

СВЧ-преобразователи частоты.

Часть 4. Подсистемы преобразования частот

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

В четвертой части публикации рассматриваются подсистемы преобразователей частоты с повышением частоты и понижением входной частоты, которые выполняются в виде отдельных конструктивных блоков и выпускаются в разных конфигурациях и форм-факторах, определяемых потребителями. Приведена условная классификация таких подсистем.

В разных вариантах и под разными названиями преобразователи частот реализуются как функционально законченные подсистемы для переноса входящих сигналов СВЧ в разные частотные диапазоны для дальнейшей их обработки с помощью широко распространенного или стандартного РЧ-оборудования.

Перенос сигналов вниз по частоте производится для того, чтобы их можно было обработать или проанализировать с помощью широко распространенного оборудования, работающего на частотах много меньших исходных.

Перенос частот вверх осуществляется, в основном, чтобы перенести в заданный рабочий диапазон сигналы, сформированные на более низких частотах опять-таки с помощью имеющегося в распоряжении или стандартного РЧ-оборудования. В системах измерения и тестирования производится расширение вверх по частоте рабочего диапазона имеющихся в наличии высококачественных измерительных или гетеродинных опорных генераторов. Подсистемы преобразователей частот с повышением частоты и понижением входной частоты выпускаются в разных конфигурациях и конструктивном исполнении (форм-факторах), которые определяют запросами потребителей и номиналом рабочих частот. В этом случае преобразователи выполняются в виде отдельных конструктивных блоков, имеющих разъемы для подачи РЧ-сигналов и сигналов управления. Чаще всего используются варианты реализации подсистем ПрЧ в виде автономных (Stand Alone) устройств для настольной или напольной установки в полном корпусе или шкафу, монтируемых в стойку (Rack Mount), приборных или настольных (Desktop) устройств.

В соответствии со сложившейся на рынке СВЧ-компонентов практикой рассматриваемые преобразователи можно отнести к разным классам по основному направлению их применения. Заметим, что это деление достаточно условно и определяется самой компанией-производителем.

Блоки преобразования сигналов ВУС/ВДС

Большое число производителей компонентов использует для обозначения подсистем преобразования частот разного назначения и конструктивного исполнения устойчивые аббревиатуры ВУС (Block UpConverter) и ВДС (Block DownConverter) — блоки повышения и понижения частоты (табл. 1). В эту группу входят компоненты самого разного назначения и конструктивного исполнения [6].

По данным поисковой системы РЧ- и микроволновых компонентов everything RF, рынок основных производителей блоков ВУС представляют 780 изделий от 22 производителей, среди которых: Actox (220 моделей), New Japan Radio (131 модель), Agilis (80 моделей), Belcom Microwaves (64 модели), L-3 Narda-MITEQ (52 модели), Norsat (49 моделей), Communications & Power Industries (28 моделей).

Блоки преобразования систем спутниковой связи

В особую группу можно выделить блоки преобразования вверх по частоте систем спутниковой связи (ВУС). В одном блоке, применяемом для передачи сигналов на спутник, совместно используется преобразователь частоты с повышением и выходной усилитель мощности [7]. В отечественной практике нет установившегося названия устройств данного класса. Названием, отражающим функциональную суть устройства, является «преобразователь по частоте с выходным усилителем мощности» (ПрЧУМ).

Это устройство выполняет две функции: преобразование частоты в необходимый диапазон частот С, Х, Ku или Ka и последующее усиление мощности радиосигнала. Передача таких частот на антенну по коаксиальному кабелю приводит к большим потерям из-за затухания в нем сигнала, а использование длинных волноводов резко усложняет и удорожает систему. По этой причине ПрЧ с выходным усилителем мощности (ВУС) устанавливается в непосредственной близости от антенны — на волноводном фланце облучателя антенны, а сигнал на него передается по коаксиальному кабелю на более низких ПЧ, находящихся, как правило, в L-диапазоне 1–2 ГГц. Все другое необходимое оборудование спутниковой связи располагается на некотором удалении от антенны. Блок преобразования осуществляет перенос сигнала на рабочую частоту и его последующее усиление до необходимого уровня.

Конструкция этих преобразователей, предназначенных для установки непосредственно на антенне, должна иметь герметичное всепогодное исполнение. Корпус таких ПрЧ, как правило, имеет радиаторы для отвода выделяющегося при работе тепла. Внутри корпусов устанавливаются вентиляторы принудительного охлаждения. Выход ПрЧУМ выполнен в виде стандартного волноводного фланца, который подключается непосредственно к облучателю антенны или

Таблица 1. Использование блоков ВУС/ВДС в разных частотных диапазонах

Диапазон частоты, ГГц	Количество моделей	Компании
Ku Band (13,75–14,5)	388	16 компаний; Actox (117 моделей); New Japan Radio (91 модель)
C Band (5,85–7,02)	240	15 компаний; Belcom Microwaves (64 модели); Actox (58 моделей)
Ka Band (29–31)	109	11 компаний; L-3 Narda-MITEQ (44 модели)
X Band (7,9–8,4)	58	14 компаний; Actox (22 модели); Agilis (11 моделей)
DBS	12	L-3 Narda-MITEQ
DBS Band (17,3–18,4)	6	Actox; Agilis; Terrasat Communications
Q Band (42,5–43,5)	8	L-3 Narda-MITEQ
K Band (17,3–18,1)	1	Genmix Technology
L Band	3	Comtech Xicom Technology; General Dynamics SATCOM Technologies; Peak Communications Limited

соединяется с волноводом. На входном порте ПЧ-сигнала устанавливается высокочастотный коаксиальный соединитель.

В основной массе ПрЧ с выходным усилителем мощности используются твердотельные усилители. В этом случае для их обозначения используется аббревиатура SSPB (Solid State Power Block UpConverter). В последние годы в блоках стала использоваться полупроводниковая технология на основе нитрида галлия (GaN), позволяющая увеличить КПД. В устройствах большой мощности с высоким КПД применяются лампы бегущей волны (ЛБВ) (TWTA).

Спутниковые преобразователи с малошумящим усилителем LNB

Для обозначения блоков преобразователей сигналов с понижением (BDC) систем спутниковой связи, на входе которых устанавливается малошумящий усилитель, ряд производителей в англоязычной терминологии используют обозначение LNB (Low Noise Block downconverter). У российских специалистов такие преобразователи сигнала вниз по частоте (рис. 1) имеют краткое обозначение «спутниковый конвертер».

По данным поисковой системы everything RF, на рынке блоков LNB представлены 236 моделей от основных 12 производителей. Наиболее активными компаниями являются: New Japan Radio (88 моделей), L-3 Narda-MITEQ (60 моделей), Norsat

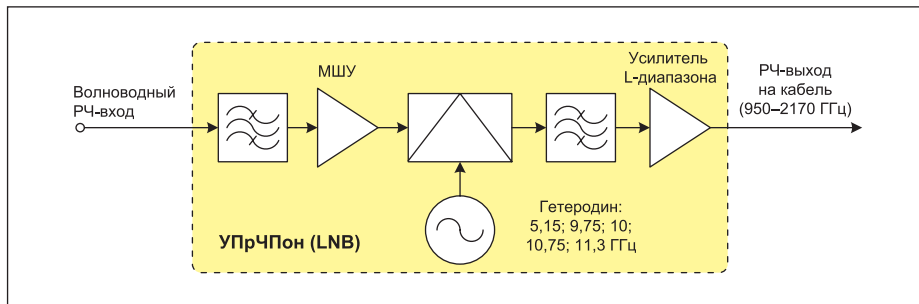


Рис. 1. Обобщенная структура малошумящего понижающего ПрЧ с малошумящим усилителем LNB

Таблица 2. Спутниковые конвертеры LNB

Производитель	Количество моделей	Описание
New Japan Radio (www.micro.njr.com/eng/products.html)	88	Серия NJS. Диапазоны: С, Ку, Ка. ФАПЧ СЧ с внешним и внутренним ОГ
L-3 Narda-MITEQ (www.nardamiteq.com/page.php?ID=340)	60	ПрЧПон до 60 ГГц. Диапазоны: L, С, Х, Ку, К, Ка, Q и V. Многодиапазонные (до 4 каналов) и многоканальные версии
Norsat (www.norsat.com)	58	Диапазоны: К, Ка, С и X
Orbital Research (www.orbitalresearch.net)	17	Диапазоны: К, Ка, С и X
Acorde Technologies (www.acorde.com)	13	ПрЧПон (LNB) Ка-диапазона
Advantech Wireless (www.advantechwireless.com/products/cxku-band-redundant-lnaln-systems-awla-series)	6	ПрЧ с резервированием и без серии AWLA. Диапазоны С, Ку, X
Agilis (www.agilissatcom.com/vsat/rf-products)	8	ПрЧ серий АСА. Диапазоны: К, Ка, С, Ку, L и X
Actox (www.actox.com)	8	Диапазоны: К, Ка, С, Ку и X

(58 моделей), Orbital Research (17 моделей). Краткие сведения о номенклатуре спутниковых конвертеров LNB представлены в табл. 2, а на рис. 2–3 показано конструктивное исполнение различных блоков.

Основу систем преобразования частоты с понижением LNB компании Advantech

Wireless серии AWLA составляет линейка высоконадежных малошумящих усилителей, ранее разработанных этой компанией. На рынке предлагаются модели С-, Ку- и X-диапазонов с шумовой температурой, удовлетворяющей самым современным требованиям. Эти конвертеры предназначены



Рис. 2. а) Конструктивное исполнение спутниковых конвертеров моделей С- и Ку-диапазонов компании New Japan Radio; б) влагозащищенный корпус конвертера К-диапазона компании Agilis

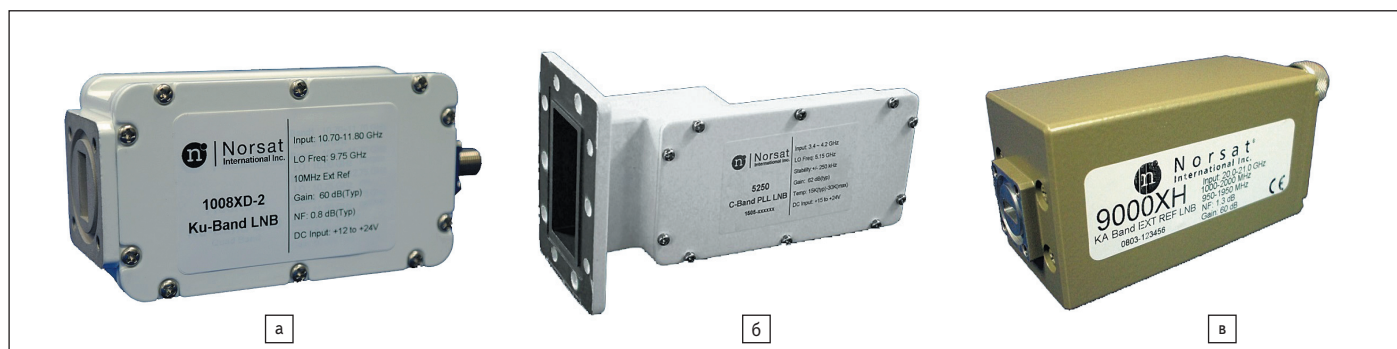


Рис. 3. Спутниковые конвертеры LNA компании Norsat: а) Ку-диапазона; б) С-диапазона; в) модель 9000XH Ка-диапазона

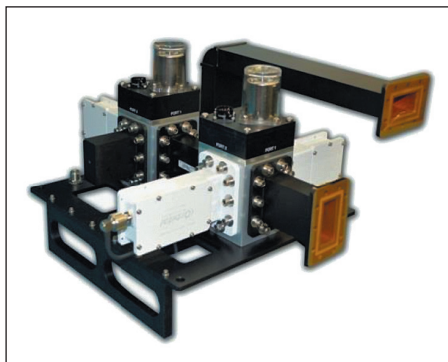
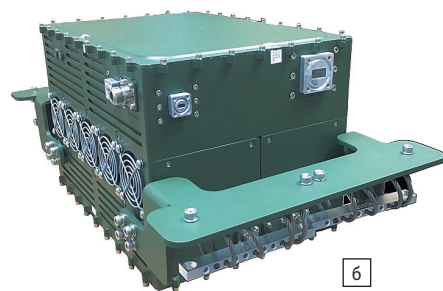


Рис. 4. Блок преобразования частоты LNB с понижением серии AWLA компании Advantech Wireless в конструктивном варианте с резервированием



Рис. 5. а) Преобразователь SSPB модели ABD50X/ABD50XF мощностью 50 Вт X-диапазона компании Actox; б) выпускаемый компанией Agilis двухдиапазонный преобразователь SSPB серии ALB KU/KA для частот 13,75–14,8 ГГц (Ku-диапазон) и 29–31 ГГц (Ka-диапазон) мощностью 300 Вт



для использования в системах с резервированием по схеме 1:1 или 1:2. Автоматическое переключение на резерв осуществляется контроллером внешнего исполнения, установленным на монтажную пластину вместе с блоками МШУ и коаксиально-волноводными переключателями (рис. 4).

Системы резервированных блоков конвертеров позволяют минимизировать время вынужденного простоя системы в случае отказа основного блока, обеспечивая горячее резервирование с помощью средств автоматического переключения на резерв. Для контроля и управления системой используется установленный на монтажную пластину компактный контроллер с интерфейсами RS-485 и RS-232. Кроме того, система может поставляться с дистанционной панелью контроля и управления стоечного исполнения. В устройстве используются высококачественные коаксиально-волноводные переключатели; опционально ПрЧ может иметь тестовые порты на входе и выходе системы. В преобразователе осуществляется контроль тока, потребляемого блоками LNB, для обнаружения аварий. При выходе основного LNB из строя происходит автоматическое переключение на резервный.

Блоки преобразования большой мощности (SSPB, BUC/SSPA)

Для работы в системах спутниковой связи, радиолокационных системах и ряде других приложений необходимы сигналы значительной мощности. Как уже упоминалось, при работе в диапазоне СВЧ применяются повышающие ПрЧ с усилителями мощности на выходе, зачастую устанавливаемые в непосредственной близости от антенны. Эти устройства принято делить в соответствии с величиной выходной мощности на три группы: малой мощности — до 3 Вт; средней мощности — до 10 Вт и большой мощности — выходная РЧ-мощность превышает 10 Вт. Для их обозначения производители используют аббревиатуру SSPB (Solid State Power Block UpConverter) или более расширенную: BUC/SSPA. Заметим, что преобразователи данного класса отличаются большим разнообразием конструктивного исполнения (рис. 5). Основные сведения о наиболее активных производителях ПрЧПов приведены в табл. 3. Подавляющее число этих преобразователей содержат выходной УМ, т. е. относятся к классу SSPB.

Преобразователи серии SSPBg-210C, выпускаемые одним из наиболее активных производителей компонентов данного класса — компанией Advantech, представляют собой выполненные по нитрид-галлиевой (GaN) технологии преобразователи частоты «вверх» (BUC) наружного исполнения со встроенным усилителем мощности. Они предназначены для работы в С-диапазоне и выпускаются в очень компактном корпусе (рис. 6).

Усилители-преобразователи оснащены блоком питания, гетеродином с ФАПЧ (фазовой автоподстройкой частоты), смесителем, фильтром и системой охлаждения. В преобразователях используется защита

Таблица 3. Блоки преобразования большой мощности BUC

Производитель	Количество моделей	Описание
Actox (www.actox.com)	220	BUC и LNB для диапазонов С, X, Ku и Ka
New Japan Radio (www.micro.njr.com/eng/products.html)	131	Серия NJT: С- (2–10 Вт); Ku- (1,5–40 Вт); Ka-диапазон/ОЗв-сети (5, 10 Вт)
Agilis (www.agilissatcom.com/vsat/rf-products)	80	ПрЧ серий ALB, С-Д (2–1500 Вт), диапазоны X, Ku, Ka (500 Вт), DBS, L-диапазон, двухдиапазонные
Belcom Microwaves (www.belcommicrowaves.com)	64	BUC небольшой мощности (1–8 Вт), С-диапазона; С-FLAME средней мощности BUC (10–50 Вт); Ku-серия средней мощности BUC (16, 20, 25 Вт)
L-3 Narda-MITEQ (www.nardamiteq.com/page.php?ID=340)	52	ПрЧПов до 60 ГГц; L-, С-, X-, Ku-, K-, Ka-, Q- и V-диапазоны. Многодиапазонные и многоканальные версии
Norsat (www.norsat.com)	49	Диапазоны Ku, Ka, С, X, Ku мощностью 5–250 Вт. Для применения в СОТМ/СОТР, портативное оборудование, VSAT, радиопротиводействие, РЛС
Advantech Wireless (www.advantechwireless.com)	12	Диапазоны С, Ku, Ka, S, X. До 6600 Вт для С-, X-диапазонов

от ухода параметров при изменении температуры и сбоя синхронизации гетеродина. Влагозащищенный корпус модели SSPBg-210C эффективно отводит тепло за счет продуманной конструкции. Безаварийная работа достигается за счет высокого КПД блока питания и особой конструкции. Высокий КПД и низкое энергопотребление, малый вес и компактные размеры делают данные SSPB особенно привлекательными для использования в составе переносных спутниковых терминалов или для монтажа прямо на облучателе антенны.



Рис. 6. Очень компактный преобразователь GaN BUC/SSPA/SSPB С-диапазона с выходной мощностью 16/20/25 Вт от компании Advantech

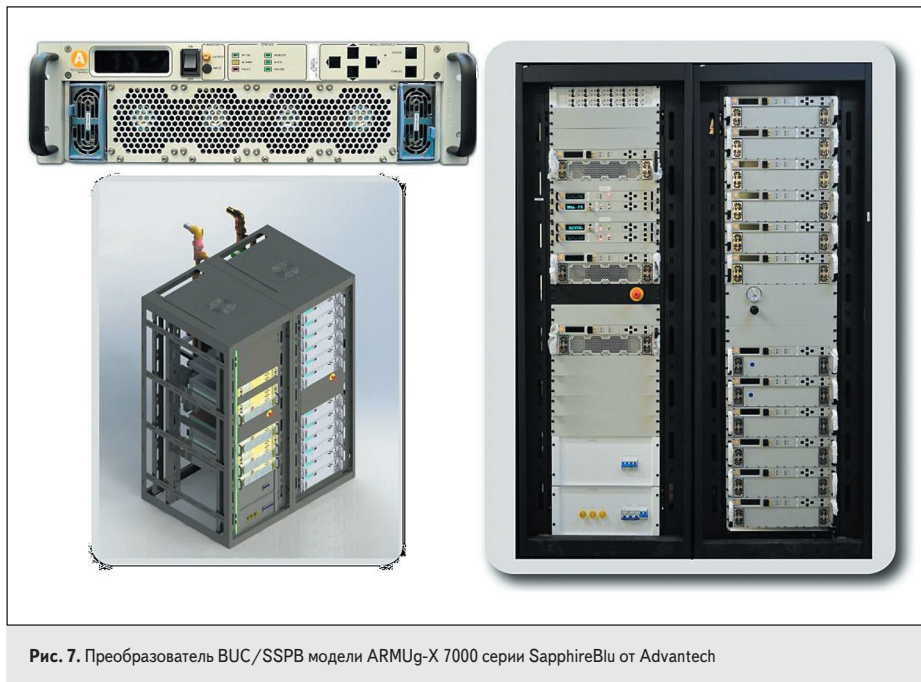


Рис. 7. Преобразователь BUC/SSPB модели ARMUg-X 7000 серии SapphireBlu от Advantech

(TMS) компонент предназначен для создания преобразователей с мощными каскадами усиления на выходе. Выходные частоты тракта: 29–30 или 30–31 ГГц при использовании ПЧ в полосе 1–2 ГГц.

Для линейаризации тракта используется обратная связь по РЧ (рис. 8). Интерфейс RS-422 также позволяет получать информацию о входной мощности для смесителя, внутренней температуре и синхронизации гетеродина (LO). Благодаря расширенным функциональным возможностям преобразователя компания имеет возможность предложить потребителям стандартный продукт, который работает с большинством современных систем спутниковой связи SATCOM. Конструктивно ПрЧ выполняется в модульном варианте с коаксиальными соединителями.

Из графиков, приведенных на рис. 9, видно, что даже несложная схемотехнически линейаризация позволяет увеличить диапазон линейной работы тракта усиления на частотах до 30 ГГц. Линейаризация тракта осуществлялась на частотах 29,25 и 75 ГГц.

Двунаправленные преобразователи частот (Up/Down Converters)

Подсистемы двунаправленного преобразования частот ДвПрЧ (Up/Down Converters), иногда называемые приемо-передающими модулями с переносом частоты, представляют собой объединенные в одном конструктивном элементе (корпусе) блоки полнодуплексного преобразования сигналов, в состав которых входят каналы с преобразователями с понижением и повышением частоты.

Научно-производственное предприятие «Салют» (Нижний Новгород) предлагает модули преобразователей частоты M55321, M55322 для диапазонов рабочих частот C, X, Ku. Приемно-передающие модули с переносом

Устройства имеют выходную мощность 16, 20 или 25 Вт и работают в диапазонах: стандартный CS: 5,85–6,425 ГГц, расширенный CX: 5,85–6,725 ГГц и нижний CRL: 5,725–6,525 ГГц. По информации компании, характеристики устройства превосходят требования стандарта IESS 308/309 по фазовому шуму более чем на 3 дБ.

Помимо наиболее популярных конфигураций SSPB — усилителей со встроенным преобразователем с повышением из L-диапазона, компания Advantech разработала множество других решений. Производитель предлагает законченные системы для приема и передачи сигналов со встроенными преобразователями из ПЧ любых диапазонов в спутниковые частоты под разные задачи заказчиков.

Наибольшую выходную мощность в этом классе преобразователей имеет BUC/SSPB-

модель ARMUg-X 7000 серии SapphireBlu, выпускаемая компанией Advantech (рис. 7). Преобразователь, выполненный по GaN-технологии для использования в X-диапазоне, имеет выходные рабочие частоты 7,9–8,4 ГГц; входная частота ПрЧ: 950–1450 МГц (L-диапазон). Выполненное в одиночном стоечном варианте, это устройство обеспечивает выходную мощность 6,6 или 3,3 кВт при резервировании 1:1. В 2014 г. ассоциация World Teleport удостоила устройство диплома Teleport Technology («Технология телепорта») и назвала его самым инновационным изделием 2013 г.

Интересным решением на рынке СВЧ-преобразователей является блок преобразователь с повышением (BUC) Ka-диапазона с интегрированным ПЧ-линеаризатором TSA-214144. Производимый компанией Teledyne Microwave Solutions

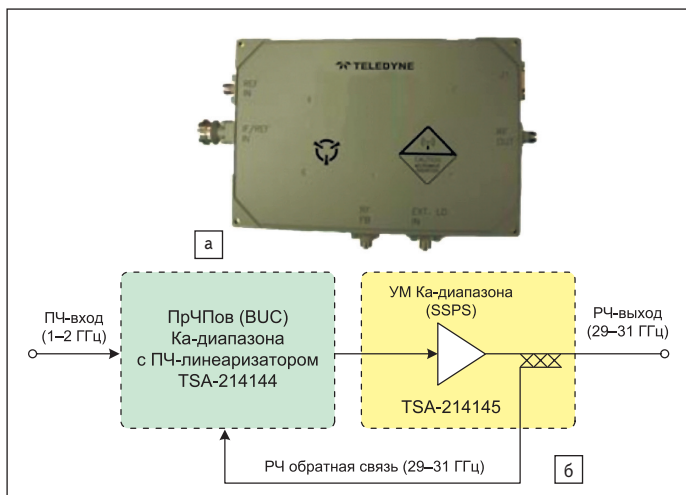


Рис. 8. а) Блок-преобразователь с повышением (BUC) Ka-диапазона с интегрированным ПЧ-линеаризатором TSA-214144; б) структура двухдиапазонного тракта передачи с его использованием

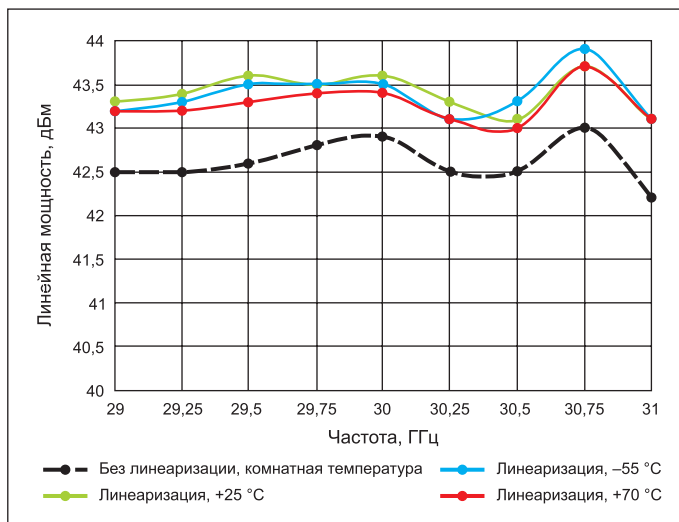


Рис. 9. Пример улучшения линейности тракта передачи с линейаризатором TSA-214144 при использовании модуляции QPSK

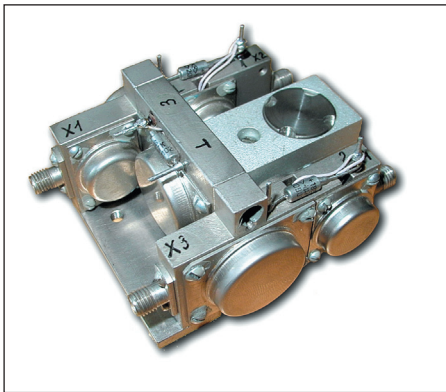


Рис. 10. Модули двунаправленных преобразователей частоты М55321, М55322, выпускаемые НПП «Салют»



Рис. 11. Серия 80000 и 85000 преобразователей SATCOM компании Narda

сом частоты, в состав которых входят прямой и обратный каналы преобразования частоты, имеют общий гетеродин (рис. 10). Рабочий диапазон перекрывается изделиями с 12 литерами. Все элементы модулей выполнены на герметичных основаниях, входы и выходы СВЧ-сигналов — розетка, тип IX, ГОСТ 20265-83. Диапазон рабочей температуры преобразователей составляет $-60...+70^{\circ}\text{C}$.

Преобразователи имеют следующие основные характеристики:

- коэффициент передачи прямого канала при Рвх-равной -60 дБВт: не менее 29 дБ;
- коэффициент передачи обратного канала при Рвх-равной -50 дБВт: не менее 20 дБ;
- развязка между входом прямого канала и выходом обратного канала: не менее 45 дБ;
- развязка между входом обратного канала и выходом прямого канала: не менее 55 дБ;
- коэффициент шума прямого канала: не более 11 дБ;
- нестабильность частоты гетеродина, не более: долговременная: 5×10^{-4} ; кратковременная: 10^{-7} ;
- напряжение питания: 8,7–9,3 В при потребляемой мощности не более 4 Вт;
- масса: не более 300 г;
- габаритные размеры: 78×66×40 мм.

На рис. 11 представлены производимые компанией Narda SATCOM приемопередатчики и устройства двунаправленного преобразования частот серий 80000 и 85000 [8].

Производимые компанией Narda преобразователи/приемопередатчики SATCOM серии 80000 предназначены для диапазонов Ku, X и Ka. Эти изделия используют конечную модульную технологию SMT IMA компании Narda для реализации компактных трансиверов высокой производительности. Компания предлагает три модели, охватывающие диапазоны X, Ku и Ka. Каждый приемопередатчик содержит блоки BDC и BUC, твердотельный УМ, микропроцессор и все необходимые функции управления.

Производимый компанией SATCOM преобразователь/приемопередатчик серии 85000 предназначен для диапазонов Ku, X и Ka. Три

модели подсистемы двунаправленного преобразования частот, охватывающие диапазоны X, Ku и Ka, предлагаются для тех применений, в которых предпочтение отдается использованию внешнего усилителя мощности SSPA. Они содержат все компоненты серии 80000, кроме УМ, и выпускаются в корпусе меньшего размера и веса.

Заключение

В статье представлен обзор состояния и развития российского и зарубежного рынков преобразователей частот СВЧ-диапазона.

По данным поисковой системы everything RF, на рынке основных производителей преобразователей частот представлено более тысячи изделий разного назначения и конструктивного исполнения от 32 производителей. Основными производителями являются Miteq, Mini Circuits, SAGE Millimeter, MACOM, Marki Microwave, API Technologies, Analog Devices.

Наиболее высокочастотные преобразователи с верхними граничными частотами 35–45 ГГц в разных вариантах корпусирования предлагает целый ряд этих компаний-производителей. Компания Analog Devices выпускает ряд моделей преобразователей (HMC8119, HMC7587, HMC8119 и др.) с повышением и понижением для работы на частотах до 86 ГГц. И, наконец, отметим компанию SAGE Millimeter, которая выпускает ряд преобразователей разного назначения, конструктивного исполнения и топологии для диапазона 90–170 ГГц.

На отечественном рынке активно работает ОАО «ФНПЦ «ННИПИ «Кварц» им. А. П. Горшкова». Стробоскопические волноводные преобразователи мм-диапазона разработаны этой компанией для преобразования сигналов диапазона 26,5–170 ГГц в диапазон относительно низких промежуточных частот 0–1 ГГц. В этой связи можно упомянуть АО НПП «АМЭ», АО «Микро-ВИС», ООО «Радис», НПО «Салют».

В настоящее время компании-производители предлагают значительное ко-

личество преобразователей частоты разных диапазонов, выполняемых не только в интегральном и модульном вариантах, но и в волноводном исполнении. Таким образом, у потребителей имеется широкий выбор преобразователей для конкретных применений.

Заметим, что еще разнообразнее номенклатура смесителей частот, которые при необходимости можно использовать для реализации ПрЧ с уникальными характеристиками. На рынке в настоящее время представлены 2949 изделий от 72 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
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
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
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
9. Манасевич В. Синтезаторы частот (Теория и проектирование): пер. с англ. / Под ред. А. С. Галина. М.: Связь, 1979.