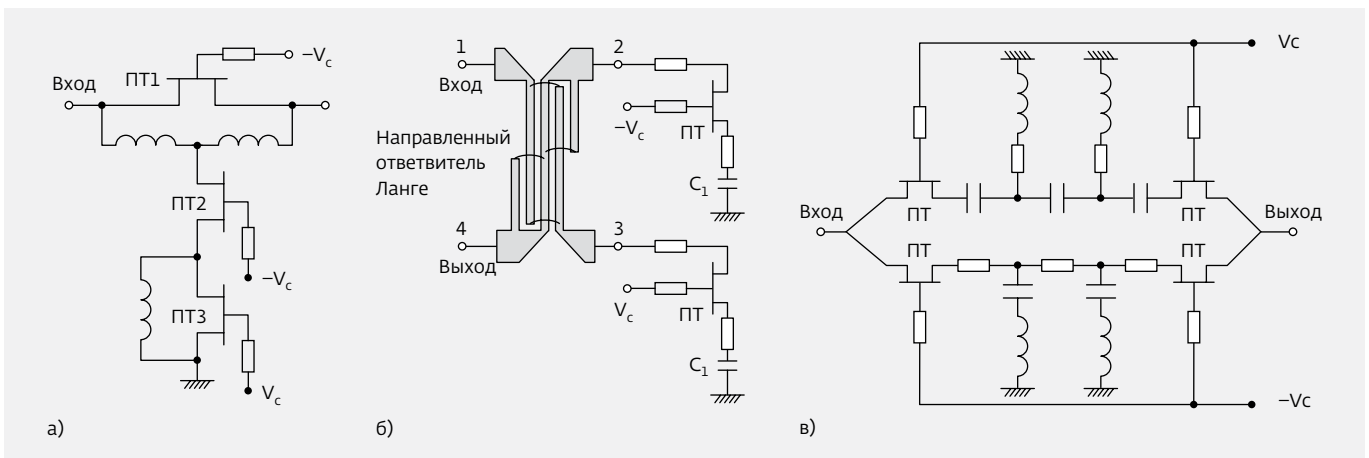


Рис.8. Принципиальные схемы ячеек 4-разрядного цифрового фазовращателя на полевых транзисторах, обеспечивающего фазовые сдвиги на 22,5° и 45° (а), 90° (б) и 180° (в)

Таблица 2. Характеристики интегральных цифровых фазовращателей с 360°-м фазовым сдвигом

Фирма	Модель	Диапазон частот, ГГц	Вносимые потери, дБ	$P_{\text{лвб}}$ (вх.), дБ	Количество разрядов
Cobham	RM4301C	1,2–1,5	6,5	27	7
MACOM	MAPCGM0001	1,0–1,9	5,5	27	6
UMS	CHP4012a98F	2,7–3,5	6,0	24,5	6
Hittite Microwave	HMC649	3,0–6,0	6,5	29	6
OMMIC	CGY2177AUN/C1	4,8–6,8	5,0	20	6
RF Core	RPS085105DA	8,5–10,5	–	–	6
AMTL	AMT2241011	8,0–11,0	5,0	18	6
UMS	CHP3015–99F	8,5–11,5	7,5	24	6
Elbit Systems	3W00A32000	9,0–13,0	<9,0	26	5
Mimix	XS1000	7,0–13,0	6,2	25	6
RF Core	RPS130150DA	13,0–15,0	–	–	6
MACOM	MAPCGM0004-DIE	6,0–18,0	12,0–17,0	19	5
Hittite Microwave	HMC644	15,0–18,5	7,0	23	5
TriQuint	TGP2615	15,0–19,0	7,0	24	6
TriQuint	TGP2102	32,0–37,0	7,0	20	5

частот 8,5–10,5 ГГц начальные потери составляют менее 8,2 дБ, а максимальная фазовая ошибка не превосходит 4,5°.

Реализованный на полевых транзисторах 4-разрядный монолитный фазовращатель на переключаемых

линиях передачи [5] (рис.9) обеспечил в рабочем диапазоне частот 33–35 ГГц фазовую ошибку менее 5° (СКЗ) и вносимые потери 13 дБ с отклонениями менее 0,65 дБ (СКЗ). Длина и ширина переключаемых линий передачи оптимизированы с учетом их геометрии.

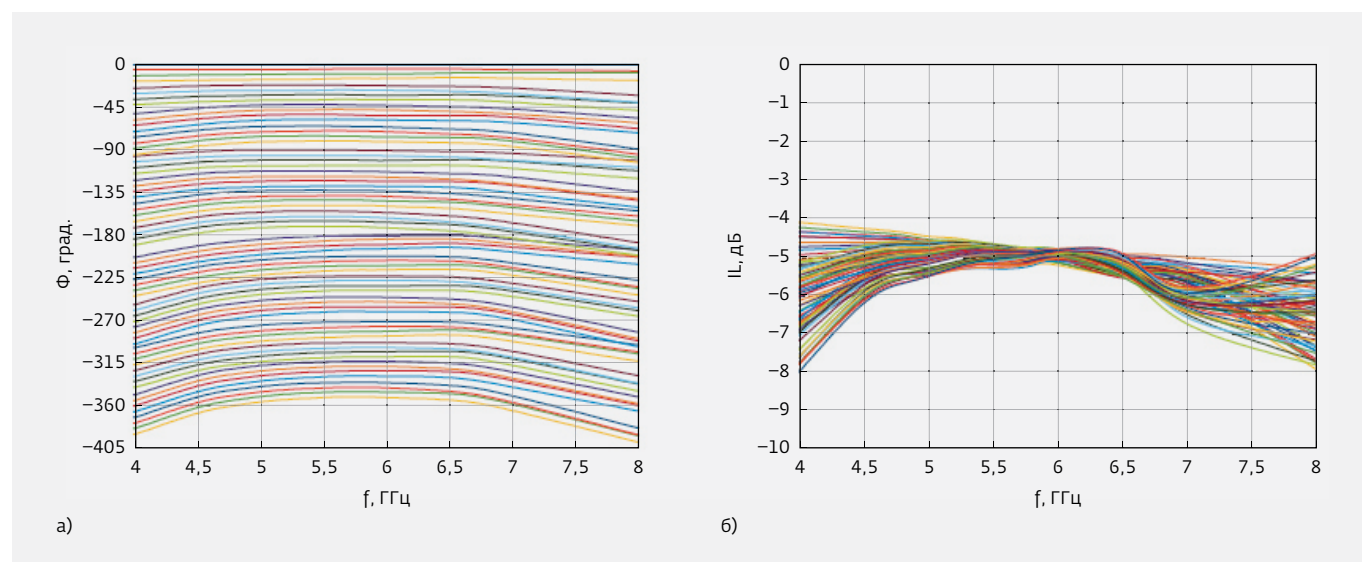


Рис.10. Зависимости фазового сдвига Φ (а) и вносимого ослабления IL (б) от частоты для 64 значений фазы в 6-разрядном фазовращателе (микросхема CGY2177AUN/C1, компания OMMIC)

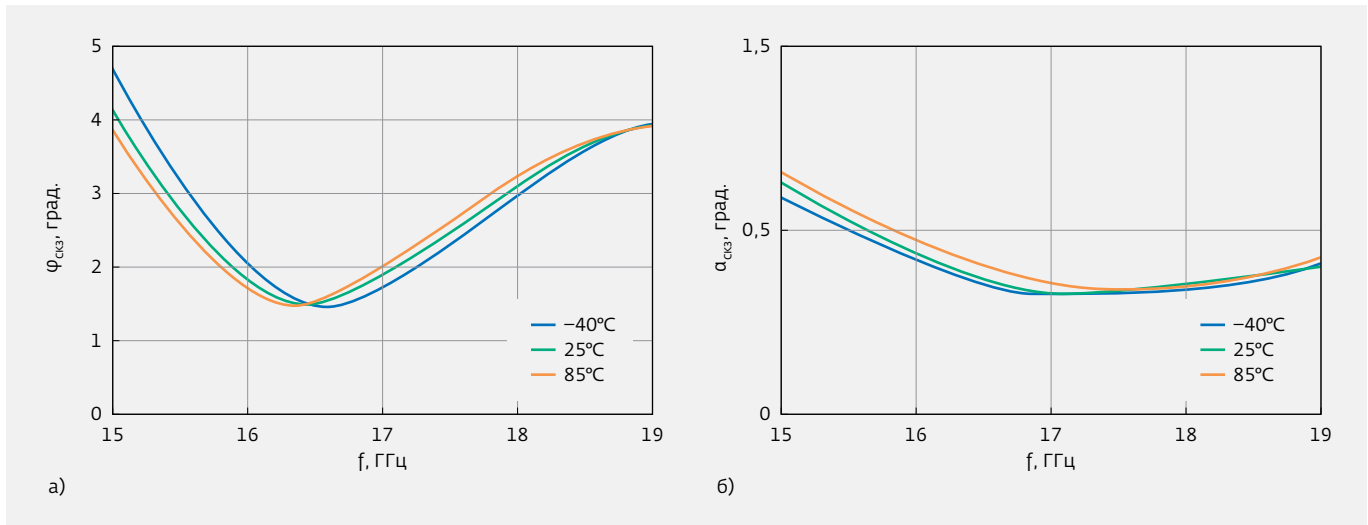


Рис.11. Зависимости среднеквадратичных отклонений фазы $\varphi_{\text{сскз}}$ (а) и ослабления $\alpha_{\text{сскз}}$ (б) от частоты для трех значений температуры окружающей среды (микросхема TGP2605-SM компании Qorvo)

Производители интегральных цифровых фазовращателей (табл.2), в отличие от авторов научно-технических публикаций, далеко не всегда сообщают подробности примененных технических решений. Однако приведенная в описаниях информация о выпускаемых интегральных цифровых фазовращателях позволяет сделать вывод о том, что большинство изделий в настоящее время реализовано на полевых транзисторах по GaAs-технологии.

Зависимости фазовых сдвигов и вносимых ослаблений от частоты для различных значений фазы (рис.10) и температуры (рис.11) свидетельствуют о высоком уровне достигнутых на сегодняшний день характеристик интегральных цифровых фазовращателей.

Одной из перспективных с точки зрения уменьшения размеров и стоимости чипов применительно к их использованию в ФАР является технология КМОП (табл.3) [1]. Примером технологического решения с использованием КМОП-технологии на базе структур "кремний на изоляторе" (КНИ) может служить 5-разрядный цифровой

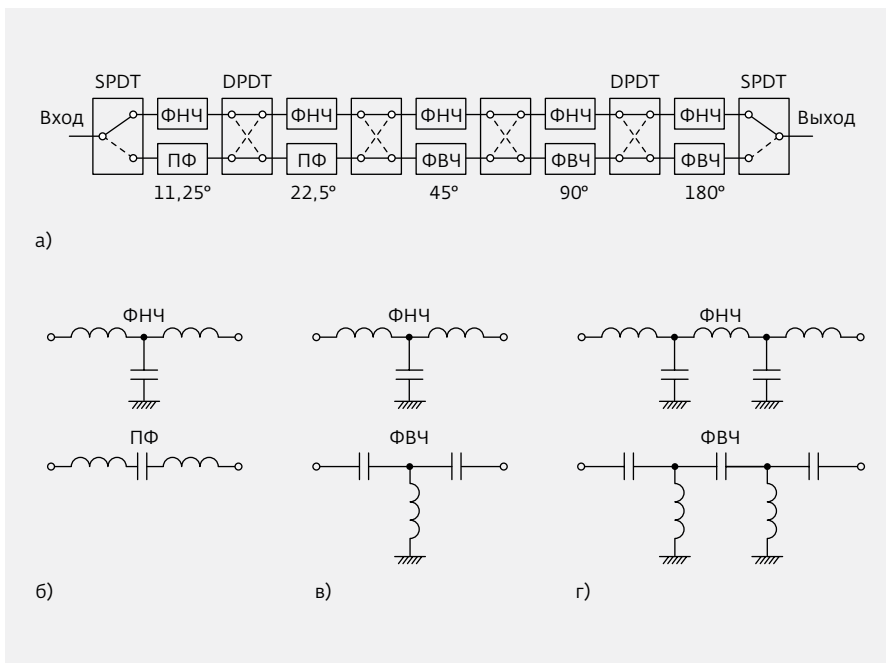
фазовращатель для диапазона 8–12 ГГц [6], реализованный с переключением фильтровых цепей посредством двух SPDT и четырех DPDT-переключателей (рис.12а). При этом для двух младших секций 11,25° и 22,5° использовались фильтры нижних частот (ФНЧ) и полосовые фильтры (ПФ) (рис.12б), а в старших разрядах переключались фильтры нижних и верхних (ФВЧ) частот (рис.12в, г).

Примерно в таком же диапазоне частот (9–11 ГГц) по технологии SiGe Би-КМОП реализован 5-разрядный фазовращатель [7] с переключением фильтров нижней и верхней частоты (рис.13а). Последовательно соединенные между собой пять секций с фазовыми сдвигами 11,25°, 22,5°, 45°, 90° и 180° и включенными между ними компенсирующими усилителями (КУ) (рис.13б) обеспечивают СКЗ фазовой и амплитудной ошибки 5,5° и 0,8 дБ соответственно. Принципиальные схемы ФНЧ и ФВЧ с номиналами используемых индуктивностей и конденсаторов для пяти возможных сдвигов фаз представлены на рис.13в.

По SiGe Би-КМОП-технологии [8] реализован также 5-разрядный цифровой фазовращатель с переключе-

Таблица 3. Характеристики интегральных цифровых фазовращателей на полевых транзисторах (FET), выполненных по GaAs и Si КМОП-технологиям

Технология	Диапазон частот, ГГц	Вносимые потери, дБ	$\varphi_{\text{сскз}}$, град	$\alpha_{\text{сскз}}$, дБ	Размер чипа, мм ²	Количество разрядов
GaAs MSAG FET	7–11	<6,0	<4,5	<0,5	3,40	6
GaAs FET	7–11	<11,0	–	–	8,40	6
180 нм КМОП	7–11	<18,8	<1,1	<1,1	1,90	6
180 нм КНИ КМОП	8–12	<10,8	<0,5	<0,5	0,89	5



нием LC-элементов (рис.14а). Ячейка со сдвигом фаз 11,25° выполнена по схеме рис.14б с применением варакторов со сверхрезким переходом. Ячейка с 22,5°-ным сдвигом фаз реализована с использованием схемы с переключаемыми отрезками линий передачи (рис.14в). Топологии ячеек со сдвигами 45° и 90° выполнены с использованием переключаемых LC-элементов (рис.14г). 180°-ный сдвиг реализован последовательным включением двух 90°-х ячеек. При создании чипа использовался технологический процесс IBM 8НР, обеспечивший граничную частоту транзисторов 95 ГГц. Измеренные вносимые потери на частоте 35 ГГц составили 14,8 дБ, среднеквадратичные фазовые и амплитудные ошибки 5° и 1 дБ соответственно.

Рис.12. Структурная схема 5-разрядного фазовращателя (а) и принципиальные схемы ФНЧ, ФВЧ и ПФ (б, в, г), используемых в отдельных ячейках

Возможности КМОП-технологии на примере 4-разрядного фазовра-

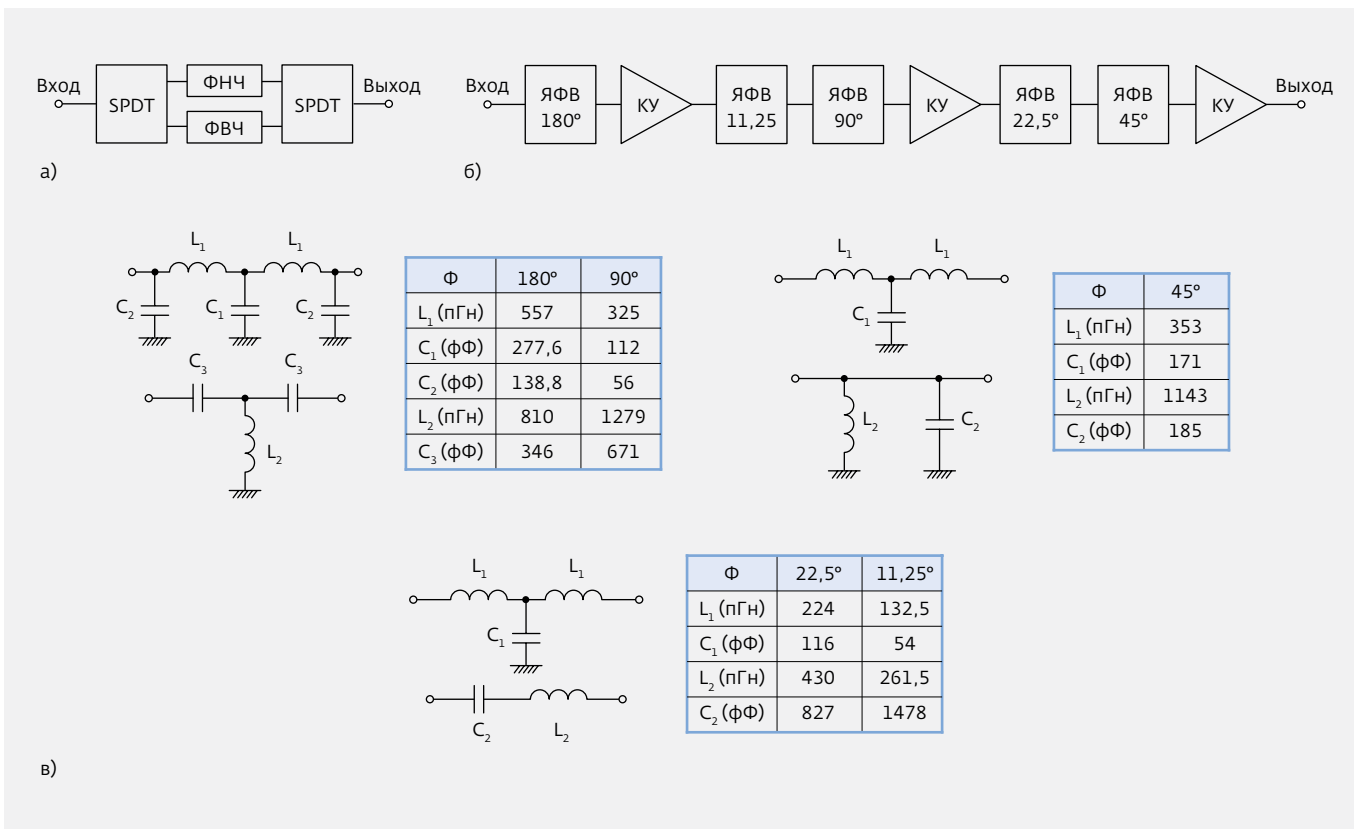


Рис.13. Ячейка фазовращателя на SPDT-переключателях (а), структура 5-разрядного фазовращателя с компенсирующими усилителями КУ (б), принципиальные схемы ФНЧ и ФВЧ с номиналами используемых индуктивностей и конденсаторов (в). ЯФВ – ячейка фазовращателя

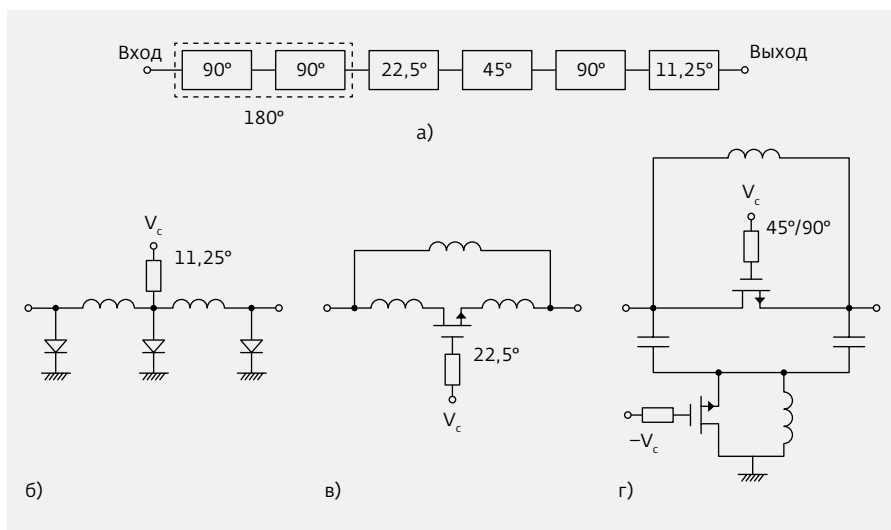


Рис.14. Структурная схема 5-разрядного фазовращателя (а) и упрощенные принципиальные схемы дискретных сдвигающих ячеек, используемых в различных секциях (б, в, г)

щателя в W-диапазоне (75–85 ГГц) представлены в [9]. Ячейки фазовращателя со сдвигами 90°, 45° и 22,5° выполнены на переключаемых линиях задержки. Для обеспечения 180°-ного сдвига используются две 90°-ные ячейки. На частоте 77 ГГц измеренные вносимые потери составили 25±2,1 дБ, а среднеквадратичные отклонения фазы 7,2°. Значение $P_{идБ}$ для разработанного фазовращателя не превышает 15 дБм. Весьма малыми оказались размеры чипа (0,58 × 0,21 мм).

При переходе в миллиметровый диапазон волн проявляется интерес и к другим технологическим процессам (InGaAs pin-диоды, 120 нм IBM 8HP SiGe Би-КМОП и др., в том числе GaN-технологии). Сведения о реализации

на GaN 22,5°-ной ячейки на переключаемых фильтрах в диапазоне частот 8–16 ГГц приведены в [10]. Измерения показали, что вносимые потери и амплитудный разбаланс во включенном и выключенном состояниях не превышают 3 и 1,03 дБ соответственно, а фазовая ошибка не превосходит 5,2°. Значение $P_{идБ}$ по входу фазовращателя достигает 40 дБм, что является следствием применения GaN-технологии.

Для повышения точности цифровых фазовращателей или увеличения числа их разрядов иногда (например, модель PE82P5002 в модульном исполнении от компании Pasternack) цифровые устройства дополняют аналоговыми. При этом старшие разряды кода используются для переключения цифровых ячеек фазовращателя, а младшие разряды кода после преобразования

в аналоговый вид – для управления аналоговой ячейкой фазовращателя в целях получения фазовых сдвигов в младших разрядах и компенсации ошибок в старших цифровых разрядах.

Используя такую комбинированную структуру, компания COMSAT RSI Angel Laboratories разработала фазовращатели с цифровой компенсацией (рис.15а), обеспечивающие исключительно точное управление по фазе в широкой полосе частот Δf .

Реализация подобных фазовращателей возможна при условии, что входные сигналы занимают относительно небольшую полосу $\delta f \ll \Delta f$. Каждый фазовращатель

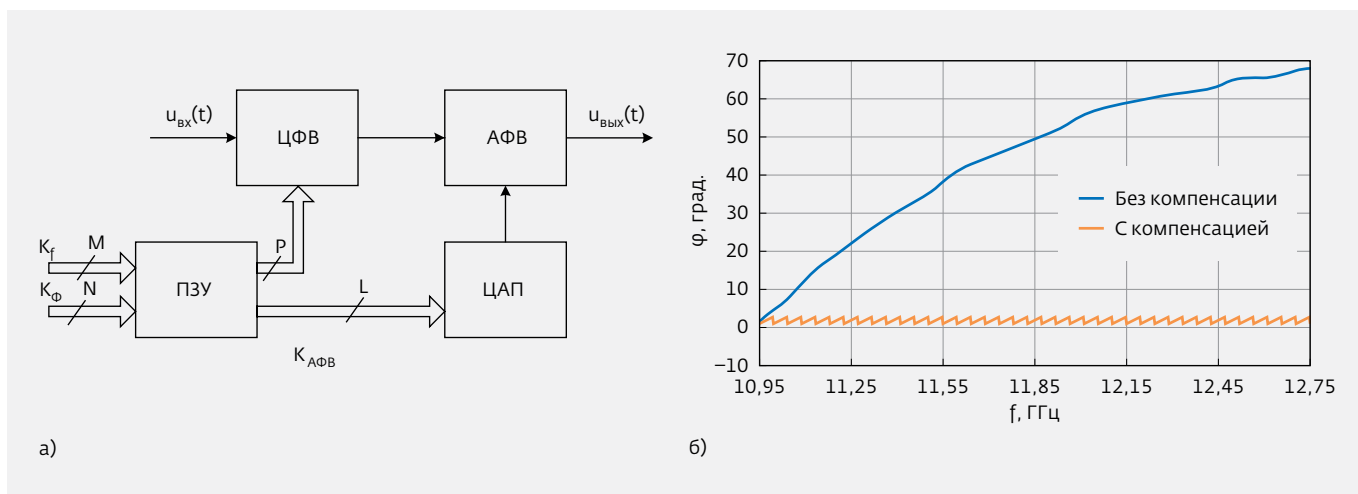


Рис.15. Структурная схема комбинированного фазовращателя (а) и зависимости фазовой ошибки от частоты до и после компенсации (б). ЦФВ – цифровой фазовращатель, АФВ – аналоговый фазовращатель

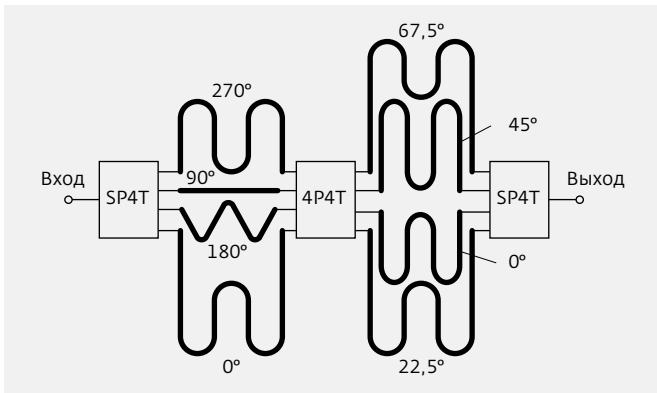


Рис.16. Структура цифрового фазовращателя на многопозиционных переключателях

такого типа требует индивидуальной настройки, которая предполагает выполнение следующих процедур:

- разбиение общего диапазона частот на $m=2^M$ поддиапазонов с полосой $F = \Delta f / m > \delta f$;
- в рамках каждого частотного поддиапазона для всех значений $n=2^N$ кода фазы K_Φ подбирают значения кодов управления ЦАП $K_{АФВ}$ с разрядностью $L = N - P + R$, причем от значения $R = 0, 1, 2, \dots$ зависит реализуемая точность установки фазы во всем фазовращателе;
- в каждую из $2^M \times 2^N$ ячеек памяти ПЗУ записывают значения кодов $K_{АФВ}$ с разрядностью L .

В рабочем режиме по адресам, определяемым кодами рабочей частоты K_f и фазы K_Φ , из ПЗУ извлекаются коды управления $K_{АФВ}$ аналоговым фазовращателем, обеспечивающие требуемую точность изделия.

Эффективность компенсации иллюстрируется рис.15б, на котором представлены зависимости фазовой ошибки

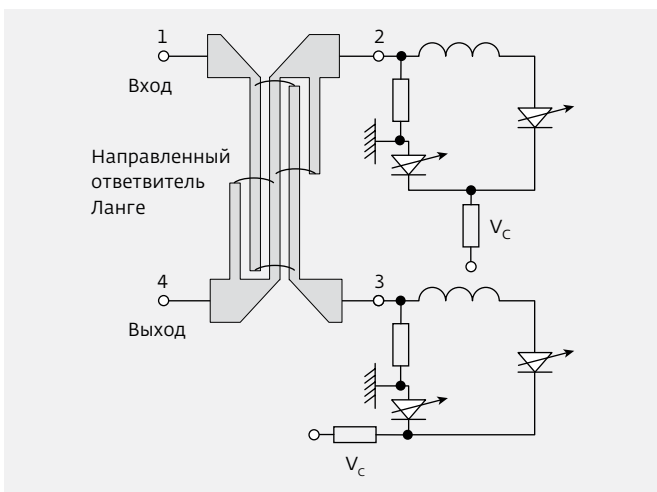


Рис.17. Упрощенная принципиальная схема аналогового фазовращателя отражательного типа с использованием направленного ответвителя Ланге

от частоты в 7-разрядном фазовращателе ($N=7, P=4$) до и после компенсации.

Полный рабочий диапазон частот фазовращателя находится в пределах 0,5–18,0 ГГц. Помимо высокой точности установки фазы, фазовращатель вследствие меньшего числа переключаемых цифровых ячеек отличается меньшим вносимым ослаблением.

Определенный выигрыш в уменьшении размеров и вносимых потерь может дать переход от традиционной двоичной структуры цифрового фазовращателя (рис.3) к структуре с меньшим числом секций (рис.16), в которой используются многопозиционные переключатели SP4T и 4P4T [11].

АНАЛОГОВЫЕ ФАЗОВРАЩАТЕЛИ

Аналоговые, или управляемые напряжением, фазовращатели применяются во многих приложениях, включая линейризацию мощных усилителей, фазированные антенные решетки, схемы формирования лучей, фазовые дискриминаторы, в качестве триммеров в приемопередающих модулях и др. Такие фазовращатели обеспечивают непрерывный фазовый сдвиг при меньших вносимых потерях, чем цифровые изделия. При их реализации используются как отражательные схемы, так и схемы на отрезках линии передачи. Первые обеспечивают примерно постоянный фазовый сдвиг в зависимости от частоты, вторым свойственна линейная зависимость сдвига фаз от частоты.

Одна из возможных структур фазовращателей отражательного типа (рис.17) [1] позволяет обеспечить практически 180°-ный фазовый сдвиг в относительно широкой полосе частот. В качестве диодов могут быть использованы варикапы со сверхрезким переходом, pin-диоды и диоды Шоттки.

Последовательное включение двух отражающих фазовращателей по схеме рис.18 [12] обеспечивает фазо-

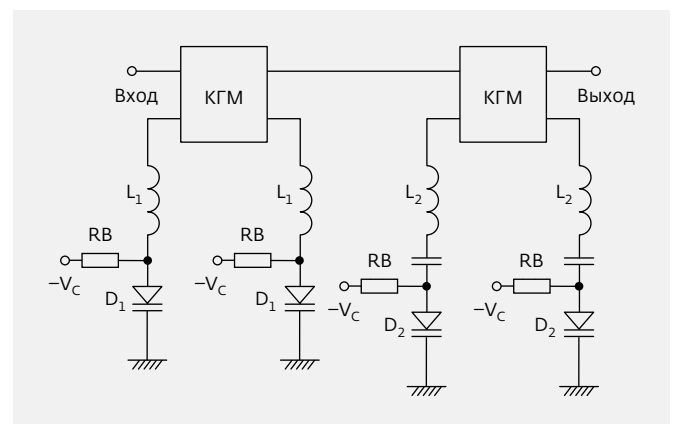


Рис.18. Структура сверхширокополосного (4,4–16,0 ГГц) 2-секционного фазовращателя отражательного типа

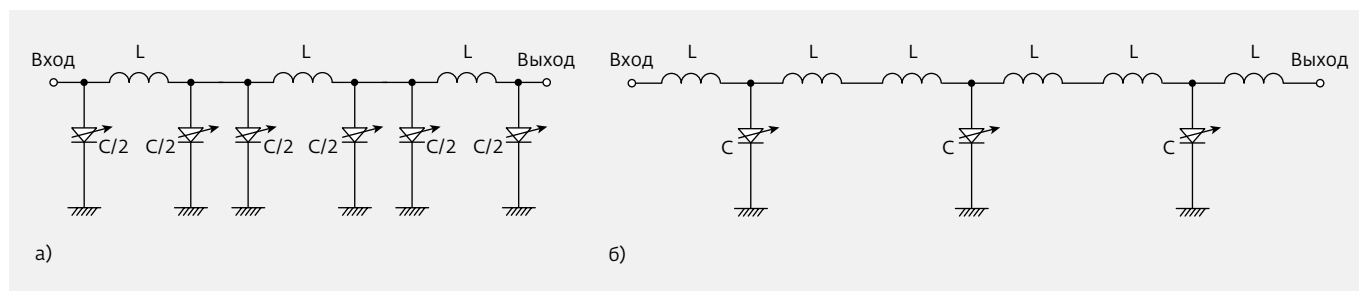


Рис.19. Упрощенные принципиальные схемы перестраиваемых варакторами аналоговых фазовращателей с использованием ячеек П-типа (а) и Т-типа (б)

вый сдвиг от 0 до 98° при максимальной ошибке $\pm 2,8^\circ$ в чрезвычайно широком диапазоне частот – 4,4–16,1 ГГц. Размер чипа, выполненного по GaAs-технологии, составляет 3,0×2,0×0,2 мм [12].

Схемы управляемых напряжением аналоговых фазовращателей на основе линий передачи [1] реализуются при замене распределенной линии передачи ее аналогами

из П- и Т-секций на сосредоточенных элементах и включением управляемых напряжением варакторов вместо конденсаторов фиксированной емкости.

В схеме из трех П-секций, каждая из которых является фильтром нижних частот (рис.19а), результирующий фазовый сдвиг меняется с частотой по линейному закону.

Таблица 4. Характеристики аналоговых фазовращателей в модульном и интегральном исполнениях

Фирма	Модель, серия	Диапазон частот, ГГц	Максимальный фазовый сдвиг, град	Вносимые потери, дБ	Управляющее напряжение, В	Конструктивное исполнение
R&K Company	PS-2200BW200-0S	2,1-2,3	360	7,0	0-12	Модуль
Pulsar Microwave	ST-24-серия	3,0-3,2	90	3,0	0-5	Модуль
Sage	SKP0430830836-SFSF-A1	4,0-8,0	360	8,0	0-12	Модуль
Miteq	APS-08000900-180-1F-1FS	8,0-9,0	180	5,0	-18...0	Модуль
PMI	PS-9G11G-360-A-SFF	9,0-11,0	360	7,0	-7,5...7,5	Модуль
Aeroflex S&CS	PQ-72	8,0-12,0	60	2,0	-	Модуль
Communication Techniques	Серия PS-360	8,0-13,0	500	6,0	-10...0	Модуль
CMC	CMCF0617	5,5-13,0	180	1,8	-	Модуль
Analog Devices	HMC-C010	6,0-15,0	800	7,0	0-5	Модуль
PMI	PS-6G15G-600-A-SFF	6,0-15,0	600	8,0	0-10	Модуль
Pasternak	PE82P2000	5,0-18,0	400	8,0	0-10	Модуль
PMI	PS-5G18G-400-A-SFF	5,0-18,0	400	8,0	0-10	Модуль
RF-Lambda	RVPT2229GBC	22,0-29,0	360	12,0	0-15	Модуль
PMI	PS-30G40G-180-A-292FF	30,0-40,0	180	4,0	0-5	Модуль
Analog Devices	HMC934LP5E	1,0-2,0	400	3,5	0-13	ИС
Analog Devices	HMC538LP4	6,0-15,0	800	8,0	0-5	ИС
Analog Devices	HMC932LP4E	12,0-18,0	390	4,0	0-13	ИС
Analog Devices	HMC247	5,0-18,0	400	8,0	0-10	ИС
Analog Devices	HMC877LC3	8,0-23,0	500	8,0	-	ИС

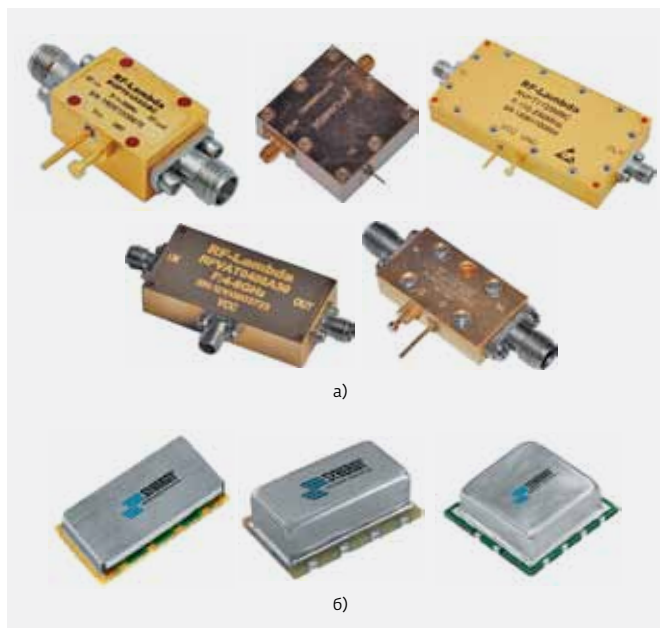


Рис.20. Варианты конструктивного исполнения аналоговых фазовращателей, выпускаемых компаниями RF-Lambda (а) и Synergy (б)

В схеме же из трех Т-секций (рис.19б), являющихся фильтрами верхних частот, результирующий фазовый сдвиг обратно пропорционален частоте. Включая последовательно секции на фильтрах нижних и верхних частот, можно обеспечить фазовый сдвиг, мало зависящий от частоты. Характеристики модульных и интегральных фазовращателей этого типа представлены в табл.4.

Одна из наиболее "продвинутых" разработок, выполненных в последние годы, – модульный аналоговый фазовращатель HMC-C010 компании Hittite Microwave (ныне Analog Devices). При изменении управляющего напряжения от 0 до 5 В фазовращатель обеспечивает фазовый сдвиг от 0 до 800° на частоте 6 ГГц и от 0 до 450° на частоте 16 ГГц с относительно небольшими вариациями вносимого ослабления в полных диапазонах управляющего напряжения и рабочих частот. Благодаря низкому вносимому ослаблению и исключительно высокой устойчивости к внешним воздействиям эта модель получила широкое применение. HMC-C010 – это герметичный модуль с SMA-соединителями, которые при необходимости могут сниматься.

Отметим, что компания Analog Devices сохраняет монополию на выпуск интегральных аналоговых фазовращателей с большими значениями фазового сдвига (см. табл.4).

В научных публикациях имеются сведения об особенностях реализации подобных изделий и на более высоких частотах. Так, в [13] приведены данные о двунаправленном КМОП-фазовращателе, реализованном на двух

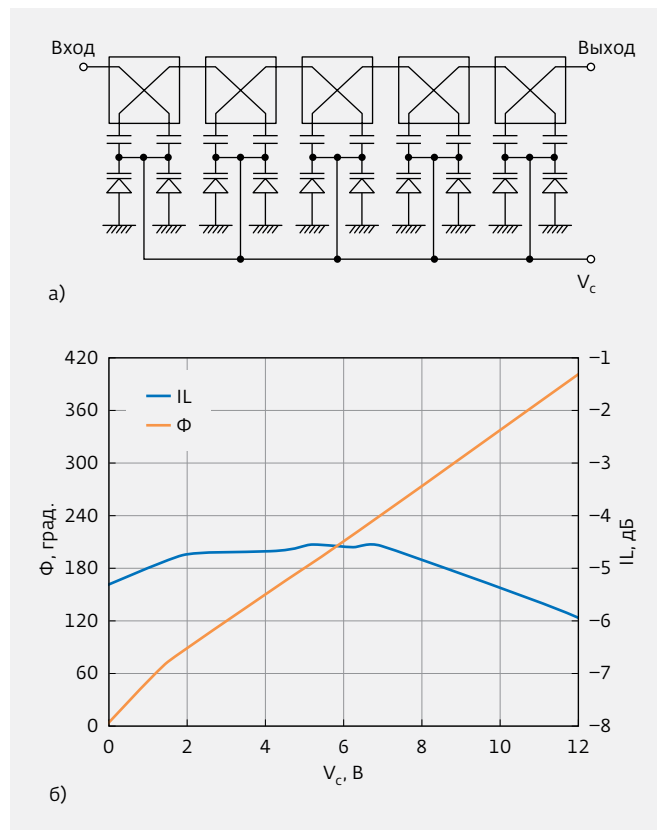


Рис.21. 5-секционный аналоговый фазовращатель на отражательных ячейках R&K-PS2200BW200-0S компании R&K: а – структура; б – зависимости вносимого фазового сдвига Φ и ослабления IL от управляющего напряжения на центральной частоте 2200 МГц рабочего диапазона при $P_{вх} = 0$ дБм

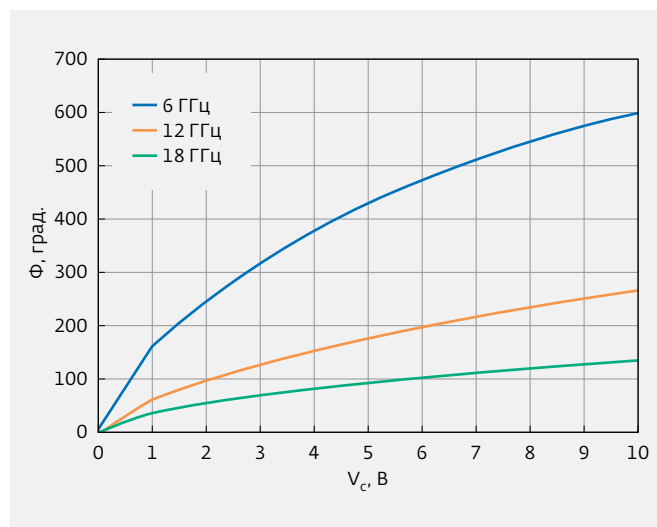


Рис.22. Зависимость фазового сдвига Φ от управляющего напряжения для модульного аналогового фазовращателя PE82P2000 от компании Pasternack

Таблица 5. Характеристики модульных цифро-аналоговых фазовращателей с 360°-ным фазовым сдвигом

Фирма	Модель	Диапазон частот, ГГц	Вносимые потери, дБ	Число разрядов управления	Входная мощность, дБм
Pasternack	PE82P5000	0,5–2,0	13	8	30
PMI	PS-2D2G-360-CD-1	2,17–2,20	19	9	10
G.T. Microwave	P2P-61A-5AR	9,5–10,5	12	12	10
PMI	PS-360-DC-IR-9G11G	9,0–11,0	8	10	20
Cobham/Aeroflex	QQ-66	7,0–12,0	14	8	7
G.T. Microwave	P2P-68T-5JS	6,0–18,0	12	12	15
PMI	PS-360-DC-3	6,0–18,0	12	12	10
G.T. Microwave	POP-69A-1	2,0–18,0	16	10	23

отражающих структурах. Фазовращатель обеспечивает на частоте 24 ГГц 360°-ный фазовый сдвиг при вариациях вносимого ослабления $\pm 1,2$ дБ. Площадь чипа устройства составляет 0,33 мм².

Внешний вид модульных аналоговых фазовращателей отличается значительным разнообразием (рис.20). Столь же многочисленны и схемотехнические решения, применяемые при их изготовлении. Одна из таких схем – компании R&K (рис.21а) – характеризуется зависимостями фазового сдвига и вносимого ослабления от управляющего напряжения (рис.21б), свидетельствующими о высоком качестве изделия.

В более широком диапазоне частот 5–18 ГГц (например, модель PE82P2000 компании Pasternack) зависимость сдвига фаз от управляющего напряжения сделать линейной не удастся (рис.22). Однако монотонный характер изменения фазового сдвига от управляющего напряжения для каждой частоты внутри рабочего диапазона сохраняется. Это позволяет вводить в состав аналоговых фазовращателей цифро-аналоговые преобразователи и управлять ими цифровым кодом большой (обычно не более 12) разрядности. В этом случае при необходимости вводят цифровую коррекцию, обеспечивающую линейный характер зависимости $\Phi(V_c)$. Основными производителями модульных цифро-аналоговых фазовращателей являются компании G.T. Microwave и PMI (табл.5).

Продолжение следует

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bahl I.J.** Control Components Using Si, GaAs, and GaN Technologies. – Artech House, Boston/London. 2014.
2. **Tang X., Mouthaan K.** Design Considerations for Octave-Band Phase Shifters Using Discrete Components. – IEEE Trans. MTT. Vol. 58. No. 12. Dec. 2010. PP. 3459–3466.
3. **Zhang J., Cheung S.W., Yuk T.I.** A Compact 6-bit Phase Shifter with High-Power Capacity Based on Composite Right/Left-Handed Transmission Line. // Proc. of the 40th European Microwave Conference, September 2010, Paris, France. PP. 437–440.
4. **Tayrani R., et al.** Broad-Band SiGe MMICS for Phased-Array Radar Applications. – IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. SG-38, 2003. PP. 1462–1471.
5. **Muruhashi K., Mizutani H., Ohata K.** Design and Performance of a Ka-Band Monolithic Phase Shifter Utilizing Nonresonant FET Switches. – IEEE Trans., MTT, Vol. 48, No 8, Aug 2008. PP. 1313–1317.
6. **Cho M.-K., Baek D., Kim J.-G.** An X-Band 5 bit Phase Shifter with Low Insertion Loss in 0.18 μm SOI Technology. – IEEE Microwave Wireless Compon. Lett. Vol. 22. Dec. 2012. PP. 648–650.
7. **Lin C., Li Q., Li Y., et al.** A Fully Integrated X-Band Phase-Array Transceiver in 0.13- μm SiGe BiCMOS Technology. – IEEE Trans, MTT. Vol. 64. No. 2. Febr. 2016. PP. 575–584.
8. **Kang D.-W., et al.** Single and Four-Element Ka-Band Transmit/Receive Phase-Array Silicon RFICs with 5-bit Amplitude and Phase Control. – IEEE Trans, MTT. Vol. 57. Dec. 2009. PP. 3534–3543.
9. **Lee H-S, Min B-W.** W-band CMOS 4-bit Phase Shifter for High Power and Phase Compression Points. – IEEE Trans, C&S. Vol. 62. January 2015. PP. 1–5.
10. **Ross T.N., Hetta K., Cormier G, Wight J.S.** Design of X-band GaN Phase Shifters. – IEEE Trans, MTT. Vol. 63. No. 1. January 2015. PP. 244–255.
11. **Maloratsky L.G.** Electrically Tunable Switched-Line Diode Phase Shifters. Part 2: Multi-Section Circuits. – High Frequency Electronics, 2010, May. PP. 60–70.
12. **Licyszyn S., Robertson I.D.** Two-Octave Bandwidth Monolithic Analog Phase Shifter. – IEEE Microwave and Guided Wave Letters. Vol. 2. No. 8. Aug. 1992. PP. 343–345.
13. **Wu J.-C., Chang C.-C., Chang S.-F., et al.** A 24-GHz Full-360° CMOS Rejection-Type Phase Shifter MMIC with Low Loss Variation. – IEEE Frequency Integrated Circuits Symposium Dig., 2008. PP. 365–368.