

Делители частоты.

Часть 4. Регенеративные, переключаемые и малошумящие делители частоты

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

В четвертой, заключительной части публикации, посвященной обзору делителей частоты СВЧ-диапазона, рассматриваются регенеративные и малошумящие делители. Приводятся основные сведения о технических решениях, используемых при реализации делителей с переключаемыми диапазонами.

Регенеративные делители РЧД

Регенеративные, или динамические делители частоты РЧД (Regenerative Divider), называемые в англоязычных источниках делителями Миллера (Miller Divider), представляют собой замкнутую кольцевую структуру, содержащую преобразователь частоты сигнала. В структуре реализуется положительная обратная связь, что при подаче входного сигнала приводит к возникновению выходного колебания необходимой частоты.

В самом общем виде структурная схема регенеративного делителя частоты, поясняющая принцип его работы, показана на рис. 1. Такой делитель в минимальной конфигурации содержит замкнутые в петлю преобразователь частоты, фильтр и РЧ-усилитель.

Подлежащий делению входной сигнал с частотой $f_{вх}$ поступает на вход преобразователя частоты. Устанавливаемый на выходе преобразователя ФНЧ или полосовой фильтр используется для выделения полезной комбинационной составляющей $f_{вх}/2$ и подавления зеркальной частоты $3f_{вх}/2$. Если петлевое усиление на частоте $f_{вх}/2$

больше единицы, в устройстве на этой частоте возникают незатухающие колебания.

В регенеративных делителях используется идеальный преобразователь частоты, чье выходное напряжение пропорционально произведению двух сигналов: входного и поступающего с выхода делителя. В этом случае при отсутствии входного сигнала условие баланса амплитуд в петле не выполняется, возникновение стационарных колебаний в таком делителе невозможно, сигнал на выходе регенеративного делителя частоты существовать не может.

В регенеративных делителях частоты, которые могут рассматриваться как разновидность синхронизированных автогенераторов, деление частоты является результатом формирования в петле необходимой частотной компоненты, ее образование можно считать результатом последовательного выполнения двух операций: преобразования частоты с выделением необходимого частотного колебания и усиления колебаний с помощью усилителя.

Механизм возникновения колебаний в схеме такой же, как в автогенераторах. За счет действия флуктуаций в схеме возникают небольшие колебания разных частот. При выполнении условий баланса фаз и амплитуд в схеме происходит увеличение амплитуды колебаний определенной частоты до некоторого стационарного значения, определяемого имеющимися в схеме нелинейностями.

Структуры схмотехнически реализуемых регенеративных делителей с коэффициентом деления, отличным от двух, применяемые в серийно выпускаемых изделиях, приведены на рис. 2. В структуре, показанной на рис. 2а, в петлю введен множитель частоты на N . Если петлевое усиление в кольце на частоте $f_{вх}/(N+1)$ больше единицы, на этой частоте в устройстве возникают незатухающие колебания. Таким образом, в устройстве реализуется схема деления входной частоты $f_{вх}$ на $(N+1)$. Применяемый в устройстве полосовой фильтр

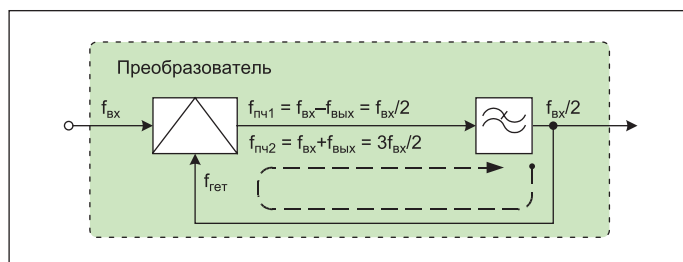


Рис. 1. Принцип работы регенеративного делителя частоты

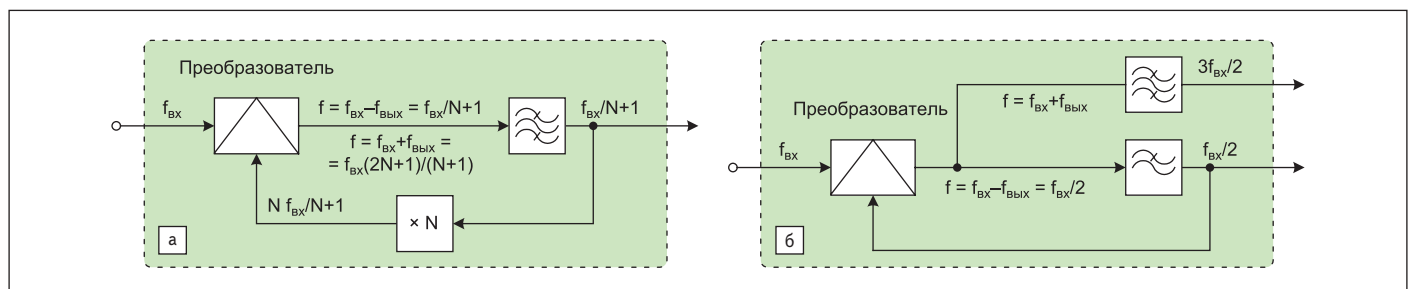


Рис. 2. Упрощенные структуры: а) регенеративного делителя с выходной частотой $f_{вх}/(N+1)$; б) двухчастотного делителя с выходными частотами $f_{вх}/2$ и $3f_{вх}/2$

необходим для подавления зеркальной частоты $f_{\text{вх}}(2N+1)/(N+1)$ на выходе преобразователя частоты. Потенциально регенеративные делители имеют очень низкий уровень шума.

Как было показано ранее на рис. 1, если в петле не применяется умножитель, частота входного сигнала делится на два. В регенеративных делителях частоты, особенно в осуществляющих деление на два, в качестве преобразователя частоты чаще всего используют кольцевые модуляторы, двойные балансные смесители на основе ячеек Гильберта (рис. 3), поскольку в отсутствие входного сигнала коэффициент передачи этих цепей равен нулю и самовозбуждение в схеме невозможно.

На рис. 3 проиллюстрированы варианты схемотехнической реализации РДЧ при подаче сигнала обратной связи на РЧ (рис. 3а) или гетеродинные (рис. 3б) входы преобразователя частоты.

Анализ научных публикаций показывает, что в настоящее время в ряде разработок регенеративных делителей, сведения о которых приведены в таблице 1, достигнуты рабочие частоты 300 ГГц [1]. Следует отметить регенеративный делитель диапазона 31–41, обладающий очень хорошей совокупностью параметров и характеристик [2]. Уникальным является и его энергопотребление — в публикации сообщается, что делитель работоспособен при напряжении питания 1,1 В и потребляет при этом всего 2 мА.

Ряд регенеративных делителей частоты на два, основные характеристики которых представлены в таблице 2, производит и предлагает на рынке компонентов компания Wenzel.

Эти модули содержат входной усилитель для использования в приложениях с малыми уровнями входной мощности в диапазоне 0...+3 дБм. Модуль включает малошумящий смеситель, фильтры, усилитель и делитель мощности. Модуль LNRD5 (рис. 4) имеет исключительно низкий уровень фазового шума. Типовая мощность шума при отстройке 100 кГц составляет -170 дБн/Гц (-168 дБн/Гц гарантирован на всех частотах), и шум замкнутой петли значительно ниже, чем при использовании лучших кварцевых источников, что делает, по заявлению производителя, LNRD5 почти идеальным делителем частоты. Этот делитель предназначен

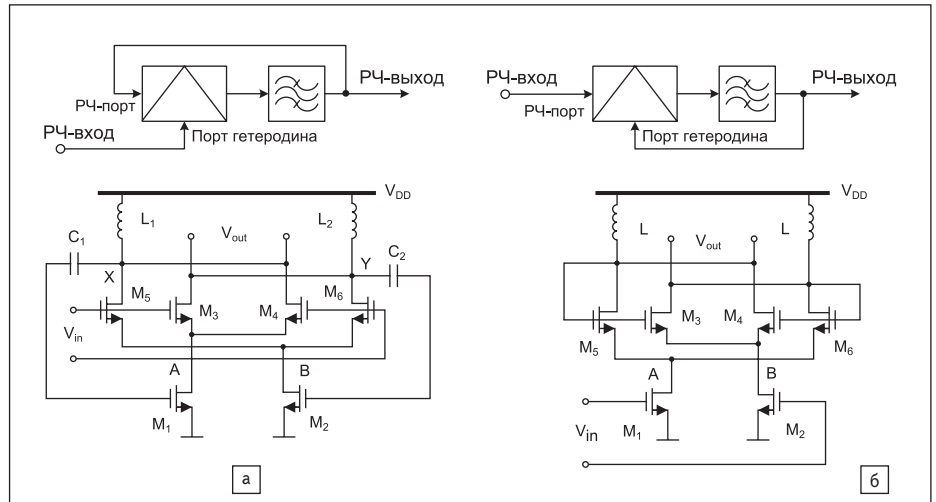


Рис. 3. Варианты введения сигнала обратной связи при использовании двойного балансного смесителя на основе ячейки Гильберта для реализации делителя: а) на РЧ-входы; б) на гетеродинные входы

Таблица 1. Характеристики регенеративных делителей частоты с максимально достигнутыми рабочими частотами

Публикация	$f_{\text{вх}}$, ГГц	$K_{\text{дел}}$	Технология	$(f_{\text{мин}}-f_{\text{макс}})/f_{\text{центр}}$, %	$U_{\text{пит}}$, В	$P_{\text{порт}}$, мВт
[1]	304,8–331,2	2	InP HBT ($f_t = 375$ ГГц)	8,2	4,1; 3,3	85,5
[3]	51–168	2	SiGe:C ($f_t = 215$ ГГц)	106	4	105
[4]	80–160	4	SiGe ($f_t = 225$ ГГц)	66	-5,5	650
[2]	31–41	2	CMOS, 80 нм	27	1,2	2,4

Таблица 2. Основные параметры малошумящих регенеративных делителей с частотами $f/2$

	LNRD5	LNRD6	LNRD7	LNRD8
Входная частота, ГГц	2–12	0,01–2	0,01–2	2–12
Уровень шума, дБн/Гц (100 кГц)	-168	-172	-172	-168
$P_{\text{вх}}$, дБм	0...+3	+20...+23	+10+20	+10...+13
$P_{\text{вых}}$, дБм	>+10	>+15	>+15	>+10
Ток при $U_{\text{пит}} = 15 \text{ В} \pm 2\%$, мА	<150	<100	200	<100
Размер корпуса, мм	63,5×38,1×13,9	50,8×31,7×20,3	76,5×31,7×20,3	63,5×38,1×13,9

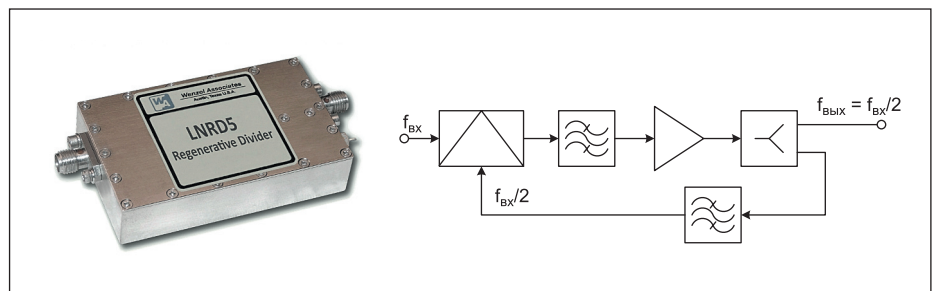


Рис. 4. Конструктивное выполнение и структура регенеративного делителя LNRD5

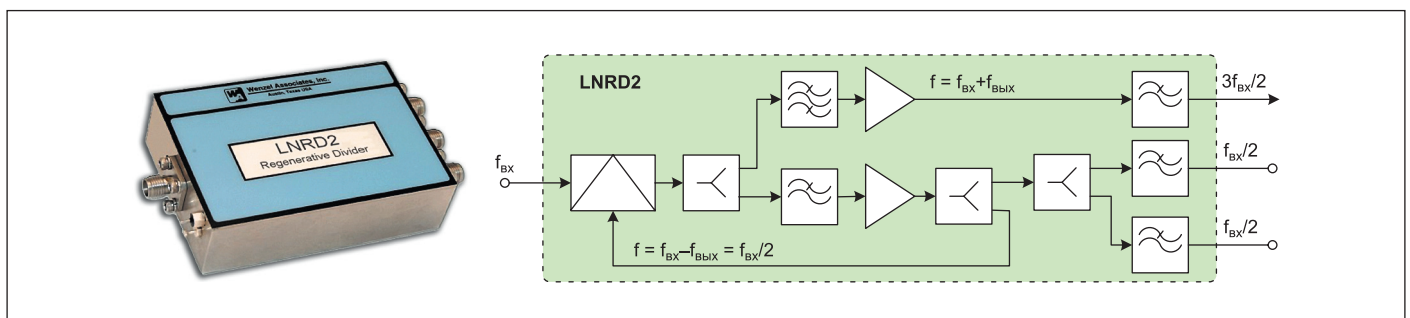


Рис. 5. Конструктивное выполнение и структура регенеративного делителя LNRD2

Таблица 3. Основные параметры малошумящего регенеративного делителя с частотами $f/2$ и $3f/2$

	LNRD2	LNRD4
Входная частота, МГц	0,01–2	0,01–2
$P_{\text{вх}}$, дБм	+20...+23	+10...+20
$P_{\text{вых}}$, дБм	до +15	до +15
Источник питания	15 В/200 мА	15 В/< 300 мА

для работы на фиксированной входной частоте в диапазоне 2–12 ГГц.

На рис. 5 приведена структура малошумящего регенеративного делителя частоты на два LNRD2, имеющего дополнительный выход с частотой $3f/2$, производимого компанией Wenzel. Деление осуществляется с помощью малошумящего смесителя и усилителя. Устройство содержит высококачественный смеситель, фильтры, усилители и делители мощности, необходимые для создания двух выходов $f/2$ и одного выхода $3f/2$. Такую же структуру имеет делитель LNRD4 (табл. 3). Типовое значение шума при отстройке 100 кГц составляет -175 дБн/Гц, гарантированное производителем значение -172 дБн/Гц. Делители предназначены для работы на фиксированной входной частоте в диапазоне 10–2000 МГц.

Входные и выходные сигналы имеют синусоидальную форму. Типовое значение уровня собственных шумов этих делителей составляет -175 дБн/Гц (гарантировано -172 дБн/Гц), что ниже, чем у серийно выпускаемых генераторов с кварцевыми резонаторами широкого применения. Устройства снабжены входными и выходными разъемами типа SMA(f), смонтированы в прочном корпусе размером $7,62 \times 5,08 \times 2,03$.

Наиболее высокочастотной моделью регенеративного делителя на рынке является широкополосный малошумящий делитель на четыре HMC447LC3 компании Hittite Microwave.

Этот широкополосный делитель, выполненный по технологии InGaP GaAs HBT, работает при входных частотах 10–26 ГГц и имеет очень широкий диапазон допустимых уровней входной мощности. У делителя очень низкий фазовый шум -150 дБн/Гц при расстройке 100 кГц, что делает его идеальным для использования в высокочастотных системах ФАПЧ и в схемах распределения частот гетеродина, если в системе необходимы основная и поделенные частоты гетеродина. Делитель частоты потребляет всего 96 мА от одного источника питания +5 В, помещен в корпус размером 3×3 мм и обеспечивает очень плоскую характеристику величины выходной мощности в номинальной рабочей области.

В работе [7] представлен реализованный в 130-нм InP HBT-процессе динамический делитель частоты 529 ГГц на два, который на сегодня является самым быстродействующим делителем из существующих. Для

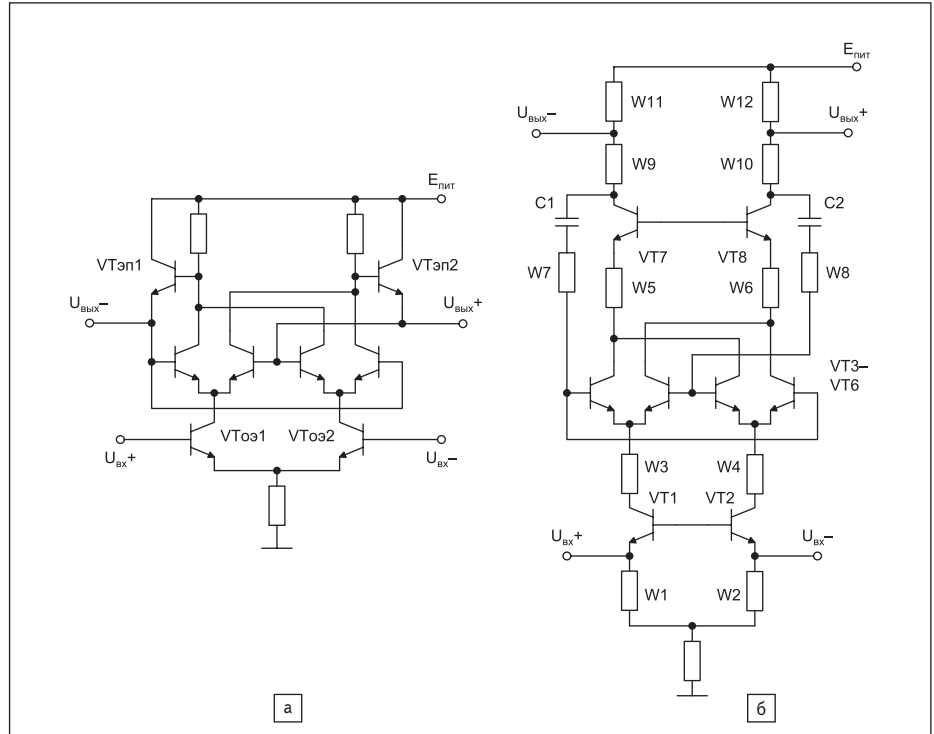


Рис. 6. Структуры динамического ДЧ: а) традиционная; б) усовершенствованная

преодоления ограничений по рабочему диапазону частот традиционной динамической структуры делителей частоты представленный делитель основан на новой схемотехнической структуре. Измерение на пластине показало, что делитель работает с входной частотой 528–529,2 ГГц с настройкой напряжением смещения, потребляя мощность менее 196 мВт.

Для преодоления ограничений по величине рабочей полосы частот обычных динамических делителей в работе [7] была предложена новая топология делителя (рис. 6б). Во-первых, каскады с общим эмиттером ОЭ на входе делителя (рис. 6а) заменены на каскады с общей базой ОБ (VT1 и VT2). Один HBT-транзистор в конфигурации ОБ обеспечивает 9 дБ максимального устойчивого усиления/максимального доступного усиления (maximum stable gain, MSG/maximum available gain, MAG) на частоте около 600 ГГц, что значительно выше 3 дБ аналогичных параметров в конфигурации ОЭ. Поэтому входные каскады ОБ улучшают чувствительность входа делителя на 6 дБ по сравнению с традиционной структурой.

Во-вторых, вместо HBT эмиттерного повторителя используются каскады ОБ (VT7 и VT8) так, что функционирование делителя больше не ограничено граничной частотой HBT-транзисторов. Выходной сигнал этих ОБ каскадов HBT возвращается на дифференциальные пары транзисторов VT3, VT4 и VT5, VT6 через конденсаторы C1 и C2 и линии передачи W7 и W8. Моделирование показывает, что традиционная схема (рис. 6а) работает до входной ча-

стоты 400 ГГц, а предлагаемая схема делителя способна действовать на частотах 600 ГГц, что значительно увеличивает максимальную входную рабочую частоту делителя. В схеме на рис. 6б элементы W1, W2 и W3, W4 обеспечивают входное и межкаскадное согласование соответственно. Элементы в цепи обратной связи C1, C2 и W5–W8 были скорректированы в процессе разработки ДЧ для достижения оптимальной ширины рабочей полосы делителя. Линии передачи W9–W12 обеспечивают согласование выходных цепей делителя.

Делители частот с переключаемыми диапазонами

Для улучшения характеристик делителей частоты, прежде всего расширения диапазона рабочих частот, стали широко использоваться ДЧ с переключаемыми рабочими диапазонами (band-switched frequency divider).

Регенеративные делители частот с переключаемыми диапазонами

На рис. 7 приведена обобщенная структура смесителя регенеративного СВЧ-делителя частоты с использованием топологии ячейки Гильберта [5, 8, 9]. Для расширения рабочего диапазона в делителе предусмотрена коммутация резонаторов или индуктивности используемого колебательного контура L1–L4 (рис. 7). Для этого имеются переключатели SAn и SAp. Использование набора (банка) индуктивностей позволяет уменьшить потребление энергии источника питания и может обеспечить более широкий диапазон

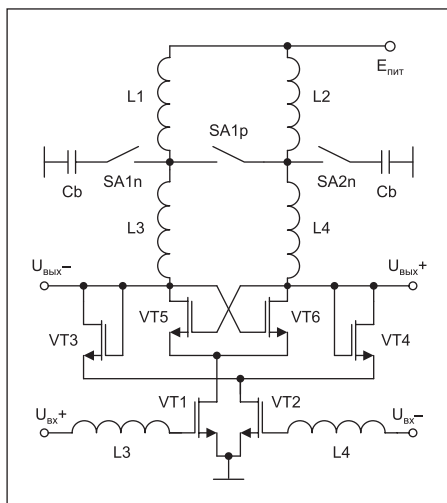


Рис. 7. Обобщенная структура регенеративного делителя частоты с переключаемыми диапазонами

синхронизации по сравнению с варакторным банком, который также применим.

Секции индуктивности резонатора могут быть подключены на «землю» по РЧ через конденсаторы C_b с помощью ключей SA1n и SA2n, которые представляют собой транзисторы nМОП (nMOS). Ключи SA1p добавляются в схему, чтобы обеспечить лучший импеданс (полное сопротивление) короткого замыкания. Для поддержания управляющего напряжения ключей SAp ниже, чем напряжение питания, эти ключи реализованы с помощью рМОП-транзисторов. Входные индуктивности L3 и L4 предназначены для согласования входных цепей устройств.

Калибровка ДЧ с переключаемыми диапазонами

При увеличении числа резонаторов в делителе частот с переключаемыми рабочими диапазонами пропорционально увеличивается и суммарная рабочая полоса частот. Если значение входной частоты изменяется,

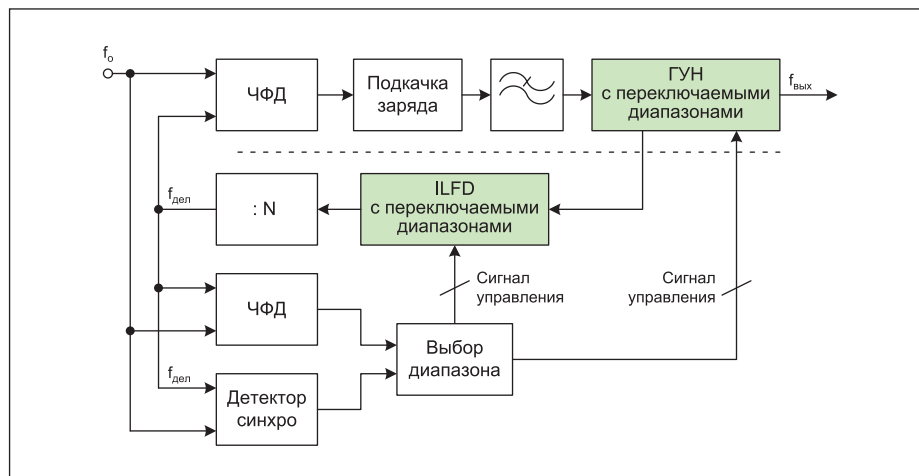


Рис. 8. Блок-схема обычной автоколебательной калибровки ГУН и инжекционного делителя ILFD

для сохранения или достижения синхронизма делителя необходимо соответствующим образом производить коммутацию резонаторов устройства. При этом для их корректной коммутации в рассматриваемом классе ДЧ значение входной частоты необходимо измерять — оценивать. В делителях частоты с переключаемыми диапазонами для этого используются дополнительные схемы калибровки частоты (frequency calibration circuit).

Для автоматизации переключения резонаторов в инжекционных делителях применяется калибровка автоколебаний (self-oscillating calibration).

Обычный автоколебательный метод калибровки, принцип которого иллюстрирует рис. 8, может быть реализован для ГУН при сравнении сигнала деления (f_{div}) и опорного тактового сигнала (f_{ref}). Селектор диапазона выбирает соответствующий диапазон в зависимости от результата сравнения сигналов в частотном детекторе ФД. Точно так же автоколебательная калибровка может быть применена к инжекционным делителям ILFD, которые тоже являются автоколебательными

устройствами [8]. Один из недостатков этого метода — то, что он может не обеспечивать синхронизации при изменении напряжения питания или температуры, поскольку после завершения поиска частоты управляющий сигнал остается постоянным.

Поэтому схема калибровки должна содержать детектор синхронизации для возобновления процедуры поиска частоты при срыве синхронизации. Детектор синхронизации потребляет мощность от источника постоянного тока и занимает определенную площадь на чипе, что может быть критичным фактором при реализации делителя. Другим недостатком рассмотренного вида калибровки является то, что она подходит только для автоколебательных цепей, таких как ГУН и инжекционный делитель. Если сигнал с выхода делителя частоты не поступает, детектор частоты не может работать должным образом. Следовательно, для несамовозбуждающейся цепи, такой как регенеративный делитель, автоколебательная калибровка не подходит.

Для того чтобы решить эту проблему, используются схемы неавтоколебательной

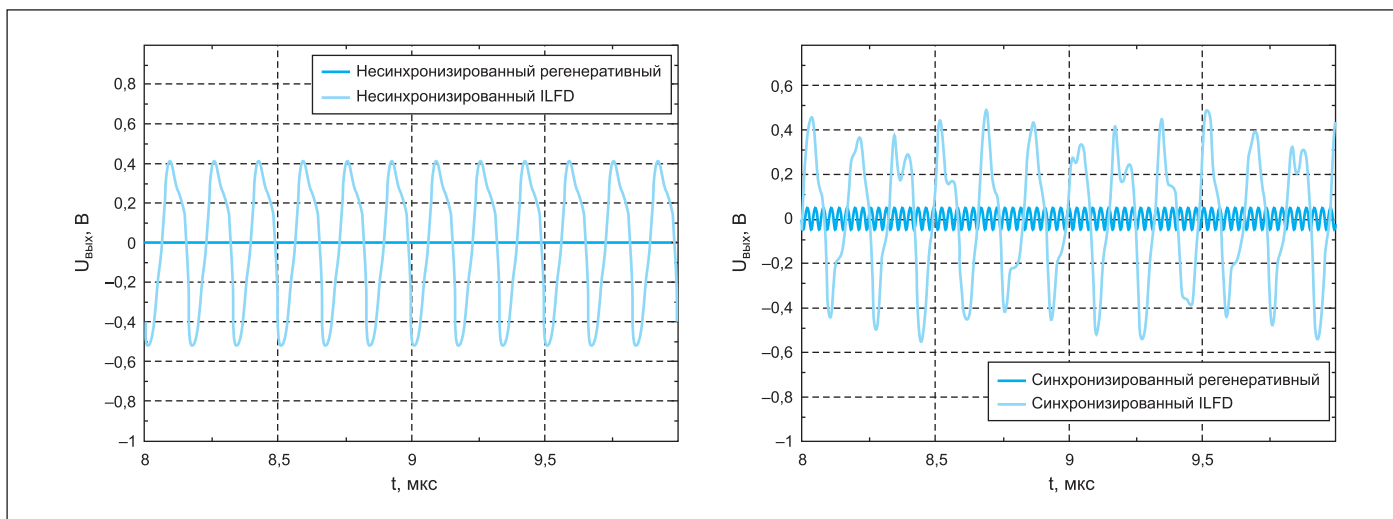


Рис. 9. Выходные сигналы различных типов ДЧ в синхронизированном и несинхронизированном режимах

Таблица 4. Сравнение характеристик КМОП ДЧ с различными методами калибровки

Публикация	[8, 9]	[10]	[11]	[12]	[23]
Входная частота, ГГц	8,2–14,8	64,3–66,2	60	39,1–41,6	57–66
Технология	0,18 мкм	0,13 мкм	90 нм	90 нм	45 нм
Калибровка	не авто	авто	авто	авто	авто
Тип ДЧ	регенератив.	инжекцион.	инжекцион.	инжекцион.	инжекцион.
Частота опорная f_0	50 МГц	0,25 МГц	0,4 МГц	н/д	н/д
Диапазон синхронизации, %	57,4	2,9	87	16	19,4
Время калибровки	40 нс	150 нс	15 мкс	Более 1 мс	5 периодов f_0
FoM	1,435	0,019	0,006	0,000016	н/д

Примечания.

н/д — нет данных.

Диапазон синхронизации (Locking Range) % = $100\% \cdot 2(f_{\max} - f_{\min}) / (f_{\max} + f_{\min})$.

Показатель качества FoM = Диапазон синхронизации, % / время калибровки, нс.

калибровки (non-self-oscillating calibration). Принцип их работы основан на том, что функционирование инжекционных и регенеративных делителей в разомкнутом, несинхронизированном состоянии различно (рис. 9). Если инжекционный делитель функционирует в незамкнутом состоянии, выходной сигнал является многочастотным (многотональным) [8]. В том же состоянии регенеративный делитель действует как удвоитель частоты, но с выходным сигналом очень малого уровня. Поэтому в схемах калибровки регенеративных делителей используются детекторы мощности выходного сигнала. Если уровень этого сигнала мал, происходит циклическое изменение рабочего поддиапазона ДЧ до тех пор, пока сигнал не возрастет. Это будет означать, что выбранный поддиапазон работы ДЧ соответствует частоте входного сигнала и наступил режим синхронизации делителя.

Следует отметить, что СВЧ-делители частоты, не содержащие индуктивных элементов (Inductor-Less Frequency Dividers), работающие на максимально возможных для применяемых активных элементов частотах, также нуждаются в коррекции режимов работы при изменении рабочей частоты. В таких делителях используются методы их самокалибровки для обеспечения частотной синхронизации в широком диапазоне частот с малой амплитудой входного сигнала при вариациях технологического

процесса, напряжения и температуры (PVT-вариации). Тем самым оптимизируется потребляемая мощность и обеспечивается надежность функционирования ДЧ. В работе [9] представлено несколько методов проектирования динамических безындукционных делителей частоты, предназначенных для расширения рабочего диапазона частот и увеличения диапазона синхронизации. Авторами описаны три прототипа делителей на четыре, выполненных с использованием 65-нм КМОП-технологии, предназначенных для охвата диапазона частот, превышающего 16–67 ГГц, и предложены методы их калибровки.

В таблице 4 приведены основные характеристики КМОП-делителей частоты, выполненных с использованием различных методов калибровки, позволяющие сделать вывод о перспективности их применения для расширения рабочих диапазонов ДЧ.

По результатам анализа ряда научных публикаций выполнен рис. 10, на котором приведены ширина рабочего диапазона частот и центральные входные рабочие частоты, достигнутые при использовании различных методов построения ДЧ [6].

Малошумящие делители

Как ранее отмечалось, целый ряд компаний-производителей позиционируют свои

делители частоты как малошумящие или даже сверхмалошумящие.

Теоретически делители частоты улучшают уровень фазового шума сигнала: в процессе деления частоты он уменьшается в число раз, равное коэффициенту деления N , или на $20 \lg N$ при использовании логарифмических единиц дБ. На практике применяемые для деления частот логические устройства, как правило, обладают большим уровнем шума, чем лучшие источники колебаний, и, кроме того, быстродействующие устройства деления генерируют гармоники сигналов, которые могут распространяться по всей РЧ-системе. Для снижения уровня нежелательных частотных компонентов на входе и выходе ДЧ зачастую устанавливаются полосовые фильтры.

Так поступает компания Wenzel Associates, применяя в малошумящих модулях LNFD деления на два или четыре полосовые фильтры на входе и выходе. Ряд моделей малошумящих ДЧ (UXM15P, UXC20P, UXD20K) предлагает компания Centellax. Малошумящий делитель HMC705LP4 (E) разработала компания Hittite Microwave. Кроме этого, компания предлагает серию малошумящих статических делителей частоты серии HMC-C00*.

По заявлению компании Holzworth, их делители частоты имеют самый низкий аддитивный фазовый шум среди таких изделий. Компания предлагает на рынке делитель на 10 колебаний частоты 100 МГц. Делитель HX4210 относится к классу лабораторного оборудования высокого уровня.

Делитель HX4210 (рис. 11) был задуман как выходной преобразователь сигнала для ранних разработок РЧ-синтезаторов Holzworth. Ключевое требование к конструкции заключается в сохранении низкого фазового шума и джиттера калиброванного эталонного сигнала 100 МГц так, чтобы он мог быть использован в качестве лабораторного эталона частоты 10 МГц. Делитель HX4210 и его пользовательские варианты были приняты системными интеграторами с 2007 года. Входные и выходные сигналы устройства имеют одинаковые уровни

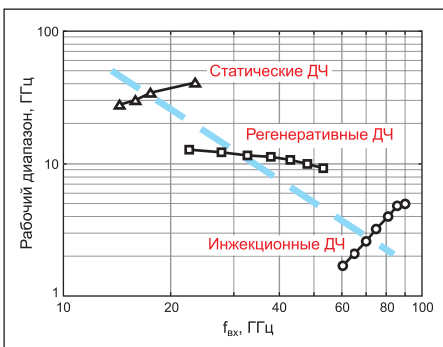


Рис. 10. Ширина рабочего диапазона частот и центральные входные рабочие частоты, достигнутые при использовании различных методов построения ДЧ

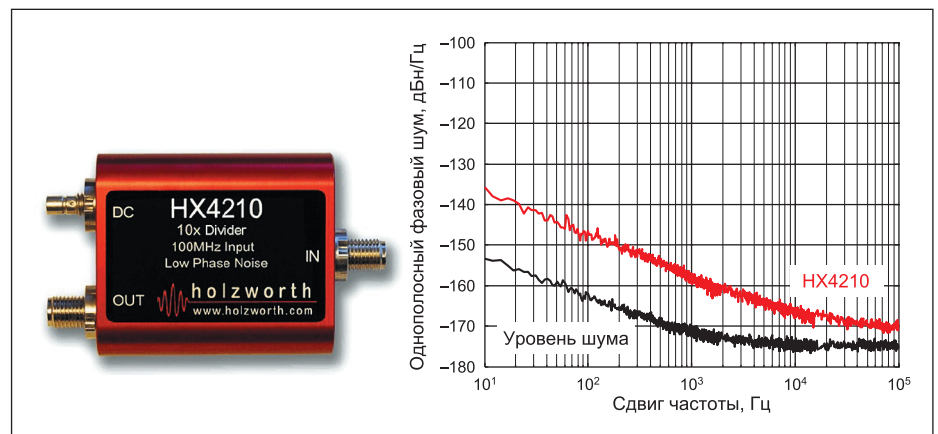


Рис. 11. Конструктивное выполнение и фазовый шум делителя частоты HX4210

+10 дБм. Делитель имеет пересчитанный к выходу уровень аддитивного фазового шума –170 дБн/Гц при входном сигнале 100 МГц. Делитель выполнен в металлическом корпусе размером 44,5×38,1×12,7 мм и снабжен разъемами SMA. ДЧ НХ4210 имеет высокую выходную мощность и может работать с широким спектром источников питания. Питание устройства происходит от одного источника напряжения 8–12 В при токе потребления 100 мА, предусмотрена встроенная малошумящая схема питания. Все изделия Holzworth подвергаются окончательным эксплуатационным испытаниям для проверки уровня фазового шума.

Потенциально наиболее низкий уровень шума может быть достигнут в регенеративных делителях частоты. Ряд малошумящих регенеративных делителей LNRD с различными рабочими частотами выпускает компания Wenzel Associates. Наиболее высокочастотной моделью регенеративного делителя на рынке является широкополосный малошумящий делитель на четыре НМС447LC3 компании Hittite Microwave. Этот широкополосный делитель, выполненный по технологии InGaP GaAs HBT, работает при входных частотах 10–26 ГГц и имеет очень широкий диапазон допустимых уровней входной мощности.

Заключение

Для создания полупроводниковых приборов, используемых в современных ДЧ, в качестве исходного материала применяются элементарные полупроводники: германий (Ge), кремний (Si), селен (Se), теллур (Te). Интенсивно проводятся исследования и применение соединений элементов третьей и пятой групп таблицы Менделеева: арсенида галлия (GaAs), арсенида индия (InAs), фосфида индия (InP), фосфида галлия (GaP), карбида кремния (SiC) и т. д.

Серийно выпускаемые делители, в том числе предназначенные для массовых приложений, работают на частотах до 30–50 ГГц. В научных публикациях сообщается о разработке компонентов, в частности инжекционных делителей частоты, которые могут быть использованы до 300 ГГц. ■

Литература

- Hoppner S., Henker S., Eisenreich H., Schuffny R. An open-loop clock generator for fast frequency scaling in 65 nm CMOS technology. Proc. 18th Int. Conf. Mixed Design Integr. Circuits Syst. (MIXDES), Jun. 2011.
- Дмитриев С. Предварительные делители частоты NEC Electronics упрощают архитектуру синтезаторов частот в диапазоне 5–13 ГГц // Компоненты и технологии. 2005. № 4.
- Rodwell M. et al. Transistor and Circuit Design for 100–200 GHz ICs // JSSC. 2005. Vol. 40. No. 10.
- Hitko D. A. et al. A Low Power (45mW/Latch) Static 150 GHz CML Divider. CSICS Digest, 2004.
- Plouchart J. O. et al. Performance Variations of a 66GHz Static CML Divider in 90nm CMOS. ISSCC Digest, 2006.
- Li L., Reynaert P., Steyaert M. A 60GHz 15.7mW static frequency divider in 90nm CMOS. IEEE, 2010.
- Seo M., Hacker J., Urteaga M., Skalar A., Rodwell M. A 529 GHz Dynamic Frequency Divider in 130 nm InP HBT Process // IEICE Electronics Express. 2015. Vol. 12. Iss. 3.
- Kuo Y.-H., Tsai J.-H., Huang T.-W., Wang H. Design and Analysis of Digital-Assisted Bandwidth-Enhanced Miller Divider in 0.18-μm CMOS Process // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2012. Vol. 60, No. 12.
- Hussein A. I., Paramesh J. Design and Self-Calibration Techniques for Inductor-Less Millimeter-Wave Frequency Dividers // IEEE Journal of Solid-State Circuits 1. 2017. Vol. 52. Iss. 6.
- Tsai K.-H., Wu J.-H., Liu S.-I. A digitally calibrated 64.3–66.2 GHz phase-locked loop. IEEE Radio Freq. Integr. Circuit Conf., Jun. 2008.
- Shima T., Sato J., Mizuno K., Takinami K. A 60 GHz CMOS PLL synthesizer using a wideband injection-locked frequency divider with fast calibration technique. IEEE Asia — Pacific Microw. Conf., Dec. 2011.
- Pellerano S., Mukhopadhyay R., Ravi A., Laskar J., Palaskas Y. A 39.1-to-41.6 GHz fractional-frequency synthesizer in 90 nm CMOS. IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Tech. Dig., Feb. 2008.
- Scheir K., Vandersteen G., Rolain Y., Wambacq P. A 57-to-66 GHz quadrature PLL in 45 nm digital CMOS. IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Tech. Dig., Feb. 2009.

Приложение. Производители делителей частоты

НПП «Исток»	www.istokmw.ru
ЗАО «ОКБ МЭЛ» (г. Калуга)	www.okbmel.ru/
НИИПП «Томск»	www.niipp.ru
АО НПП «Пульсар»	http://pulsarppp.ru
ООО «Научно-технический центр «ДЭЛС» (Беларусь)	www.dels.by/ru/
Analog Devices	www.analog.com
Adsantec	www.adsantec.com/categories/frequency-dividers/
API Technologies Corp. (раньше Spectrum Microwave)	www.apitech.com
Bowei	www.cn-bowei.com/Products.htm
Avtech Electrosystems	avtechpulse.com
Broadcom Limited (бывшая Avago Technologies Limited)	www.broadcom.com
California Eastern Laboratories	www.cel.com
Centallax (присоединена к Microsemi)	www.microsemi.com
Cernex	www.cernex.com
Freescape/Lansdale Semiconductor	www.us-tech.com
Hittite Microwave Corporation (теперь Analog Devices)	analog.com
Holzworth	www.holzworth.com
Inphi	www.inphi.com/portal/products/
Loreme	www.loreme.fr
M/A-COM Tech Asia (ранее Mimix Asia)	www.metcom.com
METDA Technology	www.metdac.com/
Micro Lambda Wireless	www.microlambdawireless.com
Microchip (ранее Micrel)	www.microchip.com/
Microsemi Corporation	www.microsemi.com
Mimix (теперь M/A-COM Technology Solution)	www.macom.com
Mini-circuits	ww2.minicircuits.com
Motorola/Lansdale Semiconductor	www.lansdale.com/datasheets.php
NEC/CEL	www.cel.com
NTLab	ntlab.com
ON Semiconductor	www.onsemi.com
Pasternack Enterprises	ru.pasternack.com
Peregrine Semiconductor	www.psemi.com
PMI	www.pmi-rf.com
Renesas Electronics	www.renesas.com
RF Bay	www.rfbayinc.com
SHF Communication Technologies	www.shf.de
Sige Microsystems	Приобретена Skyworks Solutions
Skyworks Solutions	www.skyworksinc.com
L3 Narda-MITEQ	nardamiteq.com
Texas Instruments	www.ti.com/
UMS	www.ums-gaas.com
Valon Technology	www.valontechnology.com
Waka	www.waka.co.jp/index_e.php
Wenzel Associates	www.wenzel.com
WORK Microwave	www.work-gmbh.de
Zarlink Semiconductor	Присоединена к Microsemi