

Сверхширокополосные усилители компании B&Z Technologies

СЕРГЕЙ ДИНГЕС, к.т.н., доцент, зам. зав. кафедрой радиопередающих устройств, МТУСИ

ЕЛЕНА ХАСЬЯНОВА, инженер, ООО «Радиокомп»

В статье представлены сверхширокополосные усилители американской компании B&Z Technologies, приведены параметры некоторых моделей сверхмалошумящих усилителей и широкополосных усилителей большой мощности. В конце статьи дан краткий глоссарий используемых в ней терминов.

Инженеры американской компании B&Z Technologies более тридцати лет являются лидерами в разработке современных передовых технологий усилителей СВЧ- и миллиметрового диапазонов. Компания разрабатывает и поставляет усилители средней мощности различных частотных диапазонов, сверхширокополосные (ultra wideband), с низким шумом и высокой надежностью. Эти устройства могут быть оптимизированы для достижения более низкого коэффициента шума и увеличения выход-

ной мощности в заданной полосе частот. В настоящее время компания предлагает более 360 моделей усилителей самого разного назначения. Эти устройства разработаны для применения в очень широком диапазоне рабочих частот: 0,1...60 ГГц. На сайте компании B&Z Technologies и в информационных материалах можно найти сведения о производимых компанией усилителях различных классов [1].

СВЕРХМАЛОШУМЯЩИЕ УСИЛИТЕЛИ

В таблице 1 приведены параметры некоторых моделей сверхмалошумящих усилителей (ultra low noise amplifiers), расположенных в порядке увеличения заявленного значения коэффициента шума NF (Noise Figure). В таблице и далее в статье используются следующие обозначения параметров усилителей:

- F_{\min} — минимальная рабочая частота;
- F_{\max} — максимальная рабочая частота;
- G (Gain) — коэффициент усиления;
- GF (Gain Flatness) — неравномерность коэффициента усиления в диапазоне рабочих частот;
- NF (Noise Figure) — коэффициент шума;
- NT (Noise Temperature) K — шумовая температура в градусах Кельвина;
- P1dB — однодецибелльная точка компрессии;
- GD (Group Delay) — групповая задержка;
- VSWR In — KСВН по входу;
- VSWR Out — KСВН по выходу;
- S (Supply) — питание.

Смысл некоторых параметров кратко пояснен в глоссарии к статье.

Примером успешной разработки компании B&Z Technologies является сверхширокополосный малошумящий усилитель (МШУ, low-noise amplifier, LNA) BZP140 HP с очень низким коэффициентом шума и уникальными характеристиками [3]. В нем использована комбинация четырех каскадов усилителей класса А, выполненных на арсенид-галлиевых транзисторах с высокой подвижностью электронов НЕМТ. В усилителях использована так называемая низкочастотная топология (low-pass network) и линии передачи с сосредоточенными параметрами.

Чтобы минимизировать зависимость параметров от частоты, которая характерна для разработок с традиционными полосковыми и микрополосковыми линиями, в широкополосном усилителе в качестве высокоомной линии передачи используется провод 0,018 мм (0,7 mil). Кроме того, для получения разумной вариации коэффициента усиления в сверхшироком частотном диапазоне, в двух межкаскадных узлах усилителя используется резистивная обратная связь (см. рис. 1). Чтобы одновременно получить низкие значения шума и хорошее согласование по входу в сверхширокой полосе рабочих частот, в устрой-

Таблица 1. Технические характеристики сверхмалошумящих усилителей компании B&Z Technologies

Модель	F_{\min} ГГц	F_{\max} ГГц	G_{\max} дБ	GF, ±дБ	NF _{max} дБ	P1dB _{max} дБм	VSWR In/Out
BZ-04400500-070540-102020	4,4	5	40	1	0,069	5	2/2
BZ3-02200230-040840-051515	2200	2,300	40	0,5	0,4	8	1,5/1,5
BZ3-03100350-051037-051515	3,1	3,5	37	0,5	0,5	10	1,5/1,5
BZ-02000250-050840-151515	2	2,500	40	1,5	0,5	8	1,5/1,5
BZ3-01200140-051037-051515	1,200	1,400	35	0,5	0,5	10	1,5/1,5
BZ-03400480-061050-102020	3,4	4,8	50	1	0,6	10	2/2
BZ3-09001000-071033-072020	9	10	33	0,7	0,7	10	2/2
BZ-03400480-071050-102020	3,4	4,8	50	1	0,7	10	2/2
BZ3-03100350-071037-051515	3,1	3,5	37	0,5	0,7	10	1,5/1,5
BZP102UB1	100	2	28	1,3	0,7	8	2/2
BZ-00500200-071045-152020	0,500	2	45	1,5	0,7	10	2/2
BZ3-09001000-081033-072020	9	10	33	0,7	0,8	10	2/2
BZ2-06500750-080830-101515	6,5	7,5	30	1	0,8	8	1,5/1,5
BZ-03400480-081050-102020	3,4	4,8	50	1	0,8	10	2/2
BZ-00100300-081028-132020	0,1	3	28	1,3	0,8	10	2/2
BZ22-00100300-080858-202020	0,1	3	58	2	0,8	8	2/2
BZ-P103-080835-152020	0,1	3	35	1,5	0,8	8	2/2
BZP102UB1X1	0,1	2	28	1,3	0,8	8	2/2
BZ-08001200-091051-152020	8	12	51	1,5	0,9	10	2/2
BZ23-0910-091550-132020	9	10	50	1,3	0,9	15	2/2
BZ3-09001000-091033-072020	9	10	33	0,7	0,9	10	2/2
BZP104UB1	0,1	4	28	1	0,9	10	2/2
BZ3-03100350-091037-051515	3,1	3,5	37	0,5	0,9	10	1,5/1,5
BZP102UB1X2	0,1	2	28	1,3	0,9	8	2/2
BZ-00100100-090845-102020	0,1	1	45	1	0,9	8	2/2
BZP106UB1	0,1	6	27	1	1	10	2/2
BZP108UC1	0,1	8	35	1,5	1,3	12	2/2
BZP110UB1	0,1	10	25	1	1,5	8	2/2
BZP112UC1	0,1	12	34	1,6	1,6	12	2/2
BZP112UB1	0,1	12	24	1,2	1,7	8	2/2

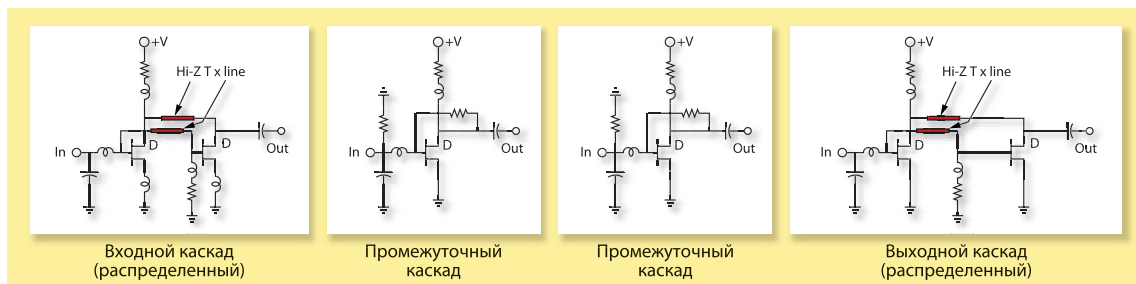


Рис. 1. Четырехкаскадный малошумящий усилитель с коэффициентом шума NF, равным 3,5 дБ в диапазоне 0,1...40 ГГц

стве используется НЕМТ-транзистор с затвором 0,1 мкн в цепи с распределенными параметрами (наряду с индуктивной обратной связью без потерь (lossless inductive feedback) в источниках).

В выходной ступени используются два полупроводниковых элемента в каскаде с обратной связью и цепью с распределенными параметрами. Это позволяет увеличить крутизну характеристики элементов на низких частотах для эффективного использования отрицательной обратной связи с применением сосредоточенных сопротивлений. Данные решения позволили получить равномерное усиление в широком частотном диапазоне.

В результате в усилителе BZP140HP получено типовое значение коэффициента шума NF = 3,2 дБ и неравномерность усиления GF, не превышающая ±1,5 дБ на частотах 0,1...40 ГГц. Минимальный коэффициент усиления МШУ составляет 25 дБ. В то время как максимум коэффициента шума в рабочем диапазоне оценен в 3,5 дБ. Эти характеристики были получены при комнатной температуре, но разработчики заявляют, что при охлаждении усилителя до криогенной температуры можно достичь коэффициента шума, меньше, чем 1,5 дБ.

Кроме низкого коэффициента шума и равномерной характеристики усиления сверхширокополосный МШУ имеет хорошие значения КСВ по входу и выходу, максимум которых составляет 2,5:1. Другими особенностями усилителя являются 50-Ом согласованные входы и выходы, безусловная устойчивость при всех рабочих температурах, легкозаменяемые (field-replaceable) SMA-разъемы и уникальные значения группового времени задержки и линейности фазы. В то время как групповое время задержки по частотному диапазону составляет ±25 пс, точка пересечения третьего порядка (third-order intercept) равна 19 дБм. Минимальная выходная мощность в однодецибелной точке компрессии P1dB равна 8 дБм. Размещенное в небольшом корпусе устройство занимает в drop-in

конфигурации объем <0,4 см³ (0,02 cubic inch) и требует использования единственного напряжения питания +12 В. В усилителе применен встроенный регулятор напряжения питания, и максимальный потребляемый ток составляет 190 мА. Диапазон рабочих температур для усилителя BZP140HP: -55...85°C.

В таблице 2 приведены параметры некоторых моделей широкополосных усилителей большой мощности (wideband high power amplifiers), выпускаемых компанией B&Z Technologies. Ею же создана линейка устройств, способных работать при криогенных температурах (cryogenic amplifiers), т.е. при температурах до 12°K (см. табл. 3). На рисунке 2 приведены частотные зависимости

Таблица 3. Технические характеристики криогенных усилителей компании B&Z Technologies

Модель	F _{min} ГГц	F _{max} ГГц	NT _{max} °K	G _{max} дБ	GF _{max} ±дБ	VSWR _{In}	VSWR _{Out}	S, В/мА
BZCR-00200200-15K	0,20	2,00	15,0	32	1	2,0:1	2,0:1	3,5/40
BZCR-01000200-12K	1,00	2,00	12,0	30	2	2,0:1	2,0:1	3,5/35
BZP102UB1CR	0,50	2,50	12,0	28	2	2,0:1	2,0:1	3/35
BZCR-00200300-20K	0,20	3,00	20,0	33	2	2,0:1	2,0:1	3,5/40
BZCR-02000400-13K	2,00	4,00	13,0	30	2	2,0:1	2,0:1	3,5/45
BZ0205CR1	2,00	5,00	12,0	25	2	2,0:1	2,0:1	4/40
BZCR-02000500-15K	2,00	5,00	15,0	28	2	2,0:1	2,0:1	3,5/35
BZCR-02000800-45K	2,00	8,00	45,0	30	2	2,3:1	2,0:1	3,5/50
BZ0408CR1	4,00	8,00	12,0	24	2	2,0:1	2,0:1	4/40
BZCR-04000800-17K	4,00	8,00	17,0	30	1	2,0:1	2,0:1	3,5/50
BZ0812CR1	8,00	12,00	15,0	24	2	2,0:1	2,0:1	4/40
BZCR-06001800-35K	6,00	18,00	35,0	27	2	2,3:1	2,0:1	3,5/35
BZ0818CR1	8,00	18,00	25,0	30	2	2,0:1	2,0:1	4/40
BZCR-08001800-25K	8,00	18,00	25,0	30	1	2,0:1	2,0:1	3,5/35
BZCR-16001800-30K	16,00	18,00	30,0	30	1	1,7:1	1,7:1	3,5/35
BZP120UC1CR	0,10	20,00	50,0	30	2	2,0:1	2,0:1	A
BZCR-00502000-55K	0,50	20,00	55,0	32	2	2,3:1	2,3:1	3,5/50
BZCR-02002000-45K	2,00	20,00	45,0	32	1	2,3:1	2,3:1	3,5/50
BZCR-17702120-25K	17,70	21,20	25,0	28	1	1,5:1	1,5:1	3,5/35
BZCR-18002600-50K	18,00	26,00	50,0	28	2	2,3:1	2,3:1	3,5/50
BZP140UD1CR	0,10	40,00	150,0	28	3	2,7:1	2,5:1	
BZCR-00504000-150K	0,50	40,00	150,0	28	3	2,5:1	2,5:1	3,5/80
BZ1840CR1	18,00	40,00	75,0	25	3	2,5:1	2,5:1	3,45
BZCR-18004000-85K	18,00	40,00	85,0	28	3	2,5:1	2,5:1	3,5,80
BZCR-26004000-65K	26,00	40,00	65,0	28	2	2,3:1	2,5:1	3,5,80

Таблица 2. Технические характеристики широкополосных усилителей большой мощности компании B&Z Technologies

Модель	F _{min} ГГц	F _{max} ГГц	G _{min} дБ	GF _{max} ±дБ	P1dB _{min} дБм	NF _{max} дБ	VSWR In/Out
BZ0618MD1	6	18	30	1,8	23	3,7	2/2,3
BZ32-01001800-232360-28232	1	18	60	2,8	23	2,3	2,3/2,3
BZ0218MD1	2	18	30	2	23	4,3	2/2,3
BZ0212MD1	2	12	30	1,5	23	3,3	2/2,3
BZ0412MD1	4	12	30	1,8	24	3,8	2/2
BZ0218F	2	18	28	2,5	25	3,5	2,5/2,2
BZ0618F	6	18	28	1,2	26	3,2	2/2
BZ-02001800-352735-202323	2	18	35	2	27	3,5	2,3/2,3
BZ0218-652724-202525	2	18	24	2	27	6,5	2,5/2,5
BZ0208F	2	8	28	1	27	3	2/2
BZ-0618-303330-202020	6	18	30	2	33	3	2/2

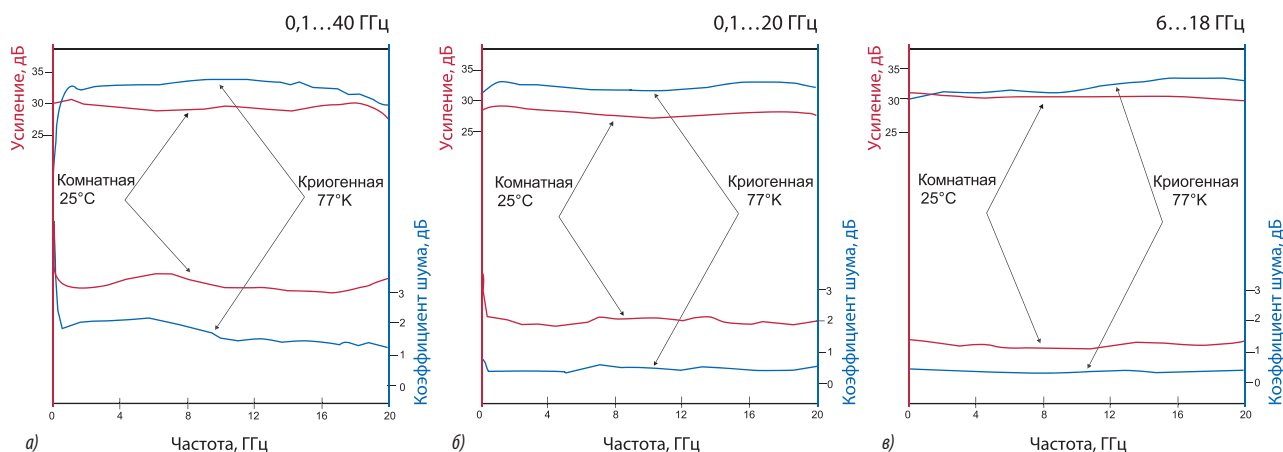


Рис. 2. Типовые характеристики коэффициентов усиления и шума криогенных усилителей BZP140UD1CR (а), BZP120UC1CR (б) и BZ0618LC1CR (в) при комнатной температуре 25°C и криогенной температуре 77°K

коэффициента усиления и коэффициент шума трех различных моделей криогенных усилителей, снятые при комнатной температуре 25°C и криогенной температуре 77°K. Следует учитывать, что криогенные усилители не имеют внутренних регуляторов напряжения и защиты от неправильного подключения полярности (reverse polarity protection).

АЛЬТЕРНАТИВА ПОВЕРХНОСТНОМУ МОНТАЖУ

Усилители, выпускаемые компанией B&Z Technologies, устанавливаются в едином стандартном корпусе [2]. В таком корпусе размещаются различные комбинации устройств, отличающихся по мощности, коэффициенту усиления и коэффициенту шума для диапазонов 5 ГГц...60 ГГц. Инженеры компании работают над созданием на одном стандартном подсистемном шасси (subsystem chassis) устройств и трактов с различными меняющимися параметрами.

При необходимости сокращения размера и улучшения эффективности производства комплексных систем диапазона СВЧ и ММВ специалисты зачастую используют технологии поверхностного монтажа SMT (Surface-Mount Technology). Традиционно поверхностный монтаж используется в диапазоне частот до 6 ГГц. Однако на более высоких частотах SMT обычно не применим, потому что в этой топологии линии передачи являются неэкранированными, и компоненты не имеют адекватного заземления. Это приводит к возникновению в устройствах нежелательных излучений, связей и генерации.

Другая проблема использования РЧ-систем поверхностного монтажа — отсутствие простого способа тестирования отдельных компонентов схемы и получения их параметров и характеристик. Подключаемые традиционным образом компоненты можно легко соединить с портами тестового оборудования и получить точные характеристики, т.к. такие компоненты имеют необходимые выводы и разъемы. Для SMT-компонентов необходимо найти, или что более вероятно, разработать и изготовить соответствующую испытательную оснастку, которая позволит подключить устройство к портам тестового оборудования.

При измерении параметров устройства на испытательном стенде результаты часто бывают неточными и отличаются от получаемых в случае, когда устройство установлено непосредственно на плате SMT. Это происходит из-за разницы в параметрах подключения и связанных с этим паразитных потерь. По этим причинам уменьшение размеров и увеличение степени интегра-

ции систем диапазона СВЧ и ММВ требует альтернативных подходов.

При использовании уникальной компоновки и конструктивного оформления устройств компании B&Z Technologies, а также инновационного метода их каскадирования высокочастотные системы могут быть смонтированы с предсказуемыми результатами. Дополнительным достоинством этих методов является значительное уменьшение пульсаций частотной характеристики (frequency response ripple) без необходимости изоляции между отдельными компонентами. Это является следствием уменьшения электрической длины контактирования (electrical length) между элементами микроволновой схемы.

Для получения необходимых и предсказуемых характеристик отдельных компонентов необходимо использовать корпус небольшого размера, который работает на частотах до 70 ГГц и может быть просто и надежно подключен к оборудованию для тестирования. Кроме того, корпусированное устройство должно надежно включаться в цепь компонентов тракта обработки сигналов. При этом необходимо исключить возможность утечки РЧ-сигналов, что могло бы привести к возникновению ряда нежелательных явлений, в частности, паразитной генерации. Эти соображения, наряду с необходимостью обеспечения надежного монтажа компонентов, РЧ-заземления, хорошего теплового рассеяния и простого метода подключения (connectorization) для тестирования устройств имеют решающее значение при разработке стандартных корпусов для компонентов.

Одним из таких корпусов является Ultra Package, разработанный компанией B&Z Technologies. Этот корпус, работающий на частотах до 70 ГГц, имеет малые размеры: 10×10×2,54 мм (0,4×0,4×0,1"). Это обусловлено малыми размерами его коаксиального РЧ-вывода с диаметром контакта 0,23 мм (0,009"), дизайном микроволновой рабочей полости (microwave cavity) и особенностями крепления блока. Малые паразитные прохождения сигнала (feed-throughs) уменьшают возможность возбуждения в режимах высокого порядка.

Внешние подключения к корпусу могут производиться очень просто, что позволяет получать точные параметры устройства. Кроме того, микроволновые полости корпуса спроектированы так, чтобы уменьшить любой волноводный эффект (waveguide effect). И, наконец, рабочая полость позволяет устанавливать в ней дискретные устройства толщиной 0,1 мм, которая характерна для

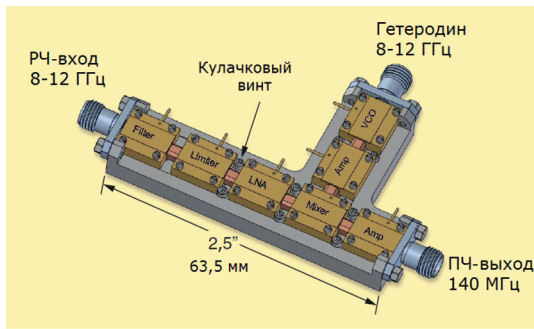


Рис. 3. При использовании корпусов Ultra Package полностью смонтированный на общем шасси преобразователь с понижением частоты диапазона ММВ имеет длину 63,5 мм (2,5")

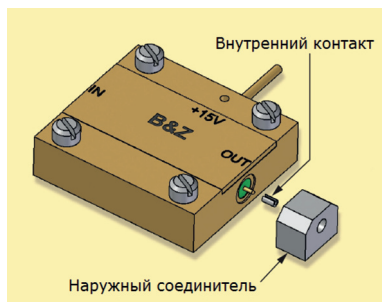


Рис. 4. Внутренний контакт (interconnect) и наружный соединитель (outer conductor) корпуса Ultra Package

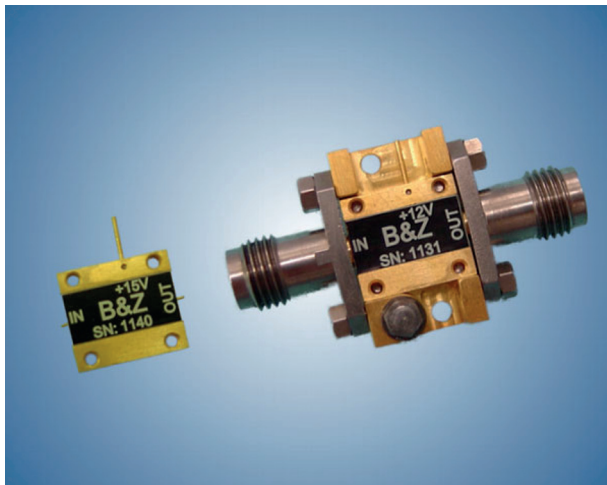


Рис. 5. Усилители в виде конструктивного элемента, т.е. в исполнении drop-in (слева) и корпусирование с применением стандартных разъемов на входе и выходе

большинства высокочастотных дискретных устройств и монолитных интегральных схем СВЧ-диапазона (ММІС). Эти корпуса используются с доступными ММІС и РЧ-компонентами — ГУНами, усилителями, аттенюаторами, смесителями, а также схемами, содержащими отдельные дискретные элементы.

Метод каскадирования этих типов корпусов прост, но эффективен. Очевидным первым шагом является корпусирование (упаковка) отдельного микроволнового компонента и оценка его параметров. Затем, начиная с одного конца РЧ-тракта, первое устройство укрепляется

на своем месте общего подсистемного шасси (см. рис. 3). Далее на РЧ-штырьке (RF-pin) первого устройства устанавливается внутреннее соединение — контакт розетка-розетка (female-female interconnect) (см. рис. 4), к которому должно быть подключено уже следующее устройство РЧ-тракта.

После этого поверх РЧ-штырька с уже установленным внутренним контактом размещается наружный соединитель (outer conductor), который служит для электрического соединения внешних компонентов с корпусом. Наконец, на свое место устанавливается следующее устройство, и проверяется, чтобы его входной РЧ-штырек надежно подключился к другому концу внутреннего контакта, уже находящегося на первом устройстве (см. рис. 3).

Чтобы исключить нежелательные излучения и обеспечить хороший контакт наружного соединителя с корпусом компонента, два последовательно включенных компонента должны находиться под постоянным прижимом (end-end pressure). Этот прижим обеспечивается и поддерживается с помощью кулачковых винтов (cam-screws).

Кулачковые винты могут быть легко изготовлены из существующих коммерческих крепежных элементов посредством механической обработки головной части крепежного винта так, чтобы его головка была эксцентрична по отношению к основному центру винта. Последующие компоненты могут каскадироваться шаг за шагом аналогично предыдущим процедурам. Окончания РЧ-трактов могут быть выведены на зажимы с различными типами интерфейсов. Например, они могут быть выведены на зажимы прямо в волновод без необходимости добавления пары разъемов. РЧ-соединения могут выполняться с помощью стандартных коаксиальных 3,5; 2,92; или 1,85-мм разъемов. Если необходимо, конфигурации входов и выходов могут быть компланарными (coplanar), полосковыми (strip line) или микрополосковыми (microstrip) линиями передачи.

B&Z Technologies заявляет о возможности поставки изделий в виде конструктивных элементов, т.е. в исполнении drop-in (см. рис. 5) [1]. Выпускаемые компанией изделия работают в широком диапазоне температур и могут быть выполнены в соответствии с требованиями к электрорадиоизделиям категорий «space» и «military». Возможны поставки заказных изделий, сроки и цены при этом сопоставимы с соответствующими показателями стандартных изделий.

КРАТКИЙ ГЛОССАРИЙ ТЕРМИНОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СТАТЬЕ

- Если подать на вход устройства сигнал достаточно большого уровня, его реальная амплитудная характеристика будет отклоняться от идеальной прямой из-за проявляющейся нелинейности устройства. Точка, где отклонение амплитудной характеристики устройства от идеальной составляет 1 дБ, называется однодецибелльной точкой компрессии (1-dB compression point, P1dB) или просто точкой компрессии. Количественно эта точка характеризуется соответствующей величиной выходного сигнала (реже входного) и является верхней границей линейного участка амплитудной характеристики устройства.
- При подаче на вход устройства нескольких сигналов, например, двух испытательных гармонических колебаний с частотами f_1 и f_2 , на выходе устройства в силу его нелинейности образуются интермодуляционные продукты. Наиболее опасными являются продукты третьего порядка ИМПЗП: $2f_2 - f_1$ или $2f_1 - f_2$. Для каждого устройства на его амплитудной характеристике может быть найдена точка пересечения амплитудных характеристик основного сиг-

нала и ИМПЗП. Точка пересечения прямых широко используется для характеристики степени линейности устройств и называется точкой пересечения третьего порядка IP3 (3rd-order intercept point) или TOI (Third-order intercept). Таким образом, точка пересечения третьего порядка — гипотетическая точка на амплитудной характеристике устройства, в которой величина образующихся интермодуляционных продуктов третьего порядка на выходе устройства равна величине основного сигнала.

- Шум-фактор F (Noise Factor, FN) или фактор шума устройства описывает уменьшение отношения сигнал-шум при прохождении сигнала через тракт обработки или отдельное устройство. Количественно значение шум-фактора равно отношению сигнал-шум на входе устройства к такому же отношению на его выходе:

$$F = (S_{in}/N_{in})/(S_{out}/N_{out}).$$

Поскольку все реальные электронные устройства «шумят» и, соответственно, добавляют некоторое количество шума к сигналу, величина F всегда больше единицы. Таким образом, шум-фактор определяет степень ухудшения отношения сигнал-шум при прохождении сигнала через РЧ-узел или тракт.

- При употреблении современного термина «коэффициент шума», обозначаемого заглавными буквами NF (Noise Figure), обычно имеется в виду представление

величины шум-фактора в логарифмических единицах (дБ):

$$\text{Noise Figure} = 10 \cdot \lg(\text{NoiseFactor}) = \text{NF (дБ)} = 10 \cdot \lg(F).$$

- Шумовая температура четырехполюсника NT (Noise Temperature) равна температуре согласованного сопротивления на входе четырехполюсника, при которой мощность его теплового шума равна мощности шумов устройства. Понятие шумовой температуры удобно использовать для характеристики малошумящих усилителей, коэффициент шума которых близок к единице. Опорной температурной величиной источников шума принято считать абсолютную температуру T_0 , равную 290° Кельвина, что соответствует 16,8° по Цельсию и 62,3° по Фаренгейту. Спектральная плотность тепловых шумов kT, генерируемая резистором при работе на согласованную нагрузку в полосе спектра один герц при абсолютной температуре T_0 , равна $4 \cdot 10^{-21}$ Вт или -174 дБм.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.bnzttech.com>.
2. Javed Siddiqui, Dan Sundberg, Dominick Suarez. *Alternative to SMT for microwave and millimeter-wave systems*//RF Design. July 2007.
3. Ashok Bindra. *Ultrawideband LNA offers very low NF and flat gain response*//RF Design. March 2007.