

# СВЧ-преобразователи частоты.

## Часть 2.

### Классификация преобразователей по принципу функционирования

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

Во второй статье из цикла, посвященного общему обзору СВЧ-преобразователей частоты, представлено несколько групп преобразователей, которые выделены на основе принципа преобразования сигнала.

В настоящий момент на рынке РЧ-компонентов предлагается значительное количество изделий, позиционируемых производителями как преобразователи частоты. Однако зачастую эти компоненты по своим основным функциональным свойствам целесообразно относить к другим группам изделий. Так, например, прямые квадратурные преобразователи частоты (Direct Frequency Converter) являются, по сути дела, прямыми квадратурными или IQ-модуляторами/демодуляторами (Direct IQ Modulator/Demodulator).

В соответствии с используемым в устройстве принципом преобразования сигнала можно выделить несколько групп преобразователей. Далее в разделе рассматривается несколько таких групп преобразователей, классифицированных в соответствии с реально используемой в настоящее время на рынке РЧ-компонентов классификационной терминологией. Для каждой группы преобразователей частоты дополнительно оговариваются основные функциональные характеристики, определяющие более точ-

ную классификацию преобразователей как РЧ-компонентов. При этом для группы приводятся лишь основные сведения о характеристиках и особенностях использования компонентов именно как преобразователей частоты. При рассмотрении в данной публикации конкретных моделей преобразователей частоты они, в первую очередь, классифицируются в те или иные группы по принципу функционирования, невзирая на их конструктивное выполнение.

#### Квадратурные преобразователи

Квадратурные преобразователи частоты, называемые также IQ-преобразователями (Quadrature/Inphase-quadrature/IQ Converters), осуществляют перенос сигналов вверх или вниз по частоте с использованием квадратурных смесителей.

Если в квадратурном преобразователе происходит преобразование РЧ/ПЧ-сигнала в область бейсбэнд-частот или обратное преобразование, то такое устройство, по сути

дела, является квадратурным модулятором (IQ Modulator) или демодулятором (IQ Demodulator), в котором осуществляется модуляция/демодуляция бейсбэнд-сигнала с использованием необходимой ПЧ- или даже РЧ-частоты.

Компания Analog Devices выпускает 11 моделей квадратурных преобразователей с повышением, предназначенных для использования в трактах передачи разного назначения.

Наиболее высокочастотная модель квадратурного преобразователя с повышением HMC8118 (рис. 1) может применяться в E-диапазоне на частотах 71–76 ГГц (табл. 1). Это монолитная интегральная схема преобразователя с повышением частоты диапазона E на основе арсенид-галлиевой (GaAs) технологии, имеющая потери при преобразовании в режиме слабого сигнала 11 дБ, обеспечивает подавление побочного канала 33 дБн в диапазоне рабочей частоты. Компонент построен на основе смесителя с подавлением зеркальной составляющей и умножителя частоты гетеродина с коэффициентом 6.

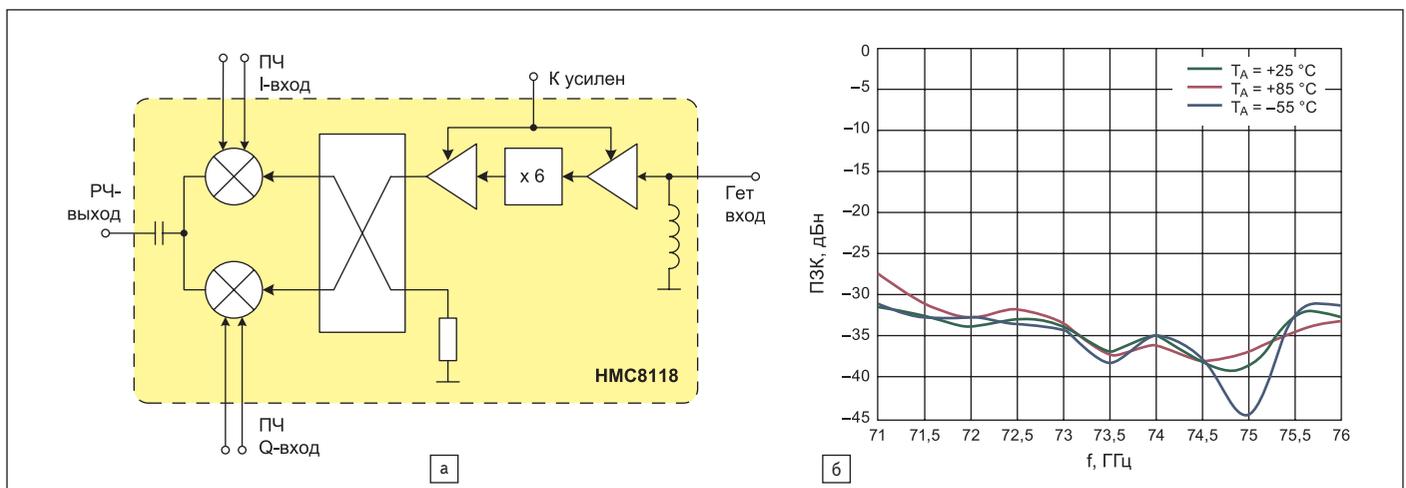


Рис. 1. а) Структура квадратурного преобразователя с повышением HMC8118 от компании Analog Devices; б) частотная зависимость подавления зеркального канала ПЗК при разных температурах ИС

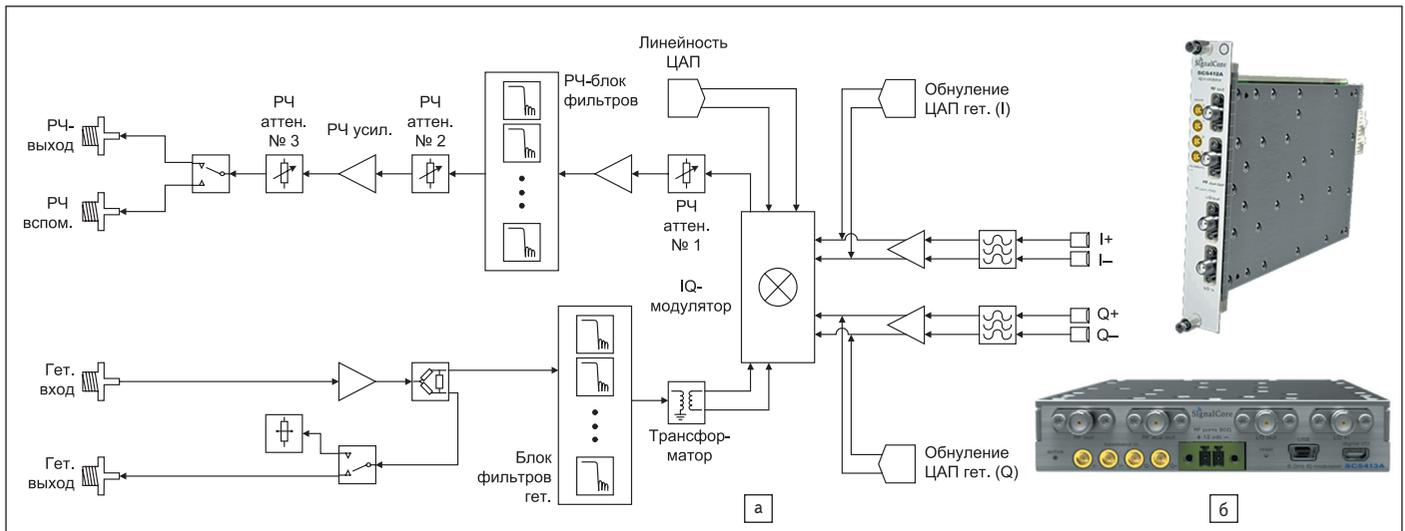


Рис. 2. Повышающий преобразователь SC5413A/SC5412A от компании SignalCore: а) упрощенная схема; б) варианты конструктивного выполнения

Смеситель имеет дифференциальные входы синфазной (I) и квадратурной (Q) составляющих. В схемах передатчиков прямого преобразования на эти входы могут подаваться дифференциальные сигналы полосы модулирующих частот — бейсбэнд-тракта. Преобразователь также поддерживает работу с внешним гибридным фазовращателем на  $90^\circ$  и двумя внешними гибридными фазовращателями на  $180^\circ$  в схемах формирования сигналов с одной боковой полосой.

Преобразователи РЧ-сигналов компании SignalCore отвечают требованиям современных беспроводных приложений. Эти компоненты являются высокоэффективными устройствами, которые можно легко интегрировать во многие системы генерации сигналов. С их помощью можно создавать пары преобразователей с повышением/понижением для реализации РЧ-приемопередатчиков.

На рис. 2 приведена структура SC5413A — прямого квадратурного преобразователя с повышением для работы в диапазоне 6 ГГц (табл. 1). Это устройство управляется с использованием интерфейсов USB/RS-232/SPI. Такую же структуру имеет преобразователь SC5412A, выполненный в формате PXI Express (табл. 1). Похожую «зеркальную» структуру, приведенную на рис. 2, имеет 6-ГГц прямой квадратурный преобразователь с понижением SC5313A (USB/RS-232/SPI, табл. 1) и SC5312A (PXI Express, табл. 1).

## Прямые преобразователи частоты

Стремление разработчиков к минимизации количества используемых в РЧ-блоке навесных компонентов и созданию многодиапазонных устройств в интегральном исполнении привело к широкому использованию прямых преобразователей сигнала.

В прямых преобразователях вниз по частоте (Direct Down-Converter) осуществляется однократное преобразование, а по сути дела, демодуляция принимаемого радиочастотного сигнала непосредственно на низкую (нулевую, бейсбэнд) частоту.

Поскольку в современных системах связи используются сложные схемы модуляции, схемотехническая реализация таких преобразователей производится с помощью прямых квадратурных или IQ-модуляторов/демодуляторов. В преобразователе применяется перестраиваемый высокочастотный гетеродин, с помощью которого происходит выбор рабочего канала, и фильтр низких частот с крутыми фронтами, осуществляющий селекцию необходимой рабочей полосы (Channel Select Filter). Для достижения высококачественных характеристик применяется высоколинейный смеситель, а тракт усиления после смесителя должен производить усиление в т. ч. постоянной составляющей сигнала, чтобы не потерять важные компоненты принимаемой информации.

Таблица 1. Квадратурные преобразователи сигнала по частоте

ИС (компания)	Описание	Диапазон РЧ (ПЧ), ГГц	Частоты гетеродина, ГГц	Форм-фактор
HMC8118 (Analog Devices)	Квадратурный преобразователь с повышением частоты диапазона E	71–76	0–10	НК, ИС 3,6×1,6×0,05 мм
ES/SMM5143XZ (Sumitomo Electric)	ПрЧПов	24–30 (0–4)	10–17	ММС
ES/SMM5141XZ (Sumitomo Electric)	ПрЧПов	17,7–23,6 (0–4)	6,5–14	ММС
SC5313A/SC5312A (SignalCore)	КвПрЧПон	0,4–6 (0–0,16)	н/д*	РХИ, коаксиальный модуль
SC5413A/SC5412A (SignalCore)	КвПрЧПов	0,4–6 (0–0,16)	н/д*	РХИ, коаксиальный модуль

Примечание. \* н/д — нет данных

В такой структуре отсутствует зеркальный канал приема, и потому нет необходимости в использовании внешнего высокочастотного фильтра для подавления этого сигнала. В целом, применение прямых преобразователей является весьма привлекательным из-за меньших стоимости, потребляемой мощности и массогабаритных показателей. Однако, несмотря на простоту и ряд других достоинств этой архитектуры, необходимо учитывать, что прямое преобразование сигнала влечет за собой возникновение ряда проблем, не существующих или не настолько серьезно проявляющихся в гетеродинном приемнике. Обнаружению и обработке сигнала могут препятствовать проблемы, вызванные утечкой сигнала гетеродина (LO leakage), изменяющимся во времени смещением постоянной составляющей (DC offset), и фликкер-шум (Flicker noise). Эта архитектура также весьма склонна к созданию интермодуляционных искажений второго порядка IM2 (second-order intermodulation distortion product).

В прямых преобразователях вверх по частоте (Direct Up-Converter) модуляция и перенос по частоте низкочастотного информационного (бейсбэнд) сигнала вверх на рабочую (канальную) частоту происходит за один шаг без использования промежуточных частот.

По возможности большинство производителей радиооборудования предпочитает использовать в своих схемотехнических решениях такие преобразователи, поскольку при этом существенно уменьшаются массогабаритные показатели устройства. На практике в настоящее время для прямого преобразования сигналов как вверх, так и вниз по частоте применяются квадратурные модуляторы и демодуляторы. При этом производители могут и не оговаривать это обстоятельство в названии модели РЧ-компонента.

## Прямые квадратурные преобразователи

В прямых квадратурных преобразователях (Quadrature Converter for Direct-Conversion), являющихся по своим функциональным свойствам квадратурными модуляторами (Direct-Conversion I-Q Modulator) или демодуляторами (Direct Conversion Quadrature Demodulator), происходит перенос информационных квадратурных компонентов, поступающих с низкочастотного бейбэнд-тракта, вверх на канальную рабочую частоту или, соответственно, обратное преобразование вниз по частоте.

Повышающий прямой квадратурный преобразователь является основой архитектуры прямого преобразования, используемой в тракте передачи. Это устройство получило очень широкое распространение благодаря тому, что оно позволяет создавать многостандартные и многодиапазонные устройства.

Использование прямых квадратурных преобразователей в трактах обработки сигналов позволяет разрабатывать радиооборудование с хорошими характеристиками, но может приводить к возникновению ряда паразитных эффектов. Среди них — затягивание частоты (Frequency pulling) и смещение частоты (Frequency pushing) РЧ-генератора, управляемого напряжением, паразитное просачивание сигнала несущей (carrier feed through) от РЧ ГУН на выход передатчика и вход приемника, а также утечка (Carrier Leakage) сигнала гетеродина.

## Преобразователи с подавлением зеркального канала

В преобразователях с подавлением зеркального канала (Image Reject Converter, ППЗК) используются разные методы подавления нежелательного бокового канала, получающегося после процедуры преобразования входного сигнала.

Преобразователь с подавлением зеркального канала и однополосный (Single Sideband, SSB) преобразователь — разные названия одного устройства, используемого как преобразователь сигналов с понижением или повышением частоты. В преобразователях СВЧ-диапазона в качестве ядра компонента (Core Component) используется квадратурный смеситель с дополнительным квадратурным гибридным ответвителем (Quadrature Hybrid Coupler) промежуточной частоты. В ППЗК применяются делители мощности и гибридные компоненты (Quadrature Hybrid), устанавливаемые на необходимых портах для обеспечения требуемых фазовых соотношений обрабатываемых сигналов и подавления ненужной боковой полосы непосредственно в смесителе. В конкретных преобразователях на их портах могут быть установлены усилители, в т. ч. регулируемые, а также умножители частоты на гетеродинном входе. Широко

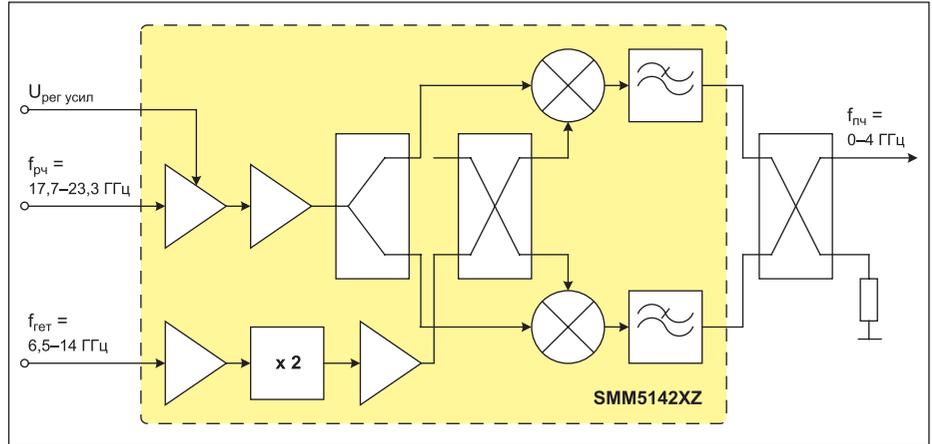


Рис. 3. Структура ИС понижающего преобразователя SMM5142XZ от компании Sumitomo Electric

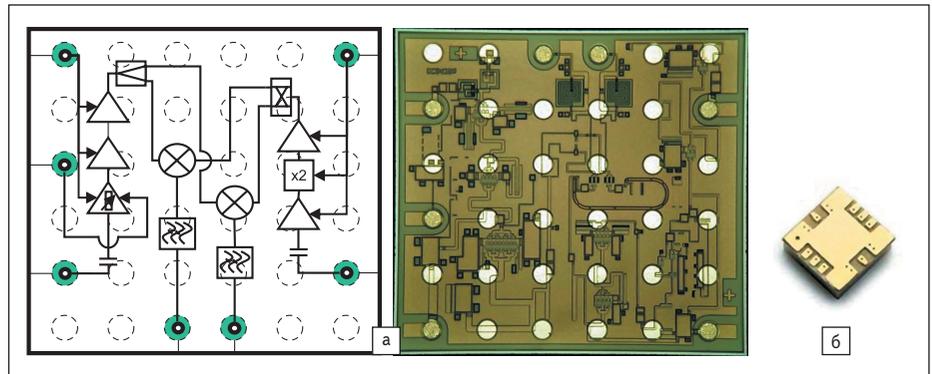


Рис. 4. а) Структура и топология ИС ES/SMM5144XZ компании Sumitomo Electric; б) конструктив ИС AMGP-6552 от компании Avago Technologies

Таблица 2. Преобразователи частоты с подавлением зеркального канала

ИС (компания)	Описание	Уровень подавления ЗК (коэффициент преобразования), дБн	Диапазон РЧ/рет. (ПЧ), ГГц	Форм-фактор
AMGP-6552 (Avago)	ПрЧПон	17–20	37–43,5/37–43,5 (0–4)	ПМ, 5×5 мм
HMC6147ALC5A (Analog Devices)	Квадратурный ПрЧПон	15–25	37–44/16,5–22 (0–4)	SMT-16, 5×5 мм, керамика
ES/SMM5144XZ (Sumitomo Electric)	ПЗК ПрЧПон ММИС	20	24–30/10–17 (0–4)	WLCSOP
RFRX1702 (RFMD/Qorvo)	ПрЧПон	15	17,75–19,7/6,85–11,85 (0–4)	QFN, 5×5 мм
SMM5142XZ (Sumitomo Electric)	ПЗК ПрЧПон ММИС	16	17,7–23,6/6,5–14 (0–4)	WLCSOP
SMM5146XZ (Sumitomo Electric)	ПЗК ПрЧПон ММИС	20	12,7–15,4/5,3–8,7 (0–2)	WLCSOP
MAX2420/MAX2421/MAX2422/MAX2460/MAX2463 (Maxim)	900 ГГц ПЗК ПрЧПон	35	0,8–1/690–1100 (8,5–135 МГц)	SSOP-28
СНМ1080-98F (UMS)	ПрЧПов с ПЗК	15	71–86/34,5–44 (0–12)	н/к (Die)
XU1001 (Mimix Broadband)	GaAs ПрЧПов	12	36–40/15,5–21,5 (0–3) н/к	СВЧ ИС (ММИС), н/к
RFUV1703 (RFMD)	GaAs ММИС IQ ПрЧПов	15	21–26,5/8,6–15,25 (0–4)	ПМ
RFUV1702 (RFMD)	ПрЧПов	> 15	17,7–19,7 (6,85–11,85 (0–4)	QFN, 5×5 мм
TGC4510-SM (TriQuint)	ПрЧПов К-диапазона	15	17,7–26,5/6,85–15,25 (0–4)	28 QFN, 5×5 мм

применяется и субгармонический режим работы с использованием второй гармоники гетеродинного сигнала.

Для СВЧ-компонентов типовые величины подавления зеркального канала в ППЗК находятся в пределах 20–30 дБ, что определяется, в основном, разбалансом квадратурных каналов гибридных узлов и ядра смесителя, входящих в состав ППЗК.

Однополосный преобразователь (SSB converter) выполняет те же функции, что и ППЗК, но используется для преобразования сигнала с повышением частоты. Какая из частот  $f_{рч} = f_{пч} + f_{рет}$  или  $f_{рч} = f_{пч} - f_{рет}$  пода-

вляется на выходе, зависит от способа включения выходного гибридного ответвителя — фазовращателя. Фактически, если четвертый порт этого фазовращателя не закорачивается, то на двух выходах подавляются противоположные боковые полосы.

Наиболее распространенная структура понижающего преобразователя с подавлением зеркального канала реализована, например, в серии изделий SMM514x компании Sumitomo Electric (рис. 3–4), отличающихся только параметрами, что отражено в таблице 2. Устройства, выполненные в виде компонента типа «перевернутый кристалл»

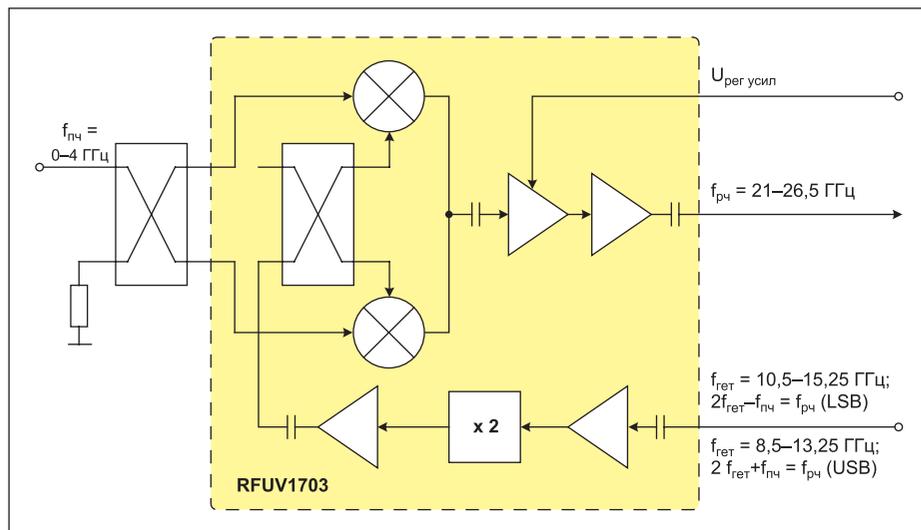


Рис. 5. Функциональная схема повышающего преобразователя RFUV1703

(Flip-Chip), содержат резистивный смеситель с подавлением зеркального канала на РНЕМТ-транзисторах, малошумящий входной усилитель, буферные усилители гетеродина и умножитель частоты гетеродина на два.

Структура повышающего ПрЧ с подавлением зеркального канала показана на рис. 5 на примере ИС RFUV1703, выпускаемой компанией RFMD. Для функционирования устройства требуется установка на входе гибридных ответвителей.

Основные параметры рассматриваемых преобразователей приведены в таблице 2.

Следует заметить, метод подавления зеркального канала может использоваться в преобразователях с разным принципом функционирования, образуя комбинированные топологии.

Так, ИС AMGP-6552 компании Avago представляет собой широкополосный ПрЧ с понижением, содержащий МШУ (рис. 4). Преобразователь работает на частотах 37–43,5 ГГц, при частотах гетеродина 16,75–23,5 ГГц со значением ПЧ 0–4 ГГц. ИС обеспечивает уровень подавления ЗК 17–20 дБ при коэффициенте преобразования 12 дБ.

Преобразователь оснащен корпусом для поверхностного монтажа размером 5×5 мм.

При использовании GaAs СВЧ ИС HMC6147ALC5A компании Analog Devices (Hittite Microwave Corporation) необходимо применять внешний направленный ответвитель для выделения желательного канала. Величина подавления ЗК в этом понижающем ПрЧ составляет 15–25 дБ, коэффициент преобразования — 10–13 дБ. ИС можно использовать на входных частотах 37–44 ГГц, частотах гетеродина 16,5–22 ГГц, частотах ПЧ в диапазоне 0–4 ГГц.

### Субгармонические преобразователи

Для переноса сигналов по частоте в преобразователях с использованием гармониковых смесителей может использоваться не только основное колебание гетеродина, но и любая его гармоника. Однако наиболее эффективным является применение четных гармоник, в частности второй.

В преобразователях частоты с субгармонической накачкой (Sub-Harmonically Pumped Frequency Converter) или субгармонических

(субгармониковых) преобразователях для переноса сигналов по частоте используется четная гармоника колебания гетеродина.

Достоинством таких преобразователей является использование в них более низкой частоты гетеродина, обычно равной половине номинала частоты обрабатываемого сигнала. В таких ПрЧ можно легко реализовать разделение по частоте сигналов гетеродина, РЧ и продуктов их взаимодействия. Кроме того, снижение частоты колебания гетеродина позволяет снизить стоимость устройства, особенно в ММВ-диапазоне. В СВЧ гармониковых преобразователях для получения наилучших рабочих характеристик при умеренном уровне накачки гетеродина используются высококачественные GaAs-диоды Шоттки.

Более общий термин «преобразователи (смесители) на гармониках» (Harmonic Converter) чаще всего применяется к устройствам с использованием на РЧ-портах в качестве полезных комбинационных продуктов входного сигнала. В таких схемах достигается необходимое подавление комбинационных компонентов четного порядка за счет балансных конфигураций и оптимальных вольт-амперных характеристик диодов. Однако установившегося правила применения терминов в таких случаях пока нет. В силу этого, особенно в отечественной научной литературе, более общий термин «гармониковые преобразователи (смесители)» применяется к преобразователям обеих групп — и при использовании гармоник сигнала, и гетеродина.

Субгармоническим принципом функционирования дополняются преобразователи самой разной топологии и диапазонов, что отражено в таблице 3.

На рис. 6 в качестве примера приведена структура понижающего преобразователя TGC4408-SM компании TriQuint. Устройство содержит переключаемый двухдиапазонный ГУН, субгармонический смеситель с МШУ и буферные усилители сигнала гетеродина. Частота входного РЧ-сигнала ПрЧ находится в диапазоне 18,3–20,2 ГГц, а частота ПЧ — 950–1950 МГц. Коэффициент преобразования составляет 8,5 дБ, коэффициент шума — 6,5 дБ, фазовый шум –73 дБн/Гц при 10-кГц расстройке и –126 дБн/Гц при расстройке 1 МГц.

В преобразователе применяются два ГУН: низкочастотный (8,55–8,76 ГГц) и высокочастотный (10,45–10,66 ГГц). При использовании напряжения настройки ГУН ( $U_{упр}$ ) величиной 1–4 В крутизна (чувствительность) перестройки генераторов находится в диапазоне 125–375 МГц/В. В преобразователе дополнительно формируется дифференциальный сигнал, равный 1/4 частоты ГУН, который можно использовать в схеме фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) внешнего СЧ.

В процессе реализации преобразователя для изготовления субгармонического смесителя используются технологические про-

Таблица 3. Гармониковые преобразователи в интегральном исполнении

Модель (компания)	Описание	Коэффициент преобразования, дБ	Гетеродин, ГГц (гармоника)	РЧ/ПЧ частоты, ГГц	Корпус
AMGP-6551 (Avago Technologies)	Балансный субгармонический ПрЧПов	12	18,5–23,5	40,5–43,5/0–3	SMT, 5×5 мм
AMGP-6552 (Avago Technologies)	Малошумящий ПрЧПон ( $U_{лин}$ : 3 В)	12	16,75–23,5	37–43,5/0–3	SMT, 5×5 мм
TGC4407-SM (TriQuint)	Ка-диапазон, рНЕМТ субгармонический ПрЧПов	–9	11–16	21,5–32,5 (0–7)	QFN16, 3×3 мм
TGC4408-SM (TriQuint)	Ки-диапазон, двухдиапазонный ГУН, субгармонический ПрЧПон	8,5	7,9–9,1 9,9–11,1	18,3–20,2 (0,95–1,95)	QFN32, 5×6 мм
HMC711LC5 (Hittite)	GaAs МММС субгармонический ПрЧПов	15	9,5–13,6 (2)	17,7–23,6/0–3,5	Керамический корпус, SMT 32, 5×5 мм
HMC264LM3 (Analog Devices / Hittite)	Субгармонический ПрЧПон (×2) МММС с усилителем ПЧ	–9	10–15 (2)	20–30/0–4	ПМ SMT
HMC265 (Analog Devices / Hittite)	СВЧ субгармонический (×2) ПрЧПон (МММС) с внутренним гетеродином и усилителем ПЧ	2	10–16 (2)	20–32/0,7–3	1,32×1,32×0,1 мм
XU1001 (Mimix Broadband)	Содержит два смесителя для реализации ПЗК	8	15,5–21,5	33–40/0–3	Чип для ПМ

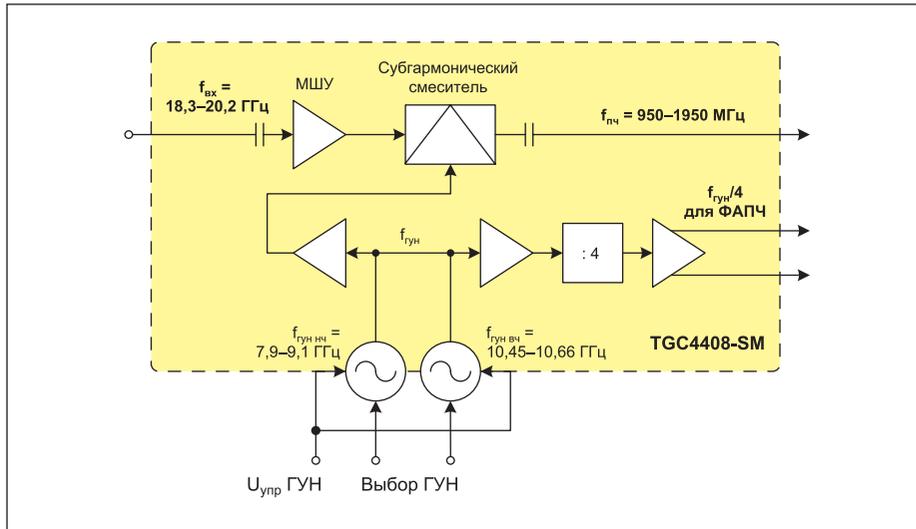


Рис. 6. Функциональная схема ИС TGC4408-SM с использованием субгармонического преобразования компании TriQuint

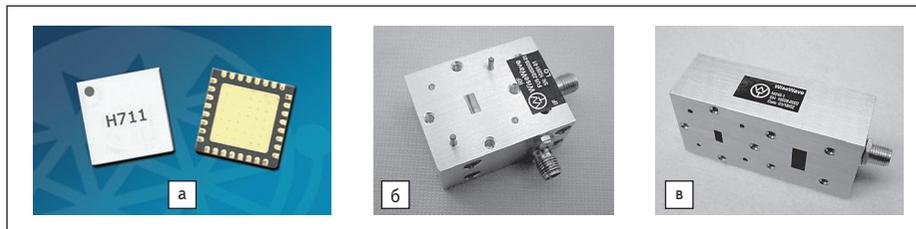


Рис. 7. Преобразователи по частоте с субгармонической накачкой: а) ИС компании Hittite HMC711LC5; б) серии FUS компании Ducommun; в) серии FDS компании Ducommun

Таблица 4. Балансные повышающие преобразователи с субгармонической накачкой серии FUS компании Ducommun Technologies

Волноводный диапазон	K	Ka	Q	U	V	E	W
Волновод	WR-42	WR-28	WR-22	WR-19	WR-15	WR-12	WR-10
Соединитель, порт гетеродина	SMA	SMA или K	WG или V				
РЧ, ГГц	18–26,5	26,5–40	33–50	40–60	50–75	60–90	75–110
Частота гетеродина, ГГц	9–13,25	13,25–20	16,5–25	20–30	25–37,5	30–45	37,5–55
ПЧ, ГГц	DC–4	DC–6	DC–8	DC–10	DC–12	DC–15	DC–18
Уровень гетеродина, дБм	10–15	10–15	12–15	12–15	12–15	12–15	12–15
Потери, дБ (типичное)	10	11	12	13	14	15	16

цессы биполярных гетеротранзисторов HBT. ГУН и предделитель производятся с использованием транзисторов с высокой подвижностью электронов PHEMT компании TriQuint. Преобразователь, потребляющий 305 мА от источника постоянного тока +5 В, оснащен 32-выводным корпусом QFN размером 5×6 мм для поверхностного монтажа и хорошо подходит для наземных VSAT-терминалов и приемников связи миллиметровых волн.

На рис. 7 приведены варианты конструктивного выполнения преобразователей частоты: ИС HMC711LC5 компании Hittite, волноводных преобразователей вниз с субгармонической накачкой серии FUS компании Ducommun. Компании-производители обычно разрабатывают линейки преобразователей для перекрытия полного диапазона

СВЧ с разными параметрами волноводов и поддержки широкого диапазона значений промежуточной частоты. Лучшие рабочие характеристики можно получить за счет работы отдельных моделей преобразователей в более узких поддиапазонах частот. Для преобразования сигналов вниз по частоте компания предлагает использовать субгармонические смесители в волноводном исполнении серии FDS.

Выпускаемые компанией Ducommun Technologies балансные преобразователи вверх по частоте с субгармонической накачкой серии FUS (табл. 4) предлагаются в семи волноводных диапазонах (waveguide band), чтобы покрыть широкий диапазон входной частоты 18–110 ГГц. Максимальный уровень входного сигнала составляет 18–20 дБм, диапазон рабочей температуры: 0...+50 °С.

## Стробоскопические преобразователи

В стробоскопических преобразователях (Sampling Converters) производится выборка мгновенных значений входных сигналов с переносом на частоту ПЧ или преобразование выборок в цифровой код. Для обозначения таких преобразователей используются термины «преобразователи с выборками сигнала» или «стробопреобразователи» (СП).

Возможный вариант схемотехнической реализации стробоскопического узла (sampler component), являющегося ядром устройства и, собственно, преобразователем частоты, приведен на рис. 8а. Он содержит строб-генератор (Strobe Generator), узел выборки (Sampling), схему запоминания (хранения) отсчетов и узел усиления выборки (Charge Amplification Circuitry). С приходом на вход устройства от блока управления сигнала запуска генератор стробирующих импульсов формирует короткие импульсы, под действием которых кратковременно открываются быстродействующие ключевые схемы стробоскопических смесителей. На емкости хранения (Hold Capacitor) происходит запоминание мгновенных значений величины напряжения обрабатываемого сигнала. В качестве собственно узла выборки чаще всего используются диоды Шоттки (sampling diodes). В схемотехнической реализации узла выборки (Sampling Phase Detector, SPD), показанной на рис. 8б, используется диод с накоплением заряда SRD VD1, конденсаторы связи и пара низкочастотных диодов Шоттки (low barrier Schottky) VD2, VD3. Сигнал с выхода стробоскопического смесителя усиливается и преобразуется в цифровой код с помощью быстродействующего аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Использование в строб-генераторе нелинейной линии передачи NLTL (Non-Linear-Transmission-Line) обеспечивает значительно меньшую апертуру выборки, чем у строб-генераторов на основе SRD-диодов, применяемых в большинстве компонентов. Ведущими производителями таких устройств являются компании Picosecond Pulse Labs и Aeroflex/Metelics.

Достоинством стробоскопического метода преобразования сигналов по сравнению с обычным гетеродинным методом является более высокая линейность амплитудной характеристики и простота реализации опорного генератора. Стробоскопические преобразователи применяются во входных устройствах разного измерительного СВЧ-оборудования: осциллографов, частотомеров, фазометров, анализаторов цепей, измерителей девиации, в качестве фазовых детекторов в системах синхронизации и стабилизации частоты сигналов СВЧ. В последнее время стробоскопический метод начал использоваться в блоках преобразования частоты гармонических высоко-

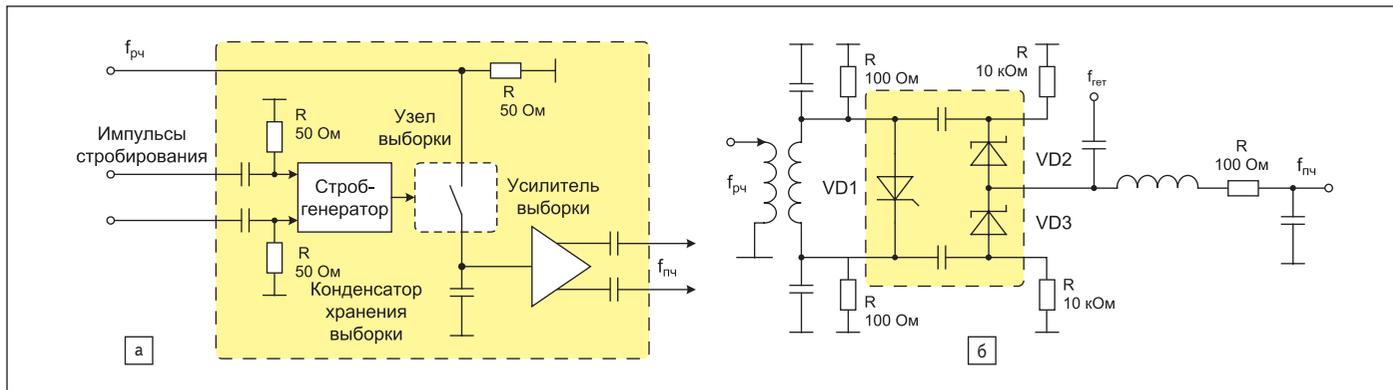


Рис. 8. Принципиальная схема: а) стробоскопического узла; б) узла выборки на диодах

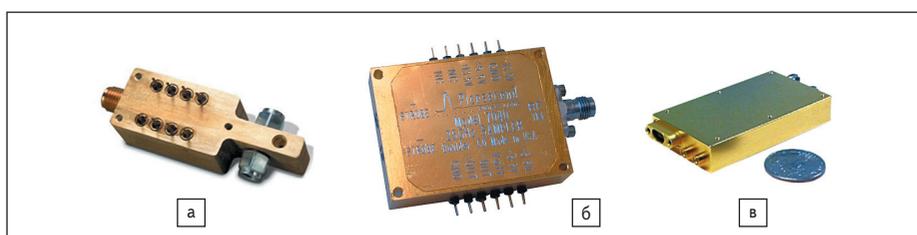


Рис. 9. Модули стробоскопического преобразования сигнала компании Picosecond Pulse Labs: а) компонент на 100 ГГц; б) модуль 7040 (Sampler Module); в) модуль 7600 (Down Conversion Sampler Module)

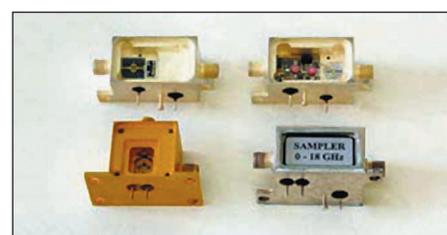


Рис. 10. Стробоскопические преобразователи частоты, выпускаемые ОАО «ФНПЦ «НИПИ «Кварц»

частотных и СВЧ-сигналов для прецизионных устройств, устройствах задания и измерения амплитуды и фазы гармонических сигналов, в приемниках глобальных спутниковых навигационных систем.

Лаборатория Picosecond Pulse Labs (PSPL), ставшая сейчас частью компании Tektronix, реализовала модуль стробоскопического преобразования сигнала вниз по частоте (Down Conversion Sampler Module). Разработанный модуль с шириной рабочей полосы радиочастот более 25 ГГц функционирует при скоростях отсчетов до 2,3 млн выб./с. Модуль преобразования оптимизирован для использования в цифровых приемниках, где важна линейность характеристик при работе на высоких частотах дискретизации во всем диапазоне рабочей частоты. На рис. 9 показано конструктивное выполнение модулей стробоскопического преобразования сигнала (High-Speed Sampler Modules), разработанных компанией PSPL. Стробоскопический модуль 7040 (Sampler Module) содержит строб-генератор, усилитель ПЧ и схему коррекции перегрузки.

В таблице 5 приведены сведения о выпускаемых ОАО «ФНПЦ «НИПИ «Кварц» имени А. П. Горшкова» стробоскопических преобразователях частоты сантиметрового диапазона в коаксиальном исполнении, разработанных для преобразования СВЧ-сигналов диапазона 0–40 ГГц в диапазон относительно низких промежуточных частот 0–1 ГГц (рис. 10).

Стробоскопические волноводные преобразователи миллиметрового диапазона раз-

Таблица 5. Стробоскопические преобразователи частоты в коаксиальном исполнении, выпускаемые ОАО «ФНПЦ «НИПИ «Кварц» им. А. П. Горшкова»

Модель ПрЧ	Одноканальные			Двухканальные	
	7020	7021	7022	7023	7024
Диапазон СВЧ, ГГц	0–18	0–26	0–40	0–18	0–40
Диапазон частот гетеродина, ГГц	0,1–0,4	0,5–8	1–6	0,06–0,15	1–6
Диапазон ПЧ, МГц	0–50	0–800	0–1000	0–30	0–1000
Потери преобразования $K_{пр}$ , дБ	35–40	25–30	35–40	35–40	35–40
Неравномерность потерь $K_{пр}$ , дБ	±3	±3	±1,5	±1,5	±1,5
КСВН по СВЧ-входу	3	3	3	3	3
Мощность гармоник гетеродина на СВЧ-входе, дБм	-40	-30	-30	-35	-30
Габариты, мм	44×24×21	28×28×19	38×36×20	74×60×20	85×47×35
Масса, г	60	35	60	300	450

Таблица 6. Основные характеристики стробоскопических волноводных преобразователей миллиметрового диапазона, разработанных НИПИ «Кварц»

Характеристики	7025	7026	7027	7028	7029	7030
Тип волновода	WR-28	WR-22	WR-19	WR-15	WR-10	WR-6
Диапазон частот СВЧ-сигнала, ГГц	26,5–40	33–50	40–60	50–75	75–110	110–170
Диапазон частот гетеродина, ГГц	1–12			3–12		
Диапазон частот ПЧ, МГц	1–800			1–1000		
Потери преобразования, дБ	10-й гармоники		30	35	50	–
	35	35	35	40	55	55
	20-й гармоники		–	–	–	60
	30-й гармоники		50–200			
Уровень мощности гетеродина, мВт	10–3					
Уровень мощности гармоник гетеродина на СВЧ-входе, мВт	SMA(f)					
Типы соединителей гетеродинного входа и выхода ПЧ	36×29×29		36×19×19		38×34×19,1	
Габариты, мм	50	40		35		50
Масса, г						

работаны НИПИ «Кварц» для преобразования сигналов миллиметрового диапазона 26,5–170 ГГц в диапазон относительно низких промежуточных частот 0–1 ГГц (табл. 6). Преобразователи используются в системах

синхронизации и стабилизации частоты синтетизаторов миллиметрового диапазона в качестве входных устройств широкого класса радиоизмерительного оборудования: амплифазометров, анализаторов цепей, частото-

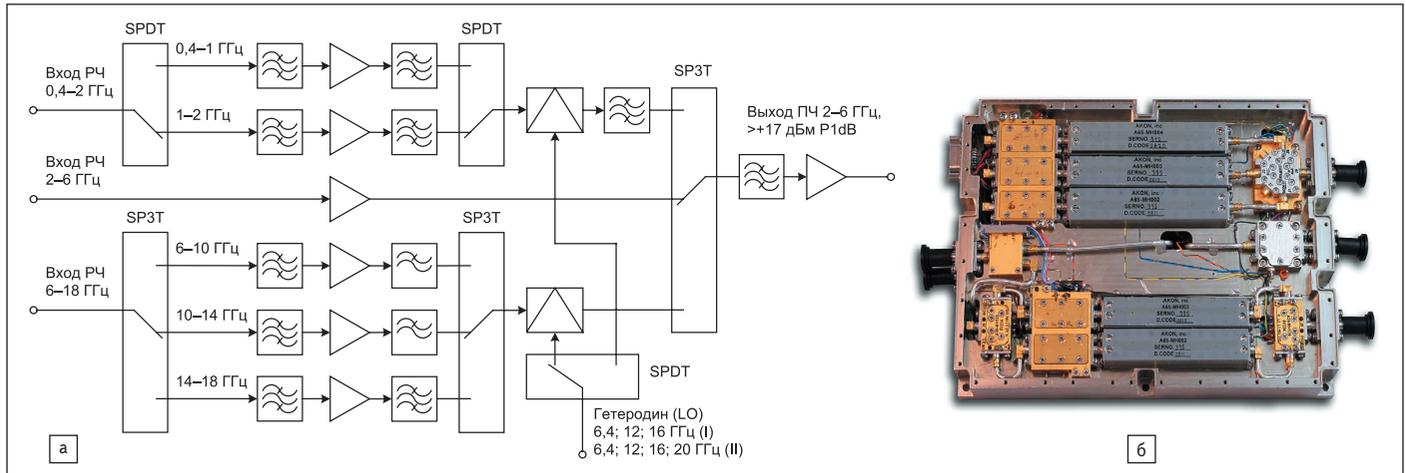


Рис. 11. а) Использование комбинации сверхширокополосных преобразователей с повышением и понижением частоты A20-MX084 от компании AKON; б) конструктивное исполнение шестиполосного тюнера на основе преобразователя A20-MX084

меров и др. Устройства рассчитаны на эксплуатацию в интервале рабочей температуры +5...+40 °С при относительной влажности воздуха до 98%.

### Широкополосные многооктавные преобразователи

Широкополосные преобразователи частоты (ШПрЧ) применяются во многих приложениях современных РЧ-систем. Очень востребованными такие устройства стали в комплексах радиоразведки и радиоэлектронной борьбы, где необходимо максимально быстро обнаруживать и обрабатывать сигналы малого уровня в широкой полосе рабочих частот. Следует заметить, что отнесение тех или иных ПрЧ к классу широкополосных осуществляют сами компании-производители, в силу чего почти у всех разработчиков в ассортименте компонентов имеются свои широкополосные преобразователи. Анализ рынка СВЧ широкополосных преобразователей показывает, что наиболее массовыми изделиями являются преобразователи для диапазона частоты 2–18 ГГц.

При построении широкополосных ПрЧ необходимо решить следующий ряд задач:

- реализовать смеситель сигналов, работающий в требуемом частотном интервале с заданными характеристиками, к которым относятся частотная равномерность коэффициента преобразования, малый уровень шума, широкий динамический диапазон;
- выбрать оптимальный частотный план, обеспечивающий минимальный уровень внутриполосных комбинационных составляющих или даже их полное отсутствие.

Решение всего комплекса задач по улучшению рабочих характеристик таких преобразователей наилучшим образом обеспечивается при использовании комплектов полосовых переключаемых фильтров на входах ПрЧ и на выходе смесителя [4]. Однако при таком подходе возникает проблема интегра-

ции этих фильтров в устройство, заключающаяся в их корректном размещении внутри блока для минимизации паразитных связей, изменении КСВН, амплитуды и фазы выходного сигнала ПрЧ при функционировании в полном диапазоне рабочей частоты. Разумеется, уменьшение числа применяемых фильтров улучшает массогабаритные показатели компонента и его стоимость, однако в конечном итоге может привести к увеличению уровня помех в системе и уменьшению ее устойчивости к воздействию преднамеренных помех — глушению системы. Улучшить рабочие характеристики позволяет тщательная разработка частотного плана устройства и выбор его архитектуры. В частности, хорошим решением при реализации широкополосных ПрЧ является использование архитектуры устройств с двойным преобразованием сигнала путем повышения частоты при первом преобразовании и последующего ее понижения при втором преобразовании [5].

В качестве наглядного примера такого подхода можно привести структурную схему шестиполосного преобразователя A20-MX084 компании AKON, используемого в трактах приема. ПрЧ с тремя входами представляет собой комбинацию сверх-широкополосных преобразователей с повышением и понижением частоты (up and down converter) диапазона 0,4–18 ГГц. Как видно из рис. 11, в тракте преобразования вверх по частоте сигналы диапазона 0,4–2 ГГц проходят через два канальных фильтра преселектора и индивидуально преобразуются в диапазон 2–6 ГГц. Сигналы диапазона 2–6 ГГц проходят через блок без преобразования частоты, подвергаясь только усилению. Сигналы диапазона 6–18 ГГц проходят через три канальных фильтра преселектора и индивидуально преобразуются вниз по частоте в диапазон 2–6 ГГц. Входной коэффициент шума NF (Noise Figure) зависит от диапазона и изменяется в пределах 8,5–12 дБ. Типовой коэф-

фициент преобразования равен 21 дБ, а изоляция (развязка) неиспользуемого канала (channel isolation) составляет 60 дБ.

Ключевым показателем качества широкополосных преобразователей является неравномерность коэффициента преобразования  $K_{пр}$  (Gain Flatness) в диапазоне рабочей частоты или неравномерность уровня выходного сигнала. Так, для рассмотренной модели A20-MX084 компании AKON коэффициент преобразования равен 21 дБ; в 85% полосы пропускания отклонение  $K_{пр}$  от номинала составляет 2 дБ, максимальное отклонение в рабочей полосе частот не превышает 3 дБ.

Вариацию коэффициента преобразования не более 3 дБ обеспечивают и производимые компанией FEI-Elcom многодиапазонные повышающие ПрЧ серии SATUC-4000. Устройство работает в диапазоне частоты 3–9 ГГц, имеет высокий динамический диапазон, разрешение настройки составляет 1 кГц. Этот преобразователь отвечает стандартам Интелсат для наземных станций IESS 308/309 SATCOM. В архитектуре ПрЧ с тройным преобразованием, приведенной на рис. 12, используется неинвертирующий частотный план. Из структурной схемы видно, что для обеспечения широкополосной работы преобразователя с заданными характеристиками с помощью соответствующих полосовых фильтров происходит покаскадное разбиение общего диапазона рабочей частоты на отдельные, более узкие, участки. Основой устройства является высококачественный гетеродин, для реализации которого использовалась передовая технология построения синтезаторов компании Elcom с отличными характеристиками по быстрдействию и фазовому шуму, превышающими требования спецификаций IESS на 6 дБ.

Широкополосный понижающий преобразователь CCM9350 компании Teledyne Cougar (рис. 13) работает в диапазоне входной частоты 1,85–9,35 ГГц, преобразуя сигнал на ПЧ от 0,75–1,25 ГГц и используя внешний

сигнал генератора. Коэффициент преобразования составляет 10 дБ, типовой коэффициент шума 7 дБ, точка компрессии по выходу P1dB — минимум 6 дБм.

Выходной фильтр с полосой пропускания 500, центрированный на частоте 1 ГГц и установленный в цепи ИФ, обеспечивает высокую взаимную изоляцию всех портов преобразователя. ССМ9350 использует 5-бит цифровой аттенуатор с шагом 0,5 дБ для обеспечения суммарного диапазона регулирования усиления 15,5 дБ.

Многооктавный РЧ-преобразователь с повышением MORF (Multi-Octave RF Upconverter) компании NuWaves представляет собой компактный широкополосный ПЧ-РЧ повышающий преобразователь с управлением величиной ослабления и выбираемой пользователем полосой ПЧ. В преобразователе, структура которого приведена на рис. 14, поступает входной сигнал ПЧ в программируемом пользователем диапазоне 2–70 МГц, в котором формируется выходной РЧ-сигнал с любой программируемой пользователем частотой в диапазоне 2–3000 МГц. Устройство имеет разрешение настройки по частоте 5 кГц, диапазон управления затуханием в РЧ-тракте равен 50 дБ; два выбираемых варианта полосы ПЧ — 4 и 35 МГц.

Преобразователь легко настраивается с помощью программы последовательного доступа или дополнительного графического пользовательского интерфейса (GUI). В качестве опции при заказе предлагается комплект разработки, который включает в себя графический интерфейс для панели управления с применением ПК, источник постоянного питания +6 В и пользовательский кабель последовательного интерфейса.

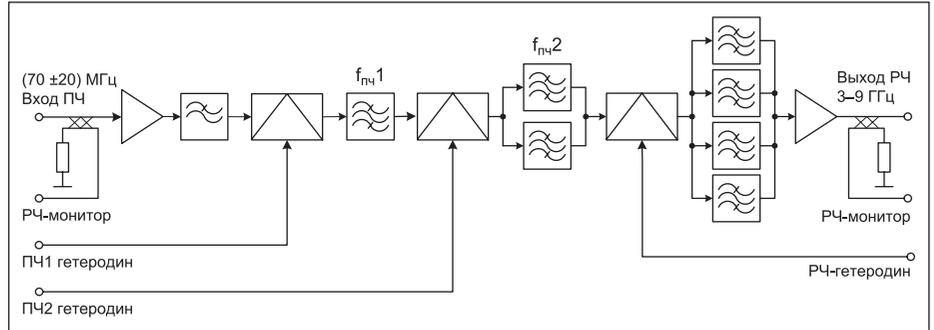


Рис. 12. Многодиапазонный преобразователь частоты с повышением SATUC-4000, выполненный с использованием архитектуры с тройным преобразованием

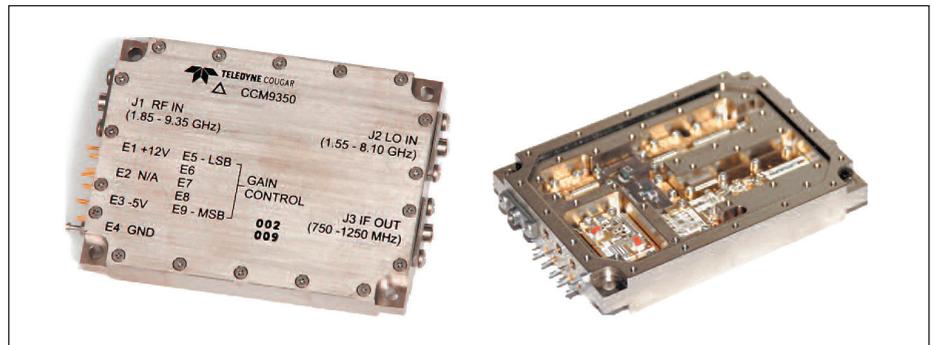


Рис. 13. Широкополосный понижающий преобразователь CCM9350 от компании Teledyne Cougar

Таблица 7. Широкополосные преобразователи частоты

Модель/серия (производитель)	Описание	Диапазон РЧ (гетеродин), ГГц	ПЧ, МГц	Форм-фактор, конструктив
Серия SIDC-6000 (FEI-EIcom Tech)	Широкополосный РЧ с большим ДД. Выход: L-диапазон, 1 или 1,2 ГГц с полосой 500 МГц	0,5–26,5	Выбираемые: 70 / 140 / 160 МГц, полоса: 1–80 МГц	Монтируется в стойку 1U 19"
SATUC-4000 (FEI-EIcom Tech)	Многодиапазонный РЧПов. Большой ДД, архитектура с тройным преобразованием	3–9, шаг перестройки 1 кГц	(70 ± 20) МГц	Монтируется в стойку 1U 19"
Серия QM1002 (11 моделей) (Quonset Microwave)	РЧПов и РЧПон для военных и коммерческих применений	2–18 (полосы до 1 ГГц)	750–1250	Монтируются в стойку 19"
РЧ и РЧ входные блоки (AKON)	РЧПов и РЧПон для военных и коммерческих применений	0,4–18	400–6000	Коаксиальные модули
A25-MH229 (AKON)	Входной РЧПон со встроенным усилителем 0,5–18 ГГц, набором фильтров и Ус средней мощности	18–40	0,5–18	Коаксиальный модуль
DT-4503/С (Comtech EF)	РЧПон С-диапазона	3,4–4,2	52–88 или 104–176	Монтируются в стойку 19"
RF2051 (RF Micro Devices)	Двунаправленный РЧ со встроенным гетеродином	0,03–2,5	0,03–2,5	ИС QFN-32, 5×5 мм
ADRF6658 (Analog Devices)	Широкополосный двухканальный РЧПон с регулируемым УПЧ (DGA) для высококачественных приемников базовых станций	0,69–3,8	10–520	ИС LFCSP-48, 7×7 мм

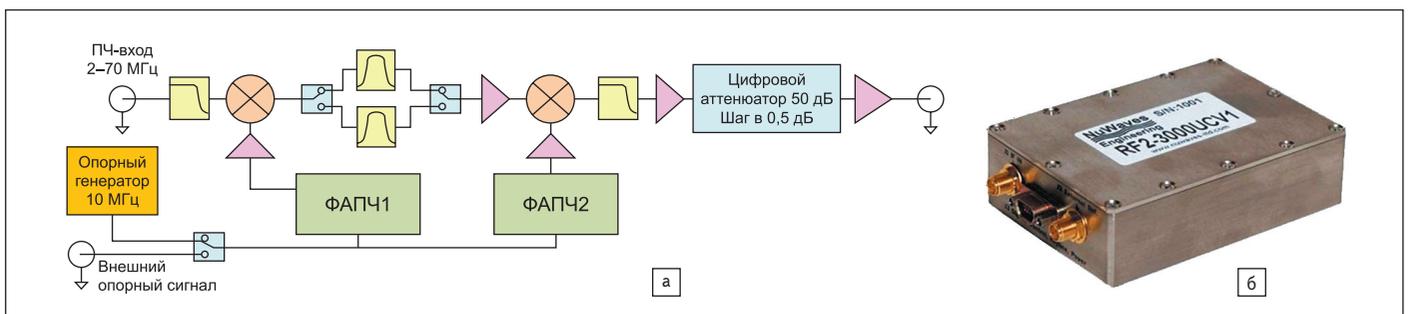


Рис. 14. Многооктавный РЧ-преобразователь с повышением частоты (MORF) модели RF2-3000UCV1 компании NuWaves: а) структура; б) конструктивное выполнение



Рис. 15. а) Конструктивное исполнение многоканальных преобразователей компании L-3 Narda-MITEQ; б) пятиканальная модель серии DSS0818

щего усилителя (LNA) и понижающего частоту смесителя с дифференциальными выходными буферными каскадами. Тракт ВЧ-сигнала гетеродина также содержит интегрированный РЧ-трансформатор — балун. Управление внутренними регистрами осуществляется через простой трехпроводной интерфейс. ADF5904 выпускается в компактном 32-выводном корпусе LFCSP с габаритами 5×5 мм. Эта ИС предназначена для использования в автомобильных и промышленных радарах, радиолокационных датчиках диапазона СВЧ.

Модули преобразователей компании L-3 Narda-MITEQ включают одно-, двух-, трех-, четырех- и пятиканальный преобразователи. Благодаря разнообразным подходам

к проектированию этих систем и подсистем в компонентах реализованы низкий фазовый шум, наличие каналов отслеживания, внутреннего высокостабильного кварцованного источника опорного колебания, возможность удаленного выбора диапазона и характеристик устройства.

К моделям серии DA4, разработанным компанией Miteq, относятся стандартные широкополосные двойные балансные смесители с входными ограничительными защитными диодами и УПЧ. Это позволяет реализовать многоканальные ПрЧ, в частности четырехканальный понижающий преобразователь с интегрированными цепями распределения колебания гетеродина. Данные устройства можно использовать для пеленгования с помощью четырех антенн. Один из каналов таких многоканальных преобразователей может применяться для идентификации сигналов, а остальные — для реализации моноимпульсного приемника.

Компания L-3 Narda-MITEQ предлагает шесть четырехканальных моделей серии DA4 и преобразователь SYS40118C20 (1–18 ГГц). DA40818LC7, наиболее высокочастотная модель этой серии, предназначена для работы с частотами входа и гетеродина на 0,5–18 ГГц при ПЧ, равной 10–250 МГц. Коэффициент преобразования составляет 21 дБ. Пятиканальные ПрЧ с повышением серии DSS0818 (рис. 15) предназначены для использования в широкополосных пеленгационных приемниках DF (Direction Finding Receivers) диапазона 8–18 ГГц.

Кроме того, компания L-3 Narda-MITEQ выпускает четыре трехканальные модели для диапазонов 17,7–18 и 2,2–2,3 ГГц, три трехканальные модели серии UPB3 диапазонов Ka и Ku. Эта компания разработала и 12 моделей

двухканальных преобразователей частот для разных диапазонов и применений.

Шестиканальный понижающий ПрЧ CCM18001 с согласованием по амплитуде и фазе от компании Teledyne Cougar предназначен для работы на частотах 2–18 ГГц. Герметизированный преобразователь обеспечивает усиление РЧ-ПЧ величиной 25 дБ при использовании частоты ПЧ в районе 960 МГц с рабочей полосой до 500 МГц (рис. 16). Для работы преобразователя требуется один общий сигнал гетеродина с уровнем –6 дБм. Каждый идентичный канал содержит переключаемый аттенуатор расширения диапазона на 20 дБ и шесть переключателей 2–18 ГГц, управляемых одним входным сигналом уровня TTL. В состав цепи ПЧ, осуществляющей усиление, регулировку фазы, температурную компенсацию, входит полосовой фильтр с эквалайзером. Коэффициент шума составляет 13,5 дБ, а точка пересечения по выходу IP3 находится на уровне 25 дБм. Согласование амплитуды между каналами составляет 1 дБ, а согласование фазы — менее 20°.

### Преобразователи сигналов цифровых потоков

К еще одному классу цифровых преобразователей частоты относятся преобразователи потоков оцифрованных сигналов с понижением или повышением их частоты (digital up/down converters, DUC/DDC). Такие цифровые преобразователи являются ключевыми компонентами современных цифровых систем радиосвязи, связывающими тракт обработки сигнала бейсбэнд-тракта с входным РЧ-блоком.

Цифровые преобразователи сигналов цифровых потоков с понижением и повыше-

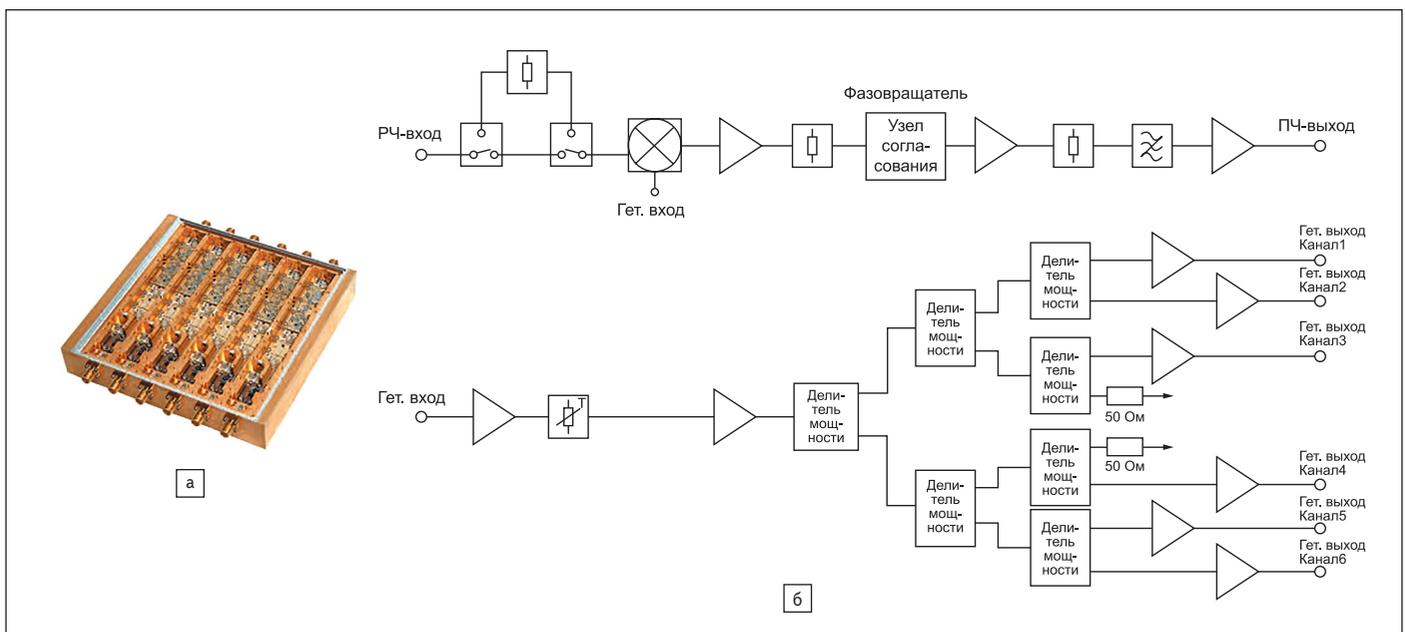


Рис. 16. Шестиканальный понижающий ПрЧ с рабочими частотами 2–18 ГГц CCM18001 от компании Teledyne Cougar: а) конструктивное исполнение; б) структурная схема

**Таблица 8.** Преобразователи потоков оцифрованных сигналов с понижением и повышением их частоты от разных производителей

Компания-производитель	Модели преобразователей
Analog Devices	Компания производит целый ряд цифровых преобразователей сигналов различного назначения, в частности, цифровые преобразователи частоты/модуляторы семейства VersaCOMM. Повышающий преобразователь частоты сигнала AD6633 — первое изделие компании Analog Devices с технологией снижения пик-фактора сигналов (crest-reduction technology). Цифровой преобразователь сигналов с понижением AD6636, использующий оцифрованные выборки ПЧ или выборки бейсбэнд-тракта.
National Semiconductor	ПрЧПон (DDC) CLC5903 — двухканальный преобразователь цифрового сигнала вниз по частоте.
Texas Instruments	ПрЧПон (DDC) GC5018. Имеет восемь цифровых понижающих каналов преобразования.

нием частоты используются для обработки оцифрованных потоков комплексного многоканального сигнала цифровых систем связи.

Цифровой преобразователь с повышением частоты (Digital Up-Converter, DUC) является частью системы обработки сигналов тракта передачи цифрового РЧ-блока (digital radio front end, DFE). Такой преобразователь выполняет функцию фильтрации и преобразования исходного цифрового бейсбэнд-сигнала в сигнал с более высокой скоростью следования выборок (отсчетов) сигнала, которые затем через цифро-аналоговый преобразователь поступают в аналоговый выходной РЧ-блок. При этом преобразователь может уменьшать пик-фактор сигнала (Crest Factor Reduction, CFR), вводить цифровые предискажения (Digital Pre-Distortion, DPD), корректировать смещение I/Q-координат (I/Q offset correction) сигнала и выполнять другие вспомогательные функции обработки РЧ-сигналов, применяемые в трактах передачи до ЦАП. В состав преобразователя может входить узел смешивания многочастотных сигналов (multi-carrier mixing stage) для объединения нескольких несущих в сложный составной сигнал рабочего диапазона.

Цифровой преобразователь с понижением частоты (Digital Down-Converter, DDC) является частью системы обработки радиосигналов цифрового тракта приема. Преобразователь устанавливается после АЦП, цепи автоматической регулировки усиления (Automatic Gain Control, AGC)

и других вспомогательных узлов обработки РЧ-сигналов. Преобразователь выполняет фильтрацию и преобразование сигнала путем снижения скорости формирования выборок входного РЧ-сигнала. Эту скорость можно изменить до номинала типовой скорости обработки выборок в бейсбэнд-тракте или до целочисленного кратного значения этой скорости, например удвоенного значения, для восстановления тактовой символьной последовательности (symbol timing recovery). Такой преобразователь может также выполнять преобразование частоты, чтобы сдвинуть каждую несущую многочастотной системы в положение, необходимое для демодуляции в бейсбэнд-тракте.

Рассматриваемый класс цифровых преобразователей используется в оборудовании более высоких, по сравнению с традиционными аналоговыми методами преобразования, уровней производительности с возможностью программирования. Преобразователи предназначены для систем интеллектуальных антенн, приемников многоканальных систем связи, устройств спектрального анализа, программно-определяемого радиооборудования (SDR), линейризованных усилителей базовых станций, систем точка-точка, точка-многоточка и спутниковых модемов.

Схемотехническая реализация алгоритмов преобразования DUC/DDC может осуществляться с использованием нескольких вариантов: программируемых пользователем вентильных матриц (Field-Programmable Gate

Array, FPGA), программируемых логических интегральных схем (Complex Programmable Logic Device, CPLD, ПЛИС) или микропроцессоров. Варианты аппаратно-программных средств для этого предлагают крупнейшие производители таких изделий: Xilinx, Altera, Lattice Semiconductor.

В таблице 8 приведены краткие сведения о ряде цифровых ПрЧ разных производителей.

## Литература

1. Maas S. A. Microwave Mixers. Norwood, MA: Artech House, 1986.
2. Hassun R. Frequency Converters: Understanding the Benefits of Simple and Complex Architectures // Microwave Journal. 2006. Vol. 49. Iss. 10 (2006-01).
3. Morrissey J., Walsh P. High Performance Integrated 24 GHz FMCW Radar Transceiver Chipset for Auto and Industrial Sensor Applications. [www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/High-Performance-Integrated-24-GHz-FMCW-Radar-Transceiver-Chipset.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/High-Performance-Integrated-24-GHz-FMCW-Radar-Transceiver-Chipset.pdf)
4. Kapoor A., Toledano A. The Changing Landscape of Frequency Mixing Components. [www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/The-Changing-Landscape-of-Frequency-Mixing-Components.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/The-Changing-Landscape-of-Frequency-Mixing-Components.pdf)
5. Cornwell G., Gupta Ch. Investigate Wideband Frequency Converters // Microwaves & RF. 2016. April.
6. Hindle P. Mil SatCom Capacity Crunch: The BUC Stops Here // Microwave Journal. 2009. August, 1. [www.microwavejournal.com/articles/8313-mil-satcom-capacity-crunch-the-buc-stops-here](http://www.microwavejournal.com/articles/8313-mil-satcom-capacity-crunch-the-buc-stops-here)
7. Dunsmore J. P. Testing satellite frequency converters // Microwave Journal. 2007. Vol. 50. Iss. 8.
8. Aycin E. Satcom Transceiver Delivers Linear 13 W. [www.nardamiteq.com/product-spec/NARDA\\_finalePrint.pdf](http://www.nardamiteq.com/product-spec/NARDA_finalePrint.pdf)
9. Манасевич В. Синтезаторы частот (Теория и проектирование): пер. с англ. / Под ред. А. С. Галина. М.: Связь, 1979.