

Делители частоты.

Часть 2. Статические делители и предделители

Сергей ДИНГЕС,
к. т. н.
Виктор КОЧЕМАСОВ,
к. т. н.

Во второй статье из цикла, посвященного обзору делителей частоты СВЧ-диапазона, продолжена тема статических делителей частоты, выполняемых с помощью различных современных полупроводниковых технологий. Представлены предварительные делители частоты, или предделители, иногда называемые в отечественной литературе прескалерами.

Делители на основе КМОП (CMOS)

В отличие, например, от альтернативных решений на основе арсенида галлия (GaAs) КМОП-делители имеют исключительно низкое энергопотребление и отличаются высокой надежностью, особенно в области космической техники, где требуется использование радиационно-устойчивых компонентов. В таблице 1 приведены параметры ДЧ, выполненных на основе КМОП-технологий, с максимально достигнутыми рабочими частотами.

Делители компании Peregrine Semiconductor, изготовленные по технологии UltraCMOS, в дополнение к UltraCMOS-устройствам ФАПЧ предоставляют инженерам комплексные решения для проектирования РЧ-оборудования космических, спутниковых, военных и беспроводных инфраструктур в С-, X- и Ku-диапазонах частот.

Делители выполнены на основе классических цепочек D-триггеров, содержат буферные усилительные каскады на выходе, а некоторые

Таблица 1. Параметры ДЧ с максимально достигнутыми рабочими частотами, выполненных на основе КМОП-технологий

Публикация	$f_{\text{вх}} \text{ (max)}, \text{ ГГц}$	SOI, ГГц	Технология	$P_{\text{потр}} \text{ мВт (} U_{\text{питт}} \text{ В)}$
[5]	66	48	90 нм CMOS	80 (1,8)
[6]	67	61,4	90 нм CMOS	15,7 (1,2)

Таблица 2. Делители частоты фирмы Peregrine Semiconductor

Модель	$K_{\text{дел}}$	$F_{\text{max}} - f_{\text{max}}, \text{ ГГц}$	$P_{\text{вх}}/P_{\text{вых}}, \text{ дБм}$	$U_{\text{питт}} \text{ В}/I_{\text{потт}} \text{ мА}$
PE35400	4	3–13,5	При 4,5–11,5 МГц: –20 ... –7/5	2,8/16
PE9301	2	1,5–3,5	–5/–10	3/13
PE9303	8	1,5–3,5	–5...+5/–5	3/14
PE9304	2	1–7	0...+12/–7...–12	3/14
PE9309	4	3–13,5	0...7/0	3/16
PE9311	2	0–1,5	–8...+10/0	3/6,5
PE9312	4	0–1,5	–8...+10/0	3/6,5
PE9313	8	0–1,5	–8...+10/0	3/6,5

модели (PE9313) и на входе (рис. 1, 2). В ряде моделей делителей устанавливается антистатическая защита ESD. Все маломощные делители компании, основные сведения о которых приведены в таблице 2, выпускаются в корпусе 8L CFP размером 4,6×4,6 мм (рис. 2). Последняя разработка компании — бескорпусной (Die) делитель PE35400. Фазовый шум этого делителя на частоте 3,025 ГГц равен –135 дБн/Гц.

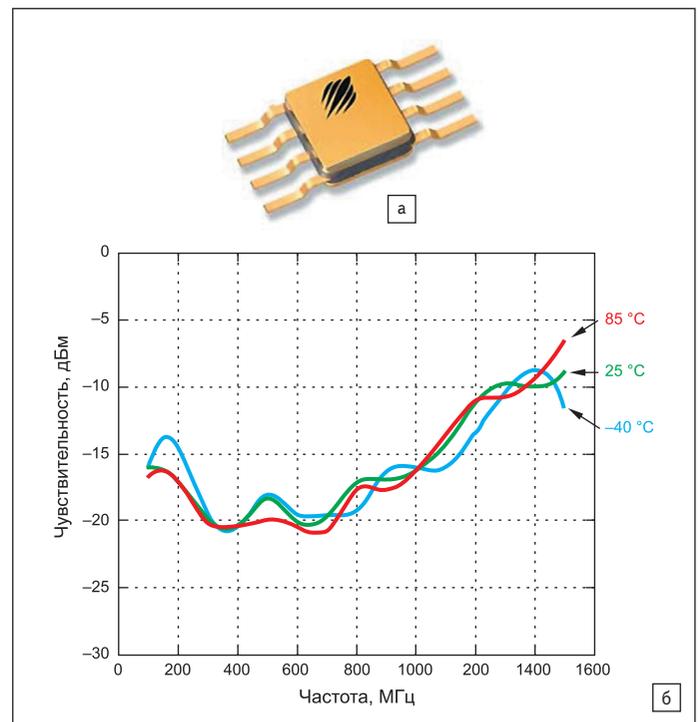


Рис. 2. Предделитель PE9313: а) внешний вид; б) частотная зависимость чувствительности по входу

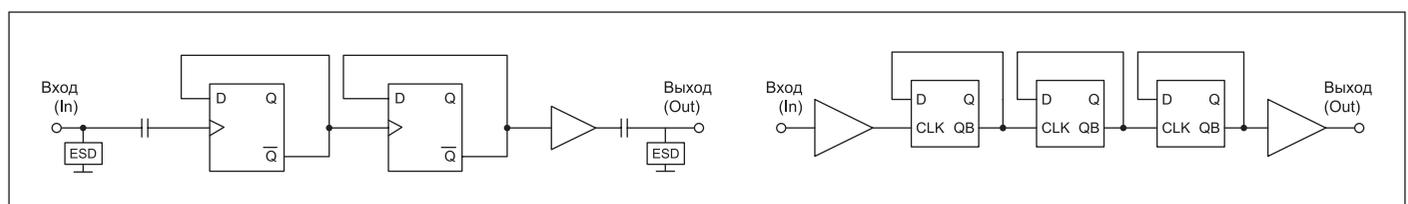


Рис. 1. Структура UltraCMOS-делителя PE35400 и предделителя PE9313, предназначенных для использования в приложениях космической тематики

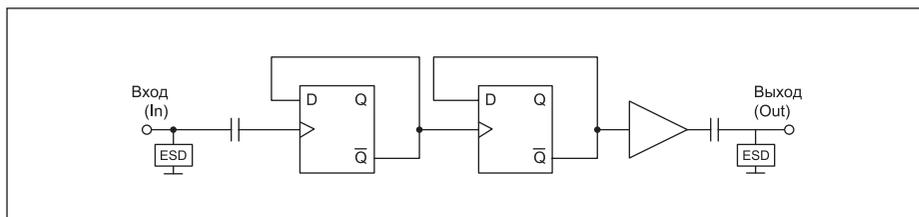


Рис. 3. Структура делителя PE9309

Таблица 3. СВЧ-делители частоты, производимые НПП «Пульсар»

Модель	$K_{\text{дел}}$	$f_{\text{вх}}$, ГГц	$P_{\text{вых}}$	Потребляемый ток, не более, мА
1324ПЦ1	2	0,1–3,9	–19...+10 дБм	45
1324ПЦ2	4	0,1–3,8	–20...+11 дБм	54
1324ПЦ3	8	0,1–3,8	–20...+11 дБм	51
1324ПЦ4	2, 4, 8, 16	0,2–2,5	–3 дБм	90
1324ПЦ5	2, 4, 8, 16	0,1–3,8	–3 дБм	100
1324ПЦ6	2	0,45–18	0,45 мВт	45
1324ПЦ7	4	0,45–18	0,45 мВт	51
1324ПЦ8	8	0,1–3,8	0,45 мВт	75
1324ПЦ9	2, 4, 8, 16	0,5–15	0,45 мВт	100
1324ПЦ10	2	0,3–1,7	0,1 мВт	10
1324ПЦ11	4	0,3–1,7	0,1 мВт	10

Наиболее высокочастотный компонент PE9309 (рис. 3) представляет собой высококачественный UltraCMOS-предделитель с фиксированным коэффициентом деления на 4. Диапазон рабочих частот делителя составляет 3–13,5 ГГц. PE9309 работает от одного источника питания при потреблении 16 мА. Он упакован в небольшой 8-выводной корпус CFP, а также доступен в бескорпусном варианте (DIE) для гибридного применения. Делитель может быть использован в оборонных и космических приложениях.

Центром проектирования АО «НПП «Пульсар» разработана серия СВЧ монолитных интегральных схем 1324, в состав которой входит ряд моделей делителей частоты, краткие сведения о которых приведены в таблице 3.

Выпускаемые НПП СВЧ МИС широкополосных статических делителей частоты с фиксированным коэффициентом деления, согласованные по входу и выходу с волновым сопротивлением 50 Ом, обладают широким динамическим диапазоном по входу. Уровень фазовых шумов делителей составляет –147 дБн/Гц, выходное напряжение 350 мВ. Для делителей необходимо однополярное питание +5 В, они имеют вход для подачи сигнала отключения питания, изготавливаются в миниатюрном металлокерамическом корпусе размерами 5×5 мм и в виде кристаллов. Диапазон рабочих температур делителей –60...+85 °С.

ООО «Научно-технический центр «ДЭЛС» (Белоруссия) предлагает на рынке микросхемы 5861ПЦ1У и 5861ПЦ2У — высокочастотные цифровые делители частоты. Микросхемы предназначены для деления частоты поступающих на их входы последовательностей импульсов или синусоидаль-

ного сигнала с коэффициентами деления 2 (5861ПЦ1У) и 5 (5861ПЦ2У). Основные параметры делителей приведены в таблице 4.

Микросхемы изготавливаются по КМОП-технологии, имеют ТТЛ-совместимые входы и выходы и обеспечивают возможность согласования по выходам с уровнями ТТЛ и 50-Ом линией. Конструктивно они выполнены в планарном металлокерамическом корпусе типа Н04.16-1В с четырехсторонним расположением выводов.

Микросхемы содержат два канала деления: канал с аналоговым входом СТ1 и канал с цифровым ТТЛ-входом СТ2 (рис. 4). Каждый канал имеет входной буфер, делитель частоты с коэффициентом деления 2 (5861ПЦ1У) или 5 (5861ПЦ2У) и выходной буфер. Выходы каждого из каналов Q1 и Q2 имеют возможность работы на ТТЛ-нагрузку и 50-Ом линию. Каналы имеют независимые управляющие входы, сигналы на которых определяют состояние выхода. При установке сигнала на управляющем входе в состояние логической единицы осуществляется запуск соответствующего канала.

На сайте компании размещена информация еще о трех компонентах:

- Делитель частоты:
 - частота входного сигнала: до 1 ГГц;
 - коэффициент деления: 2.
- Делитель частоты:
 - частота входного сигнала: до 600 МГц;
 - коэффициент деления: 3.
- Делитель с переменным коэффициентом деления:
 - частота входного сигнала: до 500 МГц;
 - коэффициенты деления: от 1 до 512;
 - скважность поделенного сигнала: 2.

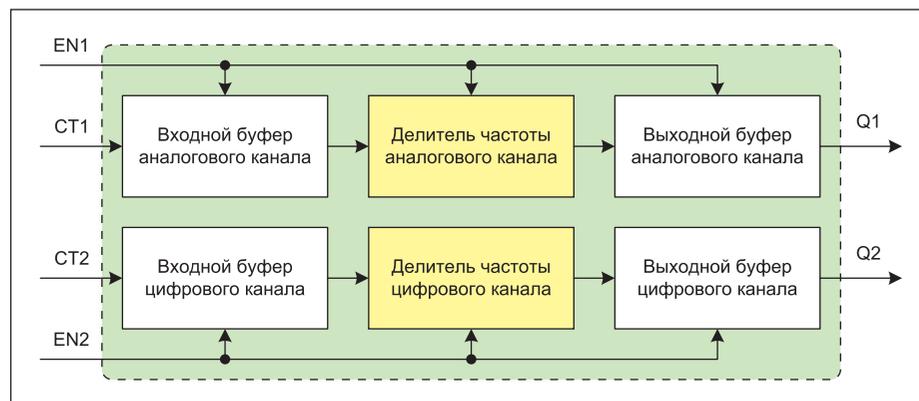


Рис. 4. Структура делителей 5861 ПЦ*

Таблица 4. Основные параметры микросхем

Параметр	Обозначение параметра	Не менее	Не более
Напряжение питания, В	UCC	4,5	5,5
Ток потребления, мА	ICC	–	40
Динамический ток потребления, мА	IOCC	–	150
Мощность сигнала на аналоговом входе СТ1, дБм	Pin СТ1	10	20
Мощность выходного сигнала, дБм	Pout	9	–
Максимальная частота сигнала на аналоговом входе СТ1, МГц	f_{max} СТ1	–	500
Максимальная частота сигнала на цифровом входе СТ2, МГц	f_{max} СТ2	–	400
Минимальная частота сигнала на аналоговом входе СТ1, МГц	5861ПЦ1У	f_{min} СТ1	10
	5861ПЦ2У		30
Минимальная частота сигнала на цифровом входе СТ2, МГц	5861ПЦ1У	f_{min} СТ2	10
	5861ПЦ2У		30
Уровень ослабления входного сигнала в режиме запаривания, дБ	KISR	30	–
Уровень ослабления выходного сигнала в режиме запаривания, дБ	KOSR	90	–
Уровень вносимых фазовых шумов в спектр выходного сигнала, дБ/Гц	F_n	–	–140
Время включения (выключения), нс	t_{on} (t_{off})	–	50
Температурный диапазон, °С	T_a	–60	+125

Первые два делителя корпусированы в Н04.16-1В, делитель с переменным коэффициентом деления — в корпус Н16.48-1В.

Компания-дистрибьютор Lansdale Semiconductor предлагает 12 моделей предделителей с переключаемыми коэффициентами деления, разработанных компанией Motorola. Наиболее высокочастотная модель ML12079 действует на частотах 0,1–2,8 ГГц и имеет выбираемый коэффициент деления 64/128/256. Самая низкочастотная модель делителя ML12009 имеет коэффициент деления 5/6 и работает на частотах до 480 МГц. Три модели предделителей ML12054А (2 ГГц), ML12052 и ML12038 (1,1 ГГц) имеют двойной переключаемый коэффициент деления 64/65 или 128/129. Напряжение питания делителей составляет 4,5–5,5 В, компания использует пластиковые корпуса SO или DIP.

Технологии с использованием арсенида галлия (GaAs)

Арсенид галлия (GaAs) традиционно рассматривается как основной перспективный материал для создания СВЧ-приборов.

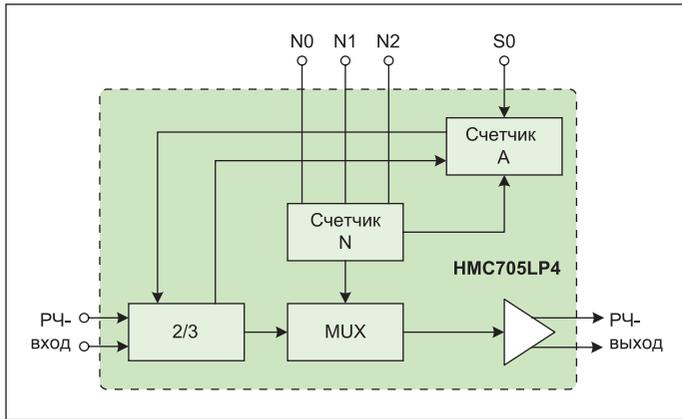


Рис. 5. Структура микросхемы HMC705LP4 и HMC705LP4E

В настоящее время при использовании компонентов на GaAs развиваются прежде всего гетероструктуры AlGaAs/GaAs, InGaAs/GaAs и созданные на их базе биполярные транзисторы (HBT) и полевые транзисторы с барьером Шоттки (HEMT).

Компания Hittite Microwave выпускает линейки сверхскоростных цифровых и логических (High Speed Digital Logic) монолитных микросхем пс-диапазона с использованием арсенид-галлиевых технологий. В частности, компания предлагает делители с программируемым коэффициентом деления и делители частоты тактовых последовательностей.

Набор предлагаемых сверхскоростных логических ИС компании Hittite Microwave соответствует потребностям современной высокоскоростной электроники сверхвысокого (пс) быстродействия. Микросхемы выполнены на основе GaAs биполярных транзисторов, имеют дифференциальные входы и выходы и допускают программирование уровня выходных сигналов.

На рис. 5 приведена структура малошумящего программируемого GaAs HBT делителя частоты HMC705LP4 (E), который производится в 24-выводном корпусе для поверхностного монтажа размером 4×4 мм. Делитель может быть перепрограммирован для деления входного синусоидального или импульсного сигнала с частотами 0,1–6,5 ГГц на любое число, в пределах 1–17, при этом выходная мощность устройства изменяется, что иллюстрирует рис. 6.

Величина входной мощности лежит в диапазоне $-15...+10$ дБм, выходная мощность при делении на 2 равна 0 дБм. Величина шума для входной частоты 6 ГГц и коэффициента деления 17 составляет 153 дБн/Гц. При номинальном напряжении питания 5 В потребляемый ток составляет 190 мА.

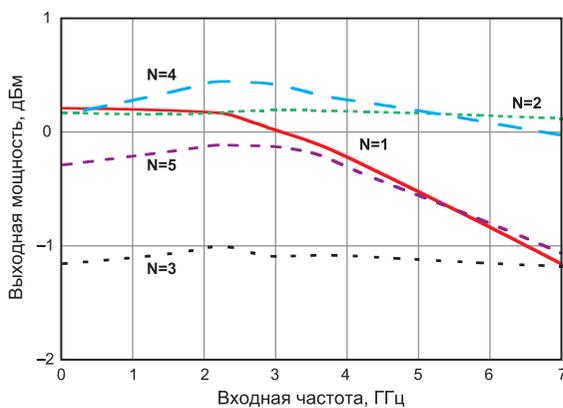


Таблица 5. Делители частоты тактовых импульсов

Модель	$f_{\text{вх}}$, ГГц	$K_{\text{дел}}$	Время задержки, пс	Время нарастания/спада, пс	$U_{\text{вых}}$, В	$P_{\text{потр}}$, мВт
HMC791LC4B	28	2/4	—	12/14	0,6	660
HMC859LC3	26	8	146	9/17	0,8–1,8	320
HMC959LC3	26	4	121	19/19	0,8–1,8	281

Для получения полного ряда коэффициентов деления в устройстве используются специальные схемные решения, в частности импульсные обратные связи в цепочке триггеров. Рис. 7 иллюстрирует происходящее при этом изменение скажности выходных импульсов.

Высокая рабочая частота HMC705LP4E наряду с низким уровнем фазового шума позволяют разработчикам реализовывать высокоэффективные архитектуры быстродействующих синтезаторов частот.

На основе GaAs компания Hittite Microwave выпускает ряд делителей частоты тактовых последовательностей (Clock Dividers), задающих временную последовательность логических и цифровых устройств. Основные характеристики делителей частоты для логических устройств приведены в таблице 5. Микросхемы выпускаются с коэффициентом деления 2, 4 и 8 и способны работать с очень высокими частотами 26 и 28 ГГц. Микросхемы выполнены в сверхминиатюрных керамических корпусах, рассчитанных на поверхностный монтаж, дающий минимальную паразитную индуктивность выводов. Тип корпуса указан в конце наименования микросхемы.

Структуры делителей HMC859LC3 и HMC959LC3, приведенные в [7], отличаются только коэффициентами деления.

На рис. 8 видно, что наряду с собственно делителями на основе триггера со счетным запуском в составе микросхемы предусмотрены входной и выходной сверхширокополосные усилители с дифференциальными входами и выходами. Именно они обеспечивают очень малое время нарастания и спада выходных импульсов. Дифференциальный вход и выход обеспечивают возможность работы как с однопроводными линиями передачи, так и с двухпроводными линиями типа «витая пара». Волновое сопротивление таких трактов 50 Ом.

M/A-COM Tech Asia (Mimix Broadband) является производителем полупроводников, работающих на частотах до 50 ГГц, выполненных по технологиям GaAs, InGaP. Компания предлагает СВЧ-транзисторы (бескорпусные, малошумящие, большой и средней мощности), усилители (МШУ, буферные, с выходной мощностью до 10 Вт), СВЧ ИС для приемопередатчиков, частотные делители и умножители, фазовращатели, коммутаторы, цифровые аттенюаторы, генераторы. Компания разработала несколько моделей GaAs делителей частоты на 4, основные сведения о которых представлены в таблице 6.

Компания Keysight Technologies производит 18 моделей GaAs HBT MMIC делителей частоты и пределителей с фиксированными ко-

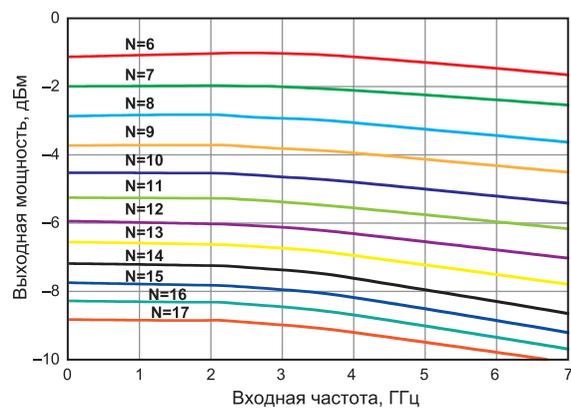


Рис. 6. Зависимость выходной мощности делителя HMC705LP4 от частоты при различных коэффициентах деления N

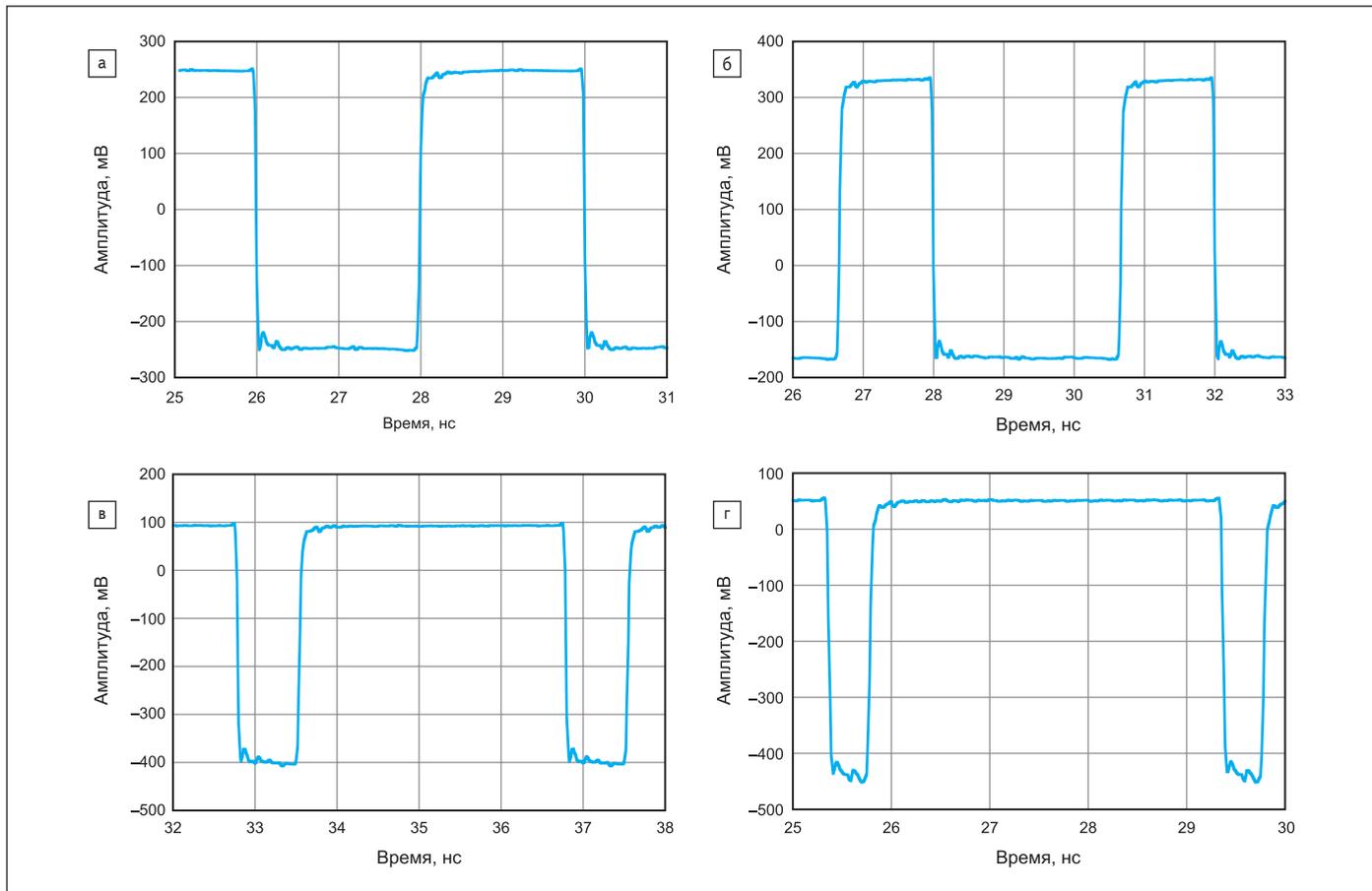


Рис. 7. Форма выходного импульсного сигнала при изменении коэффициента деления:
 а) $K_{дел} = 2$ ($f_{вх} = 500$ МГц); б) $K_{дел} = 3$ ($f_{вх} = 750$ МГц); в) $K_{дел} = 10$ ($f_{вх} = 2500$ МГц); г) $K_{дел} = 17$ ($f_{вх} = 4250$ МГц)

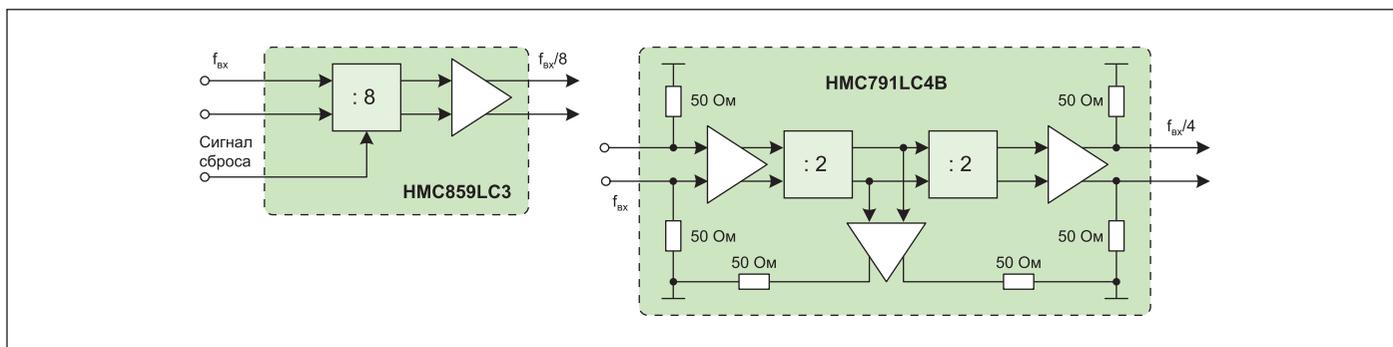


Рис. 8. Структуры делителей частот тактовых последовательностей HMC859LC3 и HMC791LC4B

эффициентами деления 2, 4, 8. Компоненты могут быть использованы в радиооборудовании высокочастотных систем связи, СВЧ-приборах и радиолокационных системах РЭБ. Делители работают в диапазоне

0–16 ГГц и имеют большое окно чувствительности входной мощности и низкий уровень фазового шума. Для делителей частоты

компания использует два вида конструктивного выполнения: некорпусированные ИС и пластиковый SOIC-корпус.

Таблица 6. Делители частоты на 4, выпускаемые компанией M/A-COM Tech Asia GaAs

Модель	$F_{вх}$, ГГц	$P_{вх}$, дБм	$P_{вых}$, дБм	$U_{порт}$, В/ $I_{порт}$, мА	Конструктив
XE1000-BD	2–16	-20...+5	+5	5/110	Бескорпусной (Die)
XE1001-BD	2–19	-20...+5	0	5/80	Бескорпусной (Die)
XE1001-QT	2–19	-20...+5	0	5/80	QT 3×3 мм
8SDV0500	2–16	-20...+5	+5	7/150	Бескорпусной (Die)

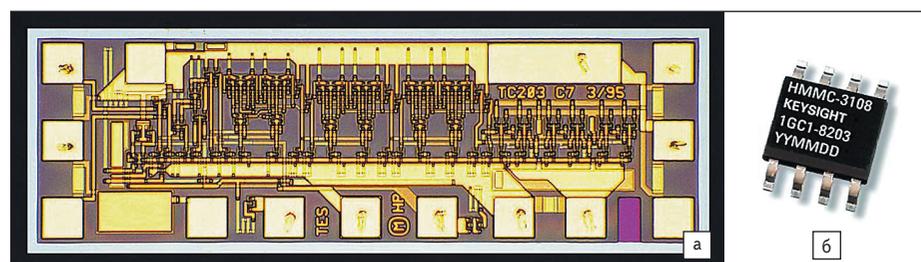


Рис. 9. Делители частоты HMMC-3008 и HMMC-3108-TR1 компании Keysight: а) топология ИС; б) внешний вид

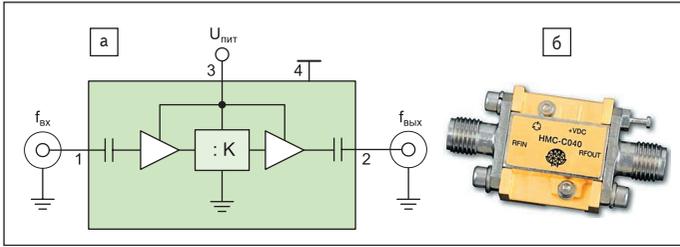


Рис. 10. Статические делители InGaP GaAs HBT компании Analog Devices: а) структура; б) внешний вид

Таблица 7. Параметры ДЧ с применением фосфида индия (InP)

Публикация	$f_{вх}$ (max), ГГц	SOF, ГГц	Технология	$P_{полт}$ мВт ($U_{пит}$ В)
[1]	200,6	н/д	0,25 мкм, InP DHBT	228 (-6)
[2]	150	86	450-ГГц ГТ InP	н/д
[3]	143,6	95	400-ГГц ГТ InP	90
[4]	100	33	135-ГГц ГТ InP	750

Таблица 8. InGaP GaAs HBT статические делители компании Analog Devices

Модель	$f_{мин}-f_{max}$, ГГц	$K_{дел}$	$P_{вх}$, дБм	$P_{вых}$, дБм	Фазовый шум (100 кГц), дБн/Гц	$U_{пит}$ В/ I, мА	Корпус/ разъем
HMC-C005	0,5–18	2	-15...+10	-4	-150	+5/75	C-1/SMA
HMC-C006	0,5–18	4	-15...+10	-4	-150	+5/93	C-1/SMA
HMC-C007	0,5–18	8	-15...+10	-4	-150	+5/98	C-1/SMA
HMC-C039	0,5–18	5	-15...+10	-1	-155	+5/80	C-1/SMA
HMC-C040	0,5–17	10	-15...+10	-1	-155	+5/152	C-1/SMA

В качестве примера топологии ИС и ее корпусирования на рис. 9 показаны GaAs HBT СВЧ-делители частоты на 8 компании Keysight Technologies, работающие в диапазоне частот 0–16 ГГц. Делитель HMMC-3008 выпускается в некорпусированном варианте, размер подложки 1330×440 мкм. Делитель HMMC-3108-TR1 выполнен в пластиковом SOIC-корпусе с 8 выводами. Для работы устройств необходим единственный источник питания 4,5–6,5 В.

Применение фосфида индия (InP)

В качестве исходного полупроводникового материала при создании сверхвысокочастотных транзисторов все чаще используется химическое соединение индия и фосфора — фосфид индия (InP). По высокочастотным свойствам материал превосходит арсенид галлия. Для биполярных HBT-транзисторов с использованием технологий на основе InP максимальными значениями рабочих частот статических делителей частоты, о которых сообщалось в публикациях (табл. 7), являются 200,6 [1] и 150 ГГц [2].

Компания Analog Devices предлагает ряд ранее разработанных Hittite Microwave Corporation модульных малошумящих статических делителей частоты с коэффициентами деления 2–10, выполненных по технологии InGaP GaAs HBT (табл. 8). Имеющие одинаковую внутреннюю структуру делители корпусированы в миниатюрные, герметичные модули со сменными разъемами SMA размером 35,3×17,8×7,4 мм (рис. 10). Устройства работают в диапазоне входных частот 0,5–18 ГГц с помощью одного источника питания +5 В. Низкий уровень добавленного фазового шума, не хуже -150 дБн/Гц при отстройке 100 кГц, позволяет пользователю реализовывать хорошие шумовые характеристики РЧ-системы. Диапазон рабочих температур делителей составляет -55...+85 °С.

Делители частоты СВЧ-диапазона

В разделе изложены краткие сведения о РЧ-делителях частоты, для которых компании-производители не детализируют информацию о применяемых полупроводниковых технологиях.

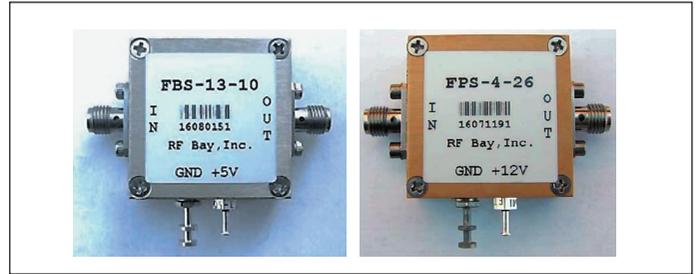


Рис. 11. Конструктивное выполнение делителей частоты компании RF Bay

Успешным производителем на рынке РЧ-делителей частоты является компания RF Bay, чья штаб-квартира расположена в Gaithersburg, США. Производитель предлагает более 70 моделей РЧ-делителей частоты/предделителей (Frequency Divider/Prescaler) серий FPS, FBS/FAS/FDS/FPS. Внешний вид из изделий этих модельных рядов, показанный на рис. 11, практически одинаков.

Уровень шума для подавляющего числа моделей составляет -144 дБн/Гц при отстройке 100 кГц. Напряжение питания ДЧ равно 12 В, кроме нескольких наиболее высокочастотных устройств с питанием от источника 5 В. Делители размещаются в корпусах размером 31,75×31,75×14,29 мм с использованием соединителей SMA.

Выпускаемые компанией ДЧ делятся на несколько групп в соответствии с частотным рабочим диапазоном и функциональными особенностями:

- Заказные (Custom Made) делители частоты/предделители с рабочим диапазоном частот до 10 ГГц. В этой группе компания предлагает две модели делителей: FBS-N-7 с рабочими частотами 0,2–7 ГГц и FBS-N-10 на частоте 4–10 ГГц. Коэффициенты деления этих моделей фиксированные и могут быть предустановлены в пределах 8–511. Выходная мощность делителей равна +4 дБм, уровень шума -150 дБн/Гц при расстройке 100 кГц, потребляемый от 5-В источника ток 160 мА.
- Заказные делители частоты/предделители с применением до 50 ГГц. Три модели серии FAS/FCS/FDS, работающие в диапазоне 0,1–50 ГГц (табл. 9).

Таблица 9. Заказные ДЧ/предделители (Custom Frequency Divider/Prescaler) до 50 ГГц

Модель/серия	$f_{вх}$, ГГц	$K_{дел}$	$P_{вх}$, дБм	$P_{вых}$, дБм	Шум (100 кГц), дБн/Гц	$U_{пит}$ В/ $I_{пит}$, мА
FAS-N	0,1–50	2–256	-20...+17	+12	-144	12/70
FCS-N	0,1–50	2–256	-20...+17	TTL/CMOS	-144	12/70
FDS-N	0–50	2–256	TTL/CMOS	TTL/CMOS	-144	12/70

- Делители частоты/предделители диапазона 4 ГГц, 23 модели с рабочими частотами 300 МГц – 4 ГГц. Коэффициент деления у моделей фиксированный, он равен 16 для модели FPS-16-4, а наибольший коэффициент 1024 имеет делитель FPS-1020-4. Уровень шума для всех моделей составляет -144 дБн/Гц при расстройке 100 кГц. Напряжение питания 12 В.
- Делители частоты/предделители диапазона 6 ГГц, 11 моделей с рабочими частотами 0,5–6 ГГц. Коэффициенты деления фиксированные, минимальный равен 45 у модели FPS-45-6, наибольший 1280 у модели FPS-1280-6.
- Делители частоты/предделители диапазона 8 ГГц, 21 модель с рабочим диапазоном 0,8–8 ГГц, у пяти моделей с наименьшими коэффициентами деления (3, 5, 9, 15, 25) диапазон 0,1–8 ГГц.
- Делители частоты/предделители диапазона 13 ГГц, 9 моделей. Частоты 100 МГц — 12 ГГц, а для ряда моделей — 13 ГГц. Коэффициенты деления от 2 (модель FPS-2-12) до 40 (модель FPS-40-12).
- Делители частоты/предделители с применением до 26 ГГц. Верхняя граница рабочего диапазона 11 моделей ДЧ этой группы различна и лежит в пределах 15–20 ГГц. Коэффициенты деления у моделей фиксированные и лежат в пределах от 2 (модель FPS-2-15) до 9 (модель FPS-9-15).

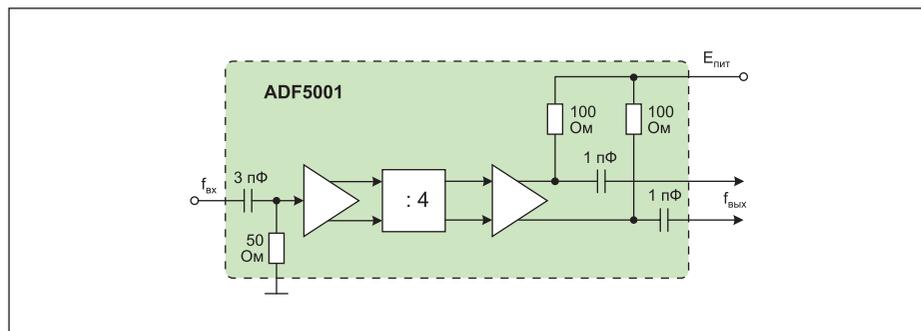


Рис. 12. Структура делителя ADF5001

Таблица 10. СВЧ-делители частоты серии ADF5000 компании Analog Devices

Модель	$f_{\text{раб}}$, ГГц	$K_{\text{дел}}$	$P_{\text{вх}}$ (min), дБм	$P_{\text{вх}}$ (max), дБм	$P_{\text{вых}}$, дБм	Шум (100 кГц), дБн/Гц
ADF5000	4–18	2	-10	10	-5	-147
ADF5001	4–18	4	-10	10	-5	-150
ADF5002	4–18	8	-10	10	-5	-153

Наиболее высокочастотная модель FPS-4-26 работает в диапазоне 10–26 ГГц с коэффициентом деления 4. Уровень шума выходного сигнала -150 дБн/Гц при расстройке 100 кГц. Входная мощность составляет -15...+10 дБм, выходная равна -4 дБм. Ток, потребляемый от источника 12 В, равен 100 мА.

Компания Analog Devices предлагает 34 модели делителей частоты, предварительных делителей и счетчиков как собственной разработки, так и производства присоединенной компании Hittite, предназначенных для различных отраслей и областей применения. Продукты этой линейки обладают программируемым коэффициентом деления, малым аддитивным фазовым шумом, помогающим добиться превосходных показателей шума в системе, а также несимметричными входом и выходом, что сокращает количество компонентов системы и ее стоимость.

Компания выпускает три модели СВЧ-делителей частоты серии ADF5000 с фиксированными коэффициентами деления 2, 4 или 8 для использования в диапазоне рабочих частот 4–18 ГГц. Краткие сведения об этих делителях приведены в таблице 10.

Внутренняя структура делителей серии, показанная на рис. 12, одинакова и различается только коэффициентом деления.

На входе делителя имеется разделительный конденсатор 3 пФ и согласующий резистор 50 Ом. Выход микросхемы — дифференциальный с нагрузочными резисторами 100 Ом и разделительными конденсаторами 1 пФ. Это позволяет подключать его к дифференциальным входам синтезатора на основе ФАПЧ, например ADF4156 или ADF4106. Напряжение питания составляет 3,3 В, а ток потребления 26 мА. ADF5001 предназначен для работы в качестве предделителя частоты с синтезаторами ФАПЧ, в измерительном и РЧ-оборудовании.

Компания Analog Devices предлагает более 30 моделей ранее разработанных корпора-

цией Hittite сверхширокополосных делителей частоты. Коэффициент деления частоты различных моделей составляет 2–5, 8 или 16. Входной сигнал может быть гармоническим, а выходной является двухуровневым с размахом 4,5 В.

Все модели делителей частоты являются активными, они содержат входной и выходной усилители и между ними двухуровневый делитель частоты. Большинство делителей частоты обеспечивает на выходе два противофазных выходных колебания прямоугольной формы, причем их уровень практически не зависит ни от рабочей частоты, ни от температуры окружающей среды в диапазоне -40...+85 °С. Делители частоты кратностью до 64 встраиваются в новые изделия корпорации: частотно-фазовые детекторы, ГУН миллиметрового диапазона, источники колебаний с фазовой синхронизацией. Краткие характеристики о ряде ДЧ, разработанных компанией, приведены в таблице 11.

Таблица 11. Сверхширокополосные делители частоты Hittite

Модель	$f_{\text{вх}}$, ГГц	$K_{\text{дел}}$	$P_{\text{вх}}$, дБм	$P_{\text{вых}}$, дБм	Шум (100 кГц), дБн/Гц	$U_{\text{пит}}$, В / I, мА	Корпус, конструкция
НМС394	0,1–2,2	2–32	-15...+10	4	-153	5/194	24 вывода 4×4 мм QFN
НМС447	10–26	4	-15...+10	-4	-150	5/96	3×3 мм SMT
НМС494	0–18	8	-20...+10	-4	-150	5/103	16 выводов 3×3 мм QFN
НМС794	0,2–2	1, 2, 3, 4	-2...+10	10	-160	5/135	16 выводов 3×3 мм SMT
НМС862A	0,1–15	1, 2, 4, 8	-10...+10	2	-153	5/105	16 выводов 3×3 мм SMT
НМС983	0–7	ДДПКД, 20 бит	-15...-30	-	-160	5 (3,3)/ 104–122	LP5 32 вывода, 5×5 мм

Таблица 12. Модульные делители частоты, производимые компанией Wenzel Associates

Модель	Описание	$f_{\text{вх}}$, МГц	$K_{\text{дел}}$	$P_{\text{вх}}$ (max), дБм	Фазовый шум, дБн/Гц	$I_{\text{пот}}$, мА
LNFD	Маломощный ДЧ, регулятор $U_{\text{пит}}$	5–100 (фикс.)	2 или 4	+13	-167 (пересчитанный к выходу)	60
LNFD2	Маломощный ДЧ, регулятор $U_{\text{пит}}$	0,01–500	2–13 (синус или КМОП логический)	+13	-165	50
LNFDN	Логическая схема (Square-Up Circuit) и регулятор $U_{\text{пит}}$	5–100 (фикс.)	2–256	+13	-165	60
LNPDN	Логическая схема и регулятор $U_{\text{пит}}$. Коэффициент деления изменяется с помощью внешних переключателей	<700 (фикс.)	2–256	+10	-150, без очистки (No Clean-Up), до 700 МГц, -170, с очисткой, до 200 МГц	250

Наиболее высокочастотная модель НМС447, действующая на частотах 10–26 ГГц, имеет фиксированный коэффициент деления 4. В программируемом делителе частоты НМС394 с коэффициентом деления 2–32 используется параллельная установка пяти разрядов кода коэффициента деления. Размах выходного двухуровневого сигнала составляет 800 мВ с фронтами менее 100 пс. Следует отметить и делители НМС794 (0,2–2 ГГц) и НМС983 (0–7 ГГц), имеющие уровень шума -160 дБн/Гц при отстройке 100 кГц. При этом программируемый 20-бит ДДПКД НМС983 имеет встроенный конфигурируемый 48-бит $\Sigma\Delta$ -модулятор, обеспечивающий уровень побочных составляющих -90 дБн.

Для снижения уровня паразитных частотных компонентов на входе и выходе ДЧ могут использоваться полосовые фильтры. Так поступает компания Wenzel Associates, устанавливая полосовые фильтры на входе и выходе выпускаемых модулей LNFD деления на два или четыре (табл. 12). Применяемый усилитель входного сигнала позволяет работать с уровнями сигнала 0...+20 дБм. Напряжение питания модулей равно 15 В. Ряд делителей содержит схемы очистки сигнала (noise clean-up circuit), которые позволяют уменьшать уровень фазового шума в выходном сигнале.

На рис. 13 показан модуль LNFD, который представляет собой делитель частоты с коэффициентом деления 2 или 4 для входных частот до 100 МГц. Этот модуль содержит делитель, выходной полосовой фильтр для подавления гармоник и маломощный регулятор напряжения для подавления паразитных составляющих по питанию. Форма выходного сигнала может быть синусоидальной или прямоугольной. Выходной полосовой фильтр может быть включен в соответствии с требованиями разработчика или обойден для широкополосного сигнала при

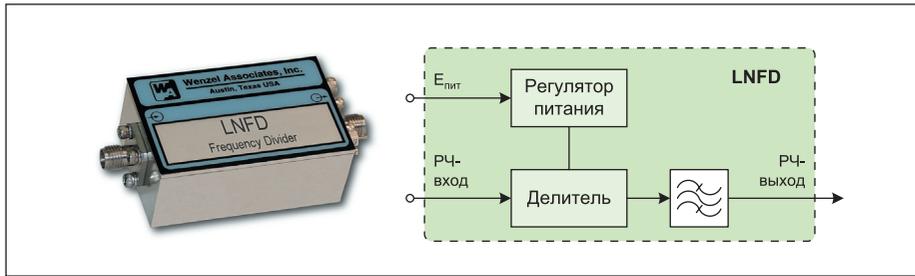


Рис. 13. Внешний вид модуля деления частоты LNFD и его структура

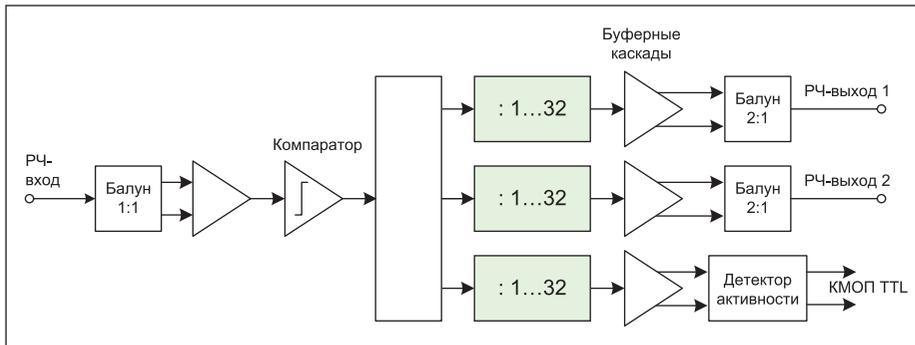


Рис. 14. Структура модуля делителя частоты 3008 компании Valon Technology

TTL-совместимом сигнале прямоугольной формы. Компоненты делителя интегрированы в единый никелированный алюминиевый корпус размером 50,8×31,7×20,3 мм.

Примером комплексной разработки делителя частоты, доведенной до стадии промышленного образца, является модуль делителя частоты 3008 компании Valon Technology. Структура модуля показана на рис. 14.

Модуль 3008 работает в широком диапазоне входных частот и имеет три независимых, выбираемых пользователем, отдельных по частоте выходы. Модуль может быть использован с любым источником синусоидального сигнала или меандра, 5 МГц – <2 ГГц.

Шестнадцать доступных коэффициентов деления выбираются пользователем с помощью аппаратных переключателей (рис. 15). Доступные коэффициенты деления: 1–6, 8–10, 12, 15, 16, 18, 24, 30, 32. Использование деления на 1 полезно при буферизации ка-

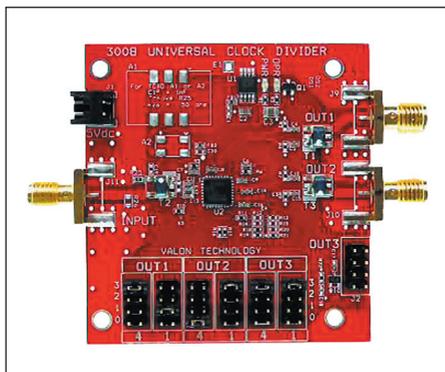


Рис. 15. Конструктивное выполнение модуля деления 3008

скадов и формировании прямоугольной формы РЧ-сигнала низкого уровня.

Выходы делителя РЧ снабжены разъемами SMA. Третий выход делителя совместим с КМОП 3.3V TTL. Модуль делителя может использовать входной сигнал широкого диапазона: ниже –30...+13 дБм. Встроенная схема индикации активности обнаруживает, что делитель функционирует и реальный входной сигнал присутствует.

Модуль делителя 3008 может использоваться с любым РЧ или цифровым источником сигнала. Он удобен для использования с СВЧ-синтезаторами частот, в том числе производимыми компанией Valon Technology моделями 5007, 5008 или 5009, если нужно расширить низкочастотный диапазон работы вплоть до 5 МГц. Тщательная проработка схемотехники и компоновка модуля обеспечивают низкий добавленный вклад в джиттер (дрожание фазы), фазовые шумы и спектральную чистоту выходного сигнала.

Федеральное государственное унитарное предприятие «НПП Исток» разработало 13 моделей делителей частоты на 2 СВЧ-диапазона. Параметры устройств приведены в таблице 13. Делители выпускаются в двух вариантах исполнения: на основании (тип 1) и без него (тип 2); габаритные размеры 7,5×12×2 мм и 7,5×6 мм соответственно. Масса 0,6 г (для типа 1) и 0,4 г (для типа 2). Конструкция изделий — модульная, гибридно-монолитная. Входы/выходы делителя — микрополоски шириной 0,5 мм с волновым сопротивлением 50 Ом. Коэффициент деления больше 2 обеспечивается каскадным соединением N делителей частоты на 2, где N = 1,2 для частот 2–8 ГГц; N = 1, 2, 3 для частот 8–12 ГГц. При отключе-

Таблица 13. Делители частоты на 2 «НПП Исток»

Модель	Рабочие частоты, ГГц	$P_{вх}$, мВт	$P_{вых}$, мВт
M43301_1	1–2	4–16	1–6
M43301_2	1,5–3	4–16	1–6
M43301_3	2–4	5–20	2–8
M43301_4	3–5	5–20	2–8
M43301_5	4–6	5–20	2–8
M43301_6	5–7	5–20	2–8
M43301_7	6–8	5–20	2–8
M43301_8	7–9	5–20	2–8
M43301_9	8–10	10–30	2–8
M43301_10	9–11	10–30	2–8
M43301_11	10–12	10–30	2–8
M43301_12	7,2–8,2	5–20	4–16
M43301_13	3,6–4,1	4–16	5–15

нии входной мощности на выходе изделий паразитная генерация отсутствует.

Рабочее напряжение 5 В, потребляемый ток 45 мА. Средняя наработка на отказ составляет 80 000 ч, сохраняемость изделия 25 лет. КСВН нагрузки не более 1,5. Охлаждение изделий естественное, контактное, за счет теплоотвода на корпус изделия. Максимальная температура основания изделия — не более +85 °С.

Предделители

Предварительные делители частоты, или предделители (prescaler), иногда называемые в отечественной литературе прескалерами, представляют собой счетные электронные схемы, используемые для уменьшения частоты высокочастотного колебания путем целочисленного деления.

Предделители широко применяются в СВЧ-синтезаторах, выполненных на основе петель ФАПЧ, для снижения частоты выходного сигнала перед подачей его на тракт приведения.

Двумодовые делители

В современных синтезаторах делители частоты, как правило, построены на базе делителей с двойным переключаемым коэффициентом деления ДвПКД (Dual-Modulus Dividers). Иногда для характеристики таких делителей используют термины «двухмодульные» или «двумодовые делители». Возможные коэффициенты деления N/N+1 в таких делителях отличаются, как правило, на единицу и жестко конструктивно заданы. Предварительный делитель в таком случае имеет переключаемый целочисленный коэффициент деления: N или N+1, например 3/4, 10/11, 16/17, 32/33.

Схемотехнически предделитель состоит из поглощающего счетчика (Swallowing Counter) и предварительного делителя с ДвПКД (рис. 16).

Предделитель (Prescaler) делит частоту входного сигнала на N+1 или N в соответствии со значением сигнала управления модулем. Программный счетчик (Program counter) делит выходной сигнал преддели-

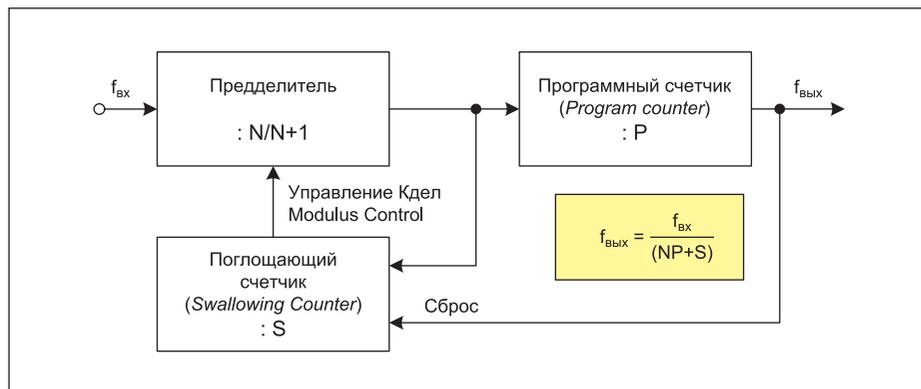


Рис. 16. Структура ДвПКД предделителя частоты

мирует выходной сигнал амплитудой 400 мВ при работе с 50-Ом нагрузкой приемника.

На 50-омные дифференциальные входы могут быть поданы сигналы RSECL, ECL, LVDS, LVCMOS, LVTTTL и CML (рис. 20). Внутри делителя используется 8-битный программируемый счетчик, работающий на частотах более 3,5 ГГц. В делителе могут быть реализованы коэффициенты деления 2–256. Вход SEL используется для выбора двух кодовых слов Pa (0:7) и Pb (0:7), которые определяют коэффициенты деления и временные соотношения работы ДЧ и хранятся в двух регистрах REGa и REGb соответственно. При необходимости может быть использован внутренний дифференциальный генератор тактовых импульсов. В NB7N017M предусмотрен дифференциальный выход терминального счетчика TC.

Компания Pasternack предлагает пять моделей предделителей в коаксиальном модульном исполнении со сменными (Field Replaceable) SMA-разъемами: предделитель с коэффициентом деления на 10 (PE88D1000), на 8 (PE88D8000), на 5 (PE88D5000), на 4 (PE88D4000), на 2 (PE88D2000).

Наибольший коэффициент деления, равный 10, имеет модуль PE88D1000, который представляет собой малошумящий статический предделитель (Static Prescaler Module) с широкой полосой рабочих входных частот

теля на фиксированный коэффициент P и определяет длительность рабочего цикла. Поглощающий счетчик (Swallowing Counter) делит выходной сигнал предделителя на программируемый коэффициент S.

После сброса предделитель делит частоту входного сигнала на N+1, пока поглощающий счетчик не будет заполнен. После прохождения (N+1)S входных импульсов сигнал управления изменяет коэффициент деления предделителя на N. Устройство продолжает считать, пока программный счетчик не заполнится, достигнув числа счета P. Общее число импульсов, поступивших на вход $f_{вх}$ в рабочем цикле, равно $(N+1)S+N(P-S) = NP+S$. Таким образом, коэффициент деления предделителя равен $NP+S$.

В качестве простого примера реализации ДвПКД предделителя на рис. 17 приведена функциональная схема делителя 2/3 и эюры, поясняющие его функционирование. Если уровень MC = 0, логический элемент ИЛИ (OR Gate) открыт, сигнал с информационного входа проходит на выход без ограничения, и коэффициент деления равен 3. Если уровень MC равен 1, уровень A устанавливается тоже в 1, уровни B и C равны, и цепь вырождается в схему деления на два.

Интегральный двумодовый предделитель LMX5080 компании Texas Instruments, структура которого приведена на рис. 18, предназначен для использования в трактах синтеза беспроводных передатчиков диапазона 2,5 ГГц. Он изготовлен с использованием процесса ABiCV silicon BiCMOS.

LMX5080 обеспечивает три режима работы двумодового предделителя. Особенностью данного предделителя является то, что устанавливаемый коэффициент деления изменяется на 2: 128/130, 256/258 или 512/514. От синтезатора или контроллера на предделитель подается сигнал MC для установки коэффициента деления на N или N+2 (рис. 19).

Выход LMX5080 CMOS оптимизирован для создания очень стабильных выходных сигналов с низким уровнем шума коммутации. Предделитель может быть использован в сочетании с низкочастотой ФАПЧ для создания синтезаторов частот диапазона 0,1–2,7 ГГц, пригодных для СВЧ-передатчиков.

Напряжение питания может находиться в диапазоне 2,7–5,5 В. LMX5080 имеет низкое потребление тока, обычно 7 мА при $U_{пит} = 5$ В, корпусирован в 8-контактный малогабаритный SOP пластиковый корпус для поверхностного монтажа. Диапазон рабочих температур $-40...+85$ °С.

Высокоскоростной 8-битный модуль двумодового программируемого делителя/предделителя NB7N017M от компании ON Semiconductor способен работать на частотах выше 3,5 ГГц. Выходная цепь содержит внутренний резистор 50 Ом, подключаемый к источнику питания. Устройство фор-

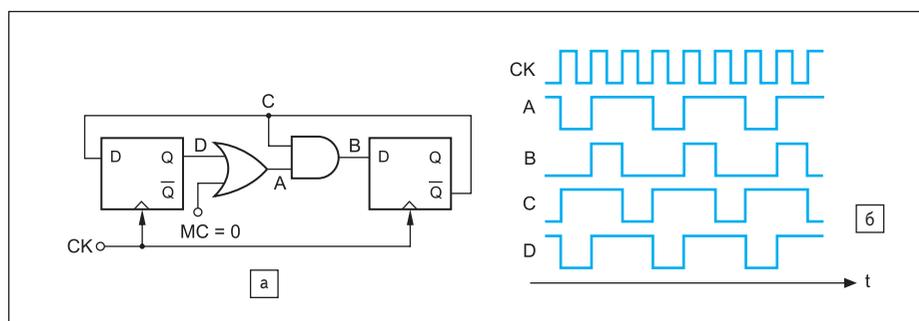


Рис. 17. ДвПКД делителя 2/3: а) структура; б) эюры, поясняющие его функционирование в режиме деления на 3

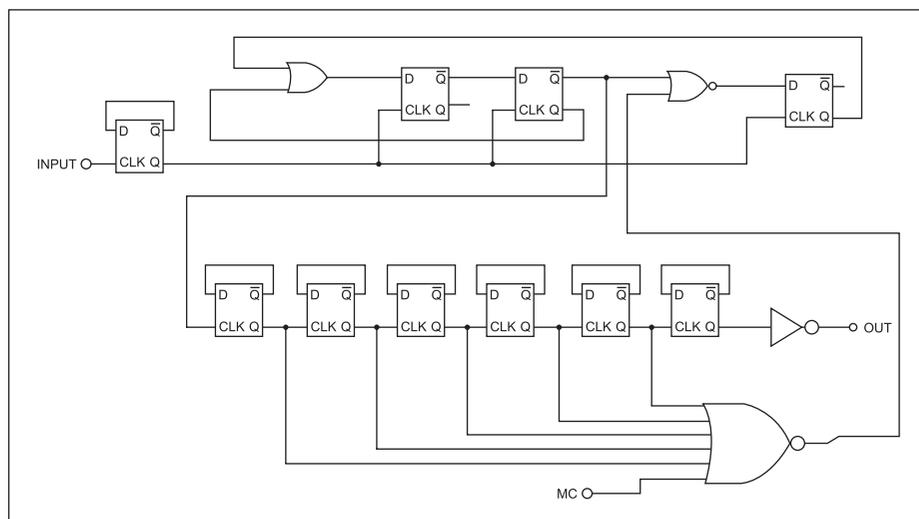


Рис. 18. Двумодовый предделитель LMX5080 компании Texas Instruments диапазона 2,5 ГГц

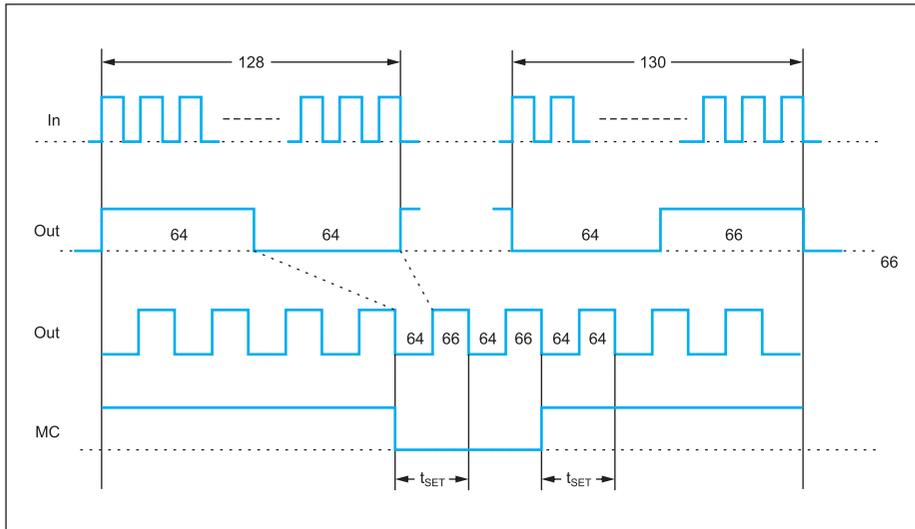


Рис. 19. Временная диаграмма, поясняющая работу LMX5080 в режиме 128/130

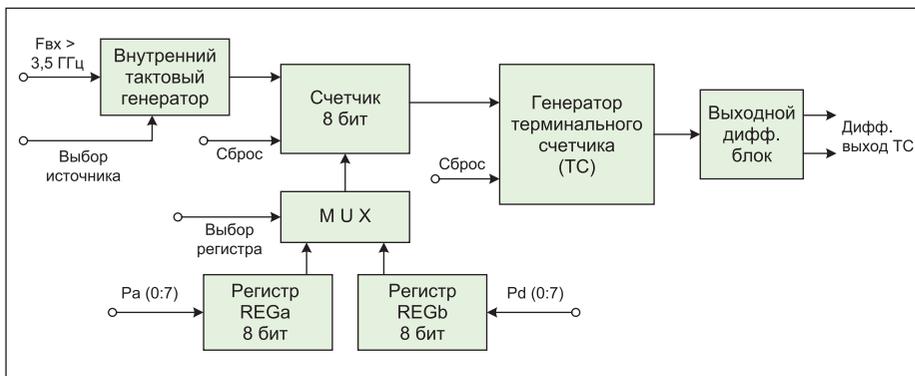


Рис. 20. Структура предделителя NB7N017M от компании ON Semiconductor

0,5–18 ГГц. В делителе используется усовершенствованная полупроводниковая технология GaAs HBT MMIC, которая обеспечивает низкий уровень фазового шума с типичным значением -155 дБн/Гц при отстройке 100 кГц. Типовое значение уровня выходной мощности составляет -1 дБм и обратной утечки (reverse leakage) до 85 дБ. Порты ввода и вывода согласованы на 50 Ом с конденсаторами блокировки по постоянному току. Для предделителей необходим один источник питания постоянного тока $+5$ В. Компактный

герметичный drop-in-корпус оснащен сменными SMA-разъемами (рис. 21). Все модели гарантированно соответствуют условиям испытаний MIL-STD-883 для герметичности и циклов температурных изменений.

Компания Inphi [8] предлагает на рынке ряд предделителей, работающих в диапазоне 0–25 ГГц. Это ДЧ на 2 (25671DV), на 4 (25675DV) и на 8 (25673DV). Для использования на частотах 0–50 ГГц предназначены предделители на 2/4 (50718DV) и на 8 (50728DV). Делители частоты разме-



Рис. 21. Предделители PE88D1000 и HMC-C005 в модульном исполнении

щаются в пластиковых корпусах QFN и требуют напряжения питания $+3,3$ В.

Литература

1. D'Amore M., Monier C., Lin S. T., Oyama B. et al. A 0.25 μm InP DHBT 200 GHz+ Static Frequency Divider // IEEE Journal of solid-state circuits. 2010. Vol. 45. No. 10.
2. Rodwell M. et al. Transistor and Circuit Design for 100–200 GHz ICs. JSSC, vol. 40, no. 10, Oct. 2005. pp. 2061–2069.
3. Hitko D. A. et al. A Low Power (45 mW/Latch) Static 150 GHz CML Divider. CSICS Digest, 2004.
4. Mokhtari M. et al. 100+ GHz Static Divide-by-2 Circuit in InP-DHBT Technology // JSSC. 2003. Vol. 38. No. 9.
5. Plouchart J. O. et al. Performance Variations of a 66 GHz Static CML Divider in 90 nm CMOS. ISSCC Digest, 2006.
6. Li L., Reynaert P., Steyaert M. A 60 GHz 15.7 mW static frequency divider in 90 nm CMOS. ESSCIRC, 2010.
7. Дингес С., Кочемасов В. Делители частоты. Часть 1. Основные сведения о делителях частоты // Компоненты и технологии. 2019. № 2.
8. www.inphi.com/docs/Inphi_Military_and_Aerospace_Solutions_Guide.pdf