

# ТВЁРДОТЕЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ\*

В любых радиотехнических системах передачи, приёма и обработки информации необходимы усилители радиочастотных сигналов. Однако зачастую воздействие этих, казалось бы, простейших функциональных узлов – маломощных или мощных усилителей напряжения или мощности – не позволяет полностью реализовать идеи, заложенные в ту или иную сложную систему. На мировом рынке представлены сотни конкурентоспособных моделей усилителей – на основе как полупроводниковых, так и вакуумных приборов. Они отражают огромное разнообразие характеристик и условий применения таких узлов. Постараемся помочь разработчикам электронных устройств сориентироваться в множестве вариантов и особенностей таких узлов и проанализируем тенденции и перспективы их развития.

Основное функциональное назначение радиочастотного усилителя – повышение уровня (размаха колебаний, амплитуды или средней мощности) входного сигнала без недопустимых искажений его формы, спектрального состава или ухудшения отношения сигнал/шум. Сочетание тактико-технических параметров устройства и характеристик сигналов определяет используемые типы активных элементов: полупроводниковые усилительные каскады различных модификаций или электровакуумные СВЧ-усилители. Выбор усилительного узла из множества вариантов также зависит от области применения, вида усиливаемых сигналов, рабочей полосы частот, требуемой мощности. Поэтому важное значение имеет корректное определение технических параметров и классификация усилителей радиочастотных сигналов.

\*Статья продолжает серию обзоров по элементной базе электронных СВЧ-узлов [1].

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ

Общепринятого определения нижней  $f_{\text{ниж}}$  и верхней  $f_{\text{верх}}$  границ рабочей полосы частот усилителя нет. По умолчанию в качестве граничных принимают такие значения частоты, при которых коэффициент усиления гармонического сигнала малой мощности  $k_{\text{P0}} = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$  уменьшается на 3 дБ по сравнению со средним значением, где  $P_{\text{вых}}$  и  $P_{\text{вх}}$  – значения мощности выходного и входного сигналов, соответственно. Абсолютная ширина полосы частот (BandWidth)  $BW = f_{\text{верх}} - f_{\text{ниж}}$  ограничивает скорость изменения входных сигналов, усиливаемых без заметных искажений. По критерию относительной ширины полосы частот различают узкополосные усилители, для которых коэффициент перекрытия по частоте  $k_f = f_{\text{верх}}/f_{\text{ниж}} \ll 1$ ; октавные с  $k_f \approx 2$  и многооктавные (сверхширокополосные) с  $k_f > 2$ . Для ряда моделей в качестве нижней границы полосы указывается нулевая частота. В этом случае  $k_f$  теряет смысл и необходимо учитывать частотные свойства схем блокировки и подключения питания. Для некоторых изделий нормируется наибольшая неравномерность коэффициента усиления в рабочей полосе частот, например  $\pm 1$  дБ. При усилении полосового сигнала возможны искажения, вызванные отклонением от линейного закона частотной зависимости фазового набега  $\varphi(f)$  ( $\varphi = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}}$ ) в усилителе. Количественной характеристикой таких явлений служит значение неравномерности группового запаздывания сигнала  $\tau_{\text{гр}} = |d\varphi/df|$  в рабочей полосе частот.

Шумовые свойства усилителя определяет шум-фактор  $F_{\text{ш}}$ , показывающий, во сколько раз спектральная плотность мощно-

Л. Белов



сти (СПМ) собственного шума усилителя превышает СПМ шума резистора с сопротивлением, равным входному сопротивлению усилителя. Вместо шум-фактора обычно используется коэффициент шума  $NF = 10 \cdot \lg F_{ш}$ . Для моделей, предназначенных для усиления гармонических опорных сигналов, кроме того, нормируют значение СПМ дополнительного фазового шума  $S_{\varphi}(f)$ , где  $f$  – отстройка от несущей частоты.

При малой мощности входного сигнала режим усиления линейный. С увеличением  $P_{вх}$  начинают сказываться *нелинейные свойства* усилителя. Для узкополосного или октавного усилителя их оценивают количественно по спектральным компонентам выходного сигнала при подаче на вход двух гармонических колебаний одинакового уровня  $P_{вх}/2$  и с близкими частотами  $f_1$  и  $f_2$ . Спектр мощности выходного колебания включает следующие составляющие:

- основные, на частотах  $f_1$  и  $f_2$ ;
- компоненты удвоенных частот  $2f_1, 2f_2$ ;
- комбинационные компоненты второго порядка с частотами  $|f_1 \pm f_2|$ ;
- продукты нелинейных преобразований третьего порядка с частотами  $|2f_1 \pm f_2|$  и  $|2f_2 \pm f_1|$ ;
- интермодуляционные продукты более высокого порядка (рис. 1).

Суммарная выходная мощность основных составляющих падает с увеличением  $P_{вх}$ , и при  $P_{вх} = P_{вх.1дБ}$  (рис.2, точка А) коэффициент усиления  $k_p$  уменьшается на 1 дБ. При дальнейшем увеличении входной мощности наступает режим насыщения, и суммарная выходная мощность не превосходит значения  $P_{вх.нас}$ . Уровень нелинейных составляющих второго порядка изменяется пропорционально  $P_{вх}^2$  и характеризуется мощностью входного сигнала, при которой он был бы равен уровню основных компонент в отсутствие явления насыщения, т.е. значением  $P_{вх.1P2}$ .

Уровень интермодуляционных продуктов третьего порядка возрастает пропорционально  $P_{вх}^3$ , и при  $P_{вх} = P_{вх.1P3}$  их суммарная мощность может быть равна мощности основных компонент в отсутствие явления насыщения (рис.2, точка пересечения пунктирных прямых 1P3 – Intercept Point 3rd order). Вместо характерных уровней входной мощности обычно указывают значения выходной мощности  $P_{вх.1дБ}$  и  $P_{вх.1P3}$ . Для многооктавных усилителей применяют более сложную методику оценки уровня интермодуляционных компонент, предусматриваю-



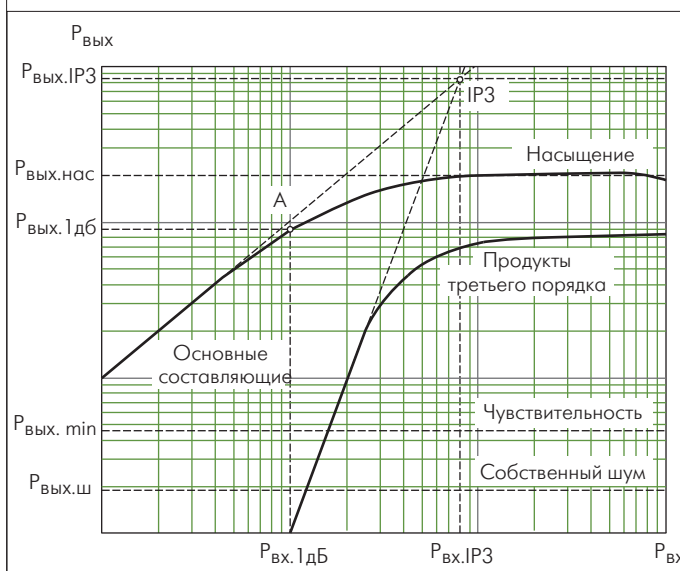
**Рис. 1. Спектр интермодуляционных продуктов при двухчастотном входном сигнале**

щую подачу на вход трех или четырех гармонических колебаний.

*Чувствительность* усилителя определяется мощностью входного сигнала  $P_{вх.min}$ , которая в определенное число раз (например, в два раза, т.е. на 3 дБ) превышает мощность его собственного шума, приведенного ко входу, то есть мощность шума на выходе, деленную на малосигнальный коэффициент усиления  $k_{p0}$ .

*Динамическим диапазоном уровня входного сигнала* линейного усилителя по умолчанию считается выраженное в децибелах отношение  $D = 10 \cdot \log(P_{вх.1дБ}/P_{вх.min})$ .

Напряжение питания  $E_0$  и ток, отбираемый от источника  $I_0$ , характеризуют *энергопотребление усилителя*. Для оценки экономичности усилителей используют значение коэффициента полезного действия – КПД (Power Added Efficiency, PAE):  $\eta_{PAE} = P_{вх.1дБ}/P_0$ , где  $P_0 = E_0 \cdot I_0$  – мощность, потребляемая от источника питания.



**Рис. 2. Амплитудная характеристика усилителя**

Важное значение имеют такие дополнительные характеристики усилителя, как частотные зависимости коэффициента передачи, коэффициента отражения от входа и коэффициента обратного прохождения; параметры амплитудно-фазовой конверсии; массогабаритные показатели; способ монтажа и



Рис.3. Классификация радиочастотных усилителей

соединения с входными и выходными цепями; номинальные импедансы входной и выходной цепей; чувствительность к вариациям напряжения питания и импеданса нагрузки; чувствительность к внешним факторам – вибрациям, ударам, повышенной влажности, к уровню проникающей радиации, статическим электрическому и магнитному полям и др. Кроме того, к усилителям часто предъявляются и дополнительные функциональные требования: возможность использования без дополнительных блокировочных элементов, управления коэффициентом усиления, перехода в режим ожидания с низким энергопотреблением и с малым временем возвращения в номинальный режим; возможность каскадирования, стабилизации параметров в широком интервале температур и т.п.

### КЛАССИФИКАЦИЯ

Многообразие сочетаний параметров и требований к СВЧ-усилителям существенно затрудняют их классификацию.

Обычно сопоставление усилителей проводится по фундаментальным параметрам, назначению, конструктивному исполнению, технологии изготовления активных элементов (рис.3).

**Фундаментальные параметры**, к которым относятся полоса частот, шумовые свойства, мощность в нагрузке, коэффициент усиления и уровень продуктов нелинейных преобразований, определяют основные свойства усилителя. Так, *экономичные* усилители отличаются достаточно высоким КПД. В случае *высокого усиления* усилитель может быть реализован в одном модуле, а *каскадируемые* усилители имеют одинаковые входной и выходной импедансы и могут включаться последовательно. В *управляемых* усилителях коэффициент усиления изменяется внешним аналоговым или цифровым сигналом. *Высоколинейные* усилители отличаются широким динамическим диапазоном линейности, а *ограничивающие* работают в режиме насыщения, например для снижения влияния колебаний мощности входного сигнала.

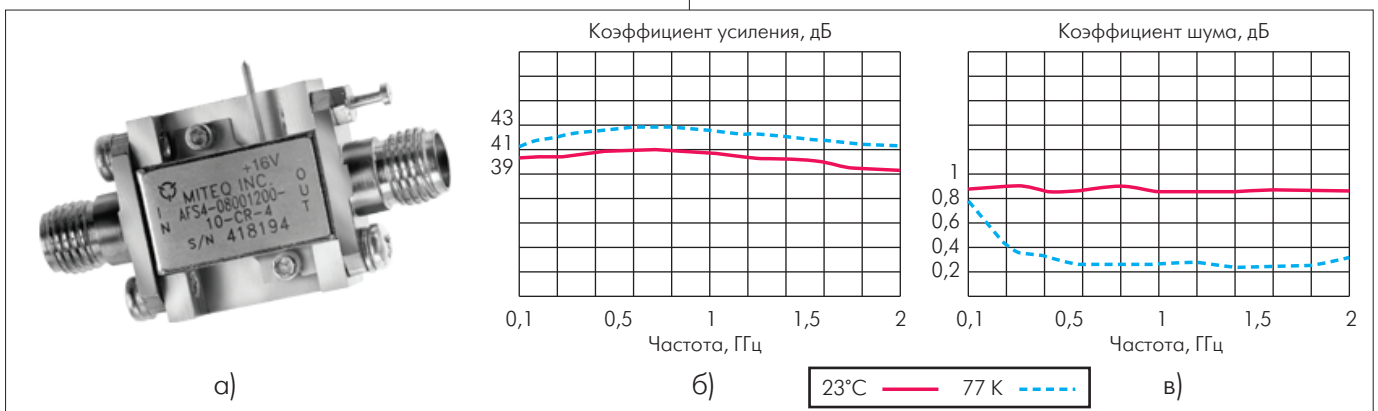


Рис.4. Усилительный блок AFS4-08001200-10-СК-4 (а), частотные характеристики его коэффициента усиления (б) и собственного шума (в)

**Таблица 1. Характеристики малошумящих усилителей**

Модель, сайт	Особенность	$f$ , ГГц	$NF$ , дБ	$k_p$ , дБ	$P_{\text{вых.1дБ}}$ , дБмВт	$P_{\text{вых.1P3}}$ , дБмВт	КСВ, вх/вых	$E_0$ , В	$I_0$ , мА	Габариты корпуса, мм
TM9137PM, www.amplifonix.com	МФШ	0,01–2	6,5	9,5	15,5	28	1,75/1,5	15	45	11×11×7
AFD4-010020-06, www.miteq.com	УМШ, ВУ	1–2	0,6	44	10	–	2:1	10	175	40×32×16
SLM-20T, www.sirenta.com	Вв, Кк	1,7–2	0,9	15,1	17,7	30	1,5:1	5	44	12×12×6
DAML-06284, www.daico.com	ШП, ФС	0,1–2,2	1,3	27	9	–	1,7:1	5	200	н/д
RF2442, www.rfmd.com	Вв	0,5–2,5	1,6	20	13	27	1,5:1	2,5	9	5,1×3×0,8
HD18026-.5, www.rfamplifiers.com	ДН	2,4–2,5	3,5	24/14 *	27/10*	33 /–*	–	7,5	650	113×75×25
QBH-5404, www.amplifonix.com	ШП	2–3	1,5	15,5	22	33	1,5:1	8	85	11×11×7
SPF-2086TK, www.sirenta.com	ВДД	0,1–6	0,4	–	20	32	–	3	20	2×2×1,5
TLT-8-2015, teledynemicrowave.com	ТК	2–8	3,2	42	18	27	–	12	370	66×20×15
AFS3-04008000-09-CR-4, www.miteq.com	Кр	4–8	0,8/0,2**	31/33**	5	–	1,5:1	6	100	18×14×3
APTW6-07100840-44K10-112, www.amplitechinc.com	Вв, ВУ	7,1–8,4	0,69	60	10	–	1,5:1	15	275	40×18×121
PE2-30-610-1R2-15SFF, www.planarelectronicstechnology.com	МФШ	6–10	0,8	30±0,75	2	–	1,75:1	15	45	57×25×12
RLA-F9750G30N2.5, www.rxttech.com	ВУ	9,25–10,25	2,5	30	10	25	1,5:1	12	–	72×47×21
AFPD44-00101200-30, www.miteq.com	2В	0,1–12	3	32	+10	–	2:1	15	375	42×40×10
SKY65013-92LF, www.skyworksinc.com	Кк	0–12	3,3	13	14	29	–	3,5	40	2×2,2×1
APTM3-12001800-2008, www.amplitechinc.com	ПМ	12–18	2	20	8	–	2:1	15	125	9×9×4
APTW22-18002650-192K10-42, www.amplitechinc.com	Вв, ВУ	18–26	2,2	36	10	–	–	15	275	49×15×22
ALN-33144030-01, www.wisewave-inc.com	Вв	26–40	4,5	30	–	–	2:1	8	200	52×30×15
ALN459, www.velocium.com	б/к	71–86	4	14	7	–	2:1	2,4	30	3,1×1,6

**Примечание.** б/к – бескорпусное исполнение; ВДД – высокий динамический диапазон; Вв – волноводный вход/выход; ВУ – с высоким усилением; ДН – двунаправленный; Кк – каскадируемый; Кр – криоохлаждение; МФШ – с минимизированным фазовым шумом; ПМ – поверхностный монтаж; ТК – термокомпенсированный; ФС – фазостабилизированный, ±1 град.; ШП – широкополосный; 2В – два выхода; \*передающий/приёмный каналы; \*\*при комнатной/азотной температурах.

По критерию **назначения** выделяют следующие усилители:

- **двунаправленные**, в которых сигнал передатчика усиливается по мощности и передаётся в антенну, а сигнал антенны через те же соединители поступает на малошумящий усилитель и затем в приёмник;
- **трансимпедансные**, предназначенные для согласования СВЧ-входа волоконно-оптических линий передачи с лазерным диодом или для согласования фотодетектора с СВЧ-выходом;
- **специализированные**, выпускаемые для радиосистем конкретного стандарта (GPS, IEEE 802.11, WiFi, WLAN, WiMAX и др.), задающего выделенную полосу частот.
- **логарифмирующие**, применяемые в трактах промежуточной частоты для сжатия динамического диапазона мощности входного сигнала или для организации автоматической регулировки уровня выходной мощности;
- **операционные**, предназначенные для обработки сигналов произвольной формы на частоты в диапазоне от постоянно-го тока до единиц гигагерц.

В спутниковой аппаратуре находит применение комбинированный узел *front-end*, содержащий малошумящий предварительный усилитель и преобразователь полосы частот вниз.

Критерий **конструктивного исполнения** характеризует массогабаритные показатели и показатели соединений: *бескорпусное* исполнение; для *поверхностного монтажа* или соедине-

ния с микрополосковой линией; необходимость применения *блокировочных компонентов* и цепей подачи питающего напряжения; вид соединителя; *модульная* или *блочная* конструкция.

Технология **активного элемента** (АЭ) определяет параметры источника питания и условия применения усилителя. Для *твёрдотельных* узлов, наряду с кремниевыми биполярными транзисторами (БТ), активно развиваются транзисторы на базе таких полупроводниковых материалов, как SiGe, GaAs, InGaP, AlGaAs/GaAs, а также кремниевые МОП-транзисторы, изготавливаемые продольной двойной диффузией (LDMOS), транзисторы с высокой подвижностью электронов, в том числе и псевдоморфные (HEMT/рHEMT), полевые гетеротранзисторы (HFET). По-прежнему находят применение *вакуумные* усилительные СВЧ-приборы – пролётные клистроны, усилители магнетронного типа – амплитроны, широкополосные лампы бегущей волны (ЛБВ) типа О и типа М.

Рассмотрим примеры представленных на рынке моделей твёрдотельных усилителей на диапазон частот 1–100 ГГц с выходной мощностью до 10 Вт.

### Малошумящие усилители

К малошумящим обычно относятся усилители с коэффициентом шума  $NF < 4–5$  дБ, который в сильной степени зависит от значений верхней граничной частоты  $f_{\text{верх}}$ , выходной мощности  $P_{1\text{дБ}}$  и температуры окружающей среды (табл. 1). Так, коэф-

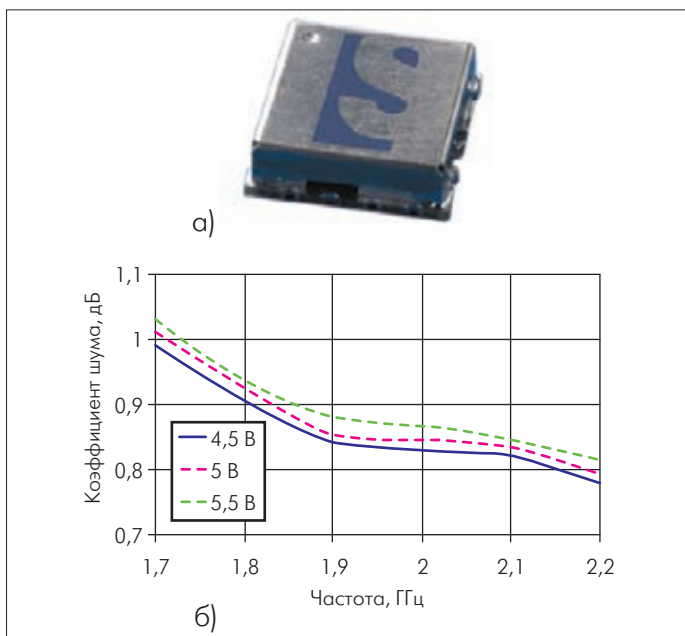


Рис.5. Модуль SLM-20T (а) и его шумовая характеристика (б)

коэффициент шума усилителя модели AFS4-08001200-10-CK-4 серии CR фирмы MITEQ в полосе частот 8–12 ГГц составляет 0,98 дБ при комнатной температуре, а при охлаждении до температуры жидкого азота (77К) снижается до 0,2 дБ (рис.4). Усилитель может функционировать и при температуре жидкого гелия (4К).

Интерес представляют малошумящие усилители на базе транзисторов типа рHEMT компании Sirenza Microdevices. Коэффициент шума арсенидгаллиевого рHEMT-усилителя SPF-2086TK, рассчитанного на работу в полосе частот 0,1–6 ГГц, при напряжении источника питания 3 В и токе 20 мА

не превышает 0,3 дБ на частоте 1 ГГц при максимальном коэффициенте усиления 25,2 дБ и  $P_{\text{вых.1P3}} = 28$  дБмВт. Усилитель предназначен для аналоговых и цифровых беспроводных систем, 3G-сотовых систем связи и карманных компьютеров. А коэффициент шума усилительного модуля SLM-20T этой компании на частотный диапазон 1,7–2 ГГц составляет 0,9 дБ при  $k_p = 15,1$  дБ и  $P_{\text{вых.1дБ}} = 17,7$  дБмВт (рис.5). Модуль имеет собственный источник смещения и согласованные импедансы входа и выхода, что позволяет легко реализовать усилительный блок без применения внешних компонентов. Назначение модуля – приемники стандартов CDMA, W-CDMA.

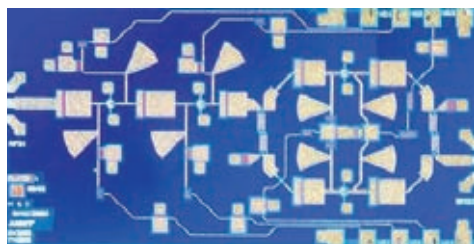
Обращают на себя внимание и малошумящие усилители компании Amplifonix (ранее Spectrum Microwave). Коэффициенты шума и усиления микросхемы QBH-5404 в полосе частот 2–3 ГГц составляют 1,5 и не менее  $15,5 \pm 0,25$  дБ, соответственно. Усилитель выдерживает среднюю входную СВЧ-мощность до 20 мВт и импульсную – до 500 мВт в течение 3 мкс. Компания предлагает также серию усилителей с нормированным уровнем собственного фазового шума. Оптимизированная по этому параметру усилительная микросхема TM9137PM в полосе частот 0,01–2 ГГц обеспечивает  $k_p = 9,5$  дБ,  $P_{\text{вых.1дБ}} = 15,5$  дБмВт и  $NF = 6,5$  дБ при уровне спектральной плотности мощности собственного фазового шума вблизи несущей -160 дБн/Гц для отстройки 100 Гц и -173 дБн/Гц для отстройки 100 кГц.

Весьма низким коэффициентом шума (для субмиллиметрового диапазона частот 71–86 ГГц) характеризуется малошумящий HEMT-усилитель ALN459 компании Velocium Products – 4–5 дБ (рис.6). Значение ширины рабочей полосы час-

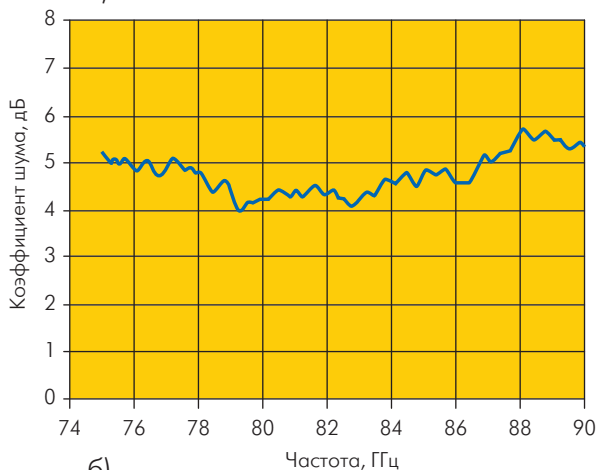
Таблица 2. Характеристики усилителей повышенной мощности

Модель, сайт	Особенность	f, ГГц	NF, дБ	k <sub>p</sub> , дБ	P <sub>вых.1дБ</sub> , дБмВт	P <sub>вых.1P3</sub> , дБмВт	КСВ, вх/вых	E <sub>0</sub> , В	I <sub>0</sub> , мА	Габариты корпуса, мм
AWT1921, anadigics.com	ВЛ, ПМ, CDMA	1,61–1,63	36	–	30	–	–	5, 9	200	7,5×10×2,3
SCGA1960-43B, www.amerAmp.com	ВЛ, CDMA	1,86–2	40	–	60	–	–	12	6000	176×75×33
QBS-368, www.amplifonix.com	ВУ, ВМ, Кк	2,4–2,45	46	55	32	7	1,5:1	15	10500	163×100×24
SLD2000, www.sirenza.com	ВЭ	0,3–2,7	41	-28 дБн*	18	–	–	–	–	2,1×1×0,1
AH102A, www.wj.com	ВЛ	0,35–3	15	46	14	3,1	1,5/1,5	9	200	SOT-89
WPS-343724-99, www.mwtinc.com	ПМ, ВЛ, 64QAM, Ф	3,4–3,7	36	50	14	5	2:1	-0,7	1200	20×7×1,5
SM4450-43L, www.stealthmicrowave.com	ВЛ, ИМ	4,4–5	43	62	55±0,5	–	–	12	–	189×100×20
AFD6-050100-23P, www.miteq.com	-	5–10	23	–	37	5	2:1	–	520	–
S080120P4701, www.lucix.com	ВМ	8–12	30	40	47	2,8	–	12	950	75×16×10
CHA7010, ums-gaas.com	ВМ, ТК	8,4–10,4	39	40 (нас)	18	–	–	9	2400	4,7×4,4×0,05
CMM1431-SM, www.mimixbroadband.com	ПМ, ВЭ	13,7–14,5	31,5	32 (нас)	30	–	–	5	840	6×6×1
www.aethercomm.com	ВМ, ВУ	24–32	40	43 (нас)	40	10	2:1	12	22 000	126×175×25
AHP-22092825-01, www.wisewave-inc.com	ВЛ, К, ТК, СШП	18–26	28	–	25	–	–	-8	550	50×28×15
CHA5297, ums-gaas.com	ВМ	37–40	28	29	10	–	3/3,5	3,5	1600	4,1×2,6×0,05
UAPL65SC, www.centellax.com	ВД	0,04–65	16,5	23 (нас)	10**	9	–	8	250	1,6×0,9×0,1
APH577, www.velocium.com	б/к	81–83	18	21(нас)	9	–	2:1	4	240	2,2×1 4
FPA-109418, www.farran.com	б/к	93–95	26	–	–	–	–	–	–	–

Примечание. б/к – бескорпусное исполнение; ВД – встроенный детектор уровня мощности; ВЛ – высокая линейность; ВМ – высокая мощность; ВУ – высокое усиление; ВЭ – высокой экономичности; Кк – каскадируемый; К – коаксиальное исполнение; ПМ – поверхностный монтаж; СШП – сверхширокополосный; ТК – термокомпенсированный; Ф – фланцевый теплоотвод; ИМ, CDMA, 64QAM – встроенный модулятор; \*уровень продуктов 3-го порядка при двухчастотном сигнале с выходной мощностью 10 Вт; \*\*при токе потребления 103 мА фактор шума 4 дБ.



а)



б)

**Рис.6. Топология (а) и частотная характеристика шума (б) малошумящего усилителя ALN459**

тот  $BW = 15$  ГГц недостижимо в диапазонах более длинных волн. Размер этого усилителя в бескорпусном исполнении –  $3,1 \times 1,6$  мм.

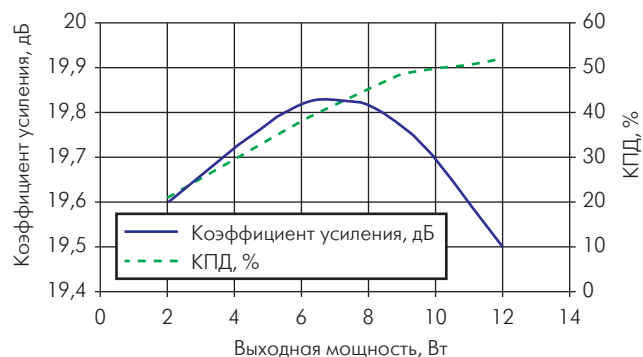
### Усилители повышенной мощности

К СВЧ-усилителям средней мощности обычно относят узлы с выходной мощностью от 50 мВт до 10 Вт (табл.2). Необходимо отметить, что на рынке представлено большое число специализированных моделей, рассчитанных на интервалы частот, выделенных для систем широкого применения (мобильной и спутниковой связи различных стандартов, радионавигации и т.п.). Такие модели отличаются высоким уровнем интеграции, адаптированы к конкретному интервалу частот и условиям применения.

Линейное усиление сигнала усилительного модуля SCGA-1960-43B компании AmerAmp, выполненного на GaAs HFET в полосе частот 1,86–1,99 ГГц составляет 60 дБ, выходная мощность – 10 Вт при неравномерности АЧХ не более  $\pm 0,5$  дБ и уровне интермодуляционных искажений не более -70 дБн. Модуль предназначен для CDMA-передатчиков.

Усилительный модуль SSPA24.0-32.0-20 корпорации AetherComm обеспечивает в полосе частот 24–32 ГГц линейное усиление 40 дБ с коэффициентом шума 10 дБ. Мощность насыщения составляет 20 Вт, уровень высших гармоник не превышает -40 дБн. Включение-выключение сигнала напряжением питания производится за 500 нс.

Возможности повышения выходной мощности усилительных модулей ограничены значением теплового сопротивления пе-



**Рис.7. Зависимости усиления и КПД от выходной мощности усилителя SLD2083CZ на частоте 1 ГГц**

редод-подложка  $R_{ТН}$ . Так, для малошумящей модели SLM-20T фирмы Sirenza этот параметр равен  $250^\circ\text{C}/\text{Вт}$ . А для монолитной микросхемы на базе InGaP/GaAs HBT модели SBW-5089, относящейся к серии SB широкополосных усилителей с высокими усилением и выходной мощностью, значение  $R_{ТН}$  снижено до  $70^\circ\text{C}/\text{Вт}$ , что гарантирует большую наработку на отказ (MTBF). Еще меньше тепловое сопротивление – всего  $4^\circ\text{C}/\text{Вт}$  – у транзистора SLD2083CZ, входящего в SLD-серию транзисторов, выполненных по LDMOS-технологии. Его выходная мощность в широкой полосе частот до 2,7 ГГц в линейном режиме достигает 10 Вт, а КПД – 47% (рис.7). Предусмотрена встроенная защита от статического заряда до 500 В.



**Рис.8. Усилитель WPS-343724-99 (3,4–3,7 ГГц, 4 Вт, 64 QAM)**

Интерес представляет и 4-Вт усилитель WPS-343724-99 компании Microwave Technologies на диапазон 3,4–3,7 ГГц, смонтированный в корпус фланцевой конструкции для поверхностного монтажа. Корпус выполнен из запатентованного компанией медного сплава, свободного от примесей свинца и кадмия, с малым тепловым сопротивлением –  $7^\circ\text{C}/\text{Вт}$  (рис.8).

Таблица 3. Характеристики широкополосных усилителей

Модель, сайт	Особенность	f, ГГц	P <sub>вых.1дБ</sub> , дБмВт	P <sub>вых.1P3</sub> , дБмВт	k <sub>p</sub> дБ	NF, дБ	KCB, вх/вых	E <sub>0</sub> , В	I <sub>0</sub> , мА	Габариты, мм
AD8353, www.analog.com	БУ, ПМ	0,001–2,7	9,1	24	20	5,3	2:1	5	42	2×3×1
SFT-0200, www.sirenza.com	ТИ, б/к	0,01–11,5	-19,5**	–	1,1***	–	–	5	52	1×1
RF2336, www.rfmd.com	БУ	0–6	19	22,5	19	3,8	–	4,3	35	2,9×2,8×1,4
SKY65013-92LF, www.skyworksinc.com	К, ЭБ, ПМ	0–12	12,5	29	12	6,7	1,5:1	3,5	40	2×1,2×1
CLT-18-6006, www.teledynemicrowave.com	ТК	6–18	18	27	29	5,5	1,9:1	12	410	66×18×13
AFSB-02001800-70-18P, www.miteq.com	ПМ, Г, МПЛ	2–18	18	–	20	7	2:1	15	375	14×18×3
A0120, www.markimicrowave.com	БУ, ПМ	1–20	21	–	26	3,5	1,8:1	5	200	15×8×4
UATM30M2C, www.centellax.com	МШ, Кк, ВД, б/к	6–20	17	20*	18	2,5	2:1	5	150	2,3×0,9
S001200L3205, www.lucix.com	Кк	0,1–20	20	28	32	3	1,5:1	12	360	53×10×8
APT4-00102650-4008-D4, www.amplitech.com	СШП	0,1–26,5	8	–	18	4	2,2:1	15	175	42×40×10
AFPD44-00102000-20P, www.miteq.com	Сдв, Г	0,5–20	10	–	32	5	2,5:1	15	650	51×26×7
XP1003, www.mimixbroadband.com	ВЛ, АМ, ВД	27–35	24	34*	16	–	1,9:1	4,5	440	2,5×3,4
A2050, www.markimicrowave.com	СШП, БУ, Кк	20–50	21	–	23	7	1,8:1	5	400	11×13×10
UA1L65VM, www.centellax.com	УМ	0,0002–65	20	23*	27	4,5	–	7	250	33×28×7

**Примечание.** АМ – встроенный модулятор амплитуды; б/к – бескорпусное исполнение; БУ – буферный усилитель; ВД – встроенный детектор уровня мощности; ВЛ – высокая линейность; Г – герметичный; К – коаксиальное исполнение; Кк – каскадируемый; МПЛ – сопрягаемый с микрополосковой линией; МШ – малошумящий; ПМ – поверхностный монтаж; Сдв – сдвоенный выход; СШП – сверхширокополосный; ТИ – трансимпедансный; ТК – термокомпенсированный; УМ – усилительный модуль; ЭБ – отвечает требованиям директивы RoHS; \*мощность насыщения; \*\*чувствительность; \*\*\*дифференциальное усиление, кОм.

Отметим монолитную микросхему усилителя UAPL65SC фирмы Centellax, отличающегося исключительно широкой полосой рабочих частот (0,04–65 ГГц). Мощность насыщения его составляет 21–24 дБмВт, блокировочные цепи выполнены по технологии PLFX (Passive Low Frequency eXtension – пассивного продвижения в область низких частот) с полосой пропускания до 40 МГц. Усилитель имеет встроенный детектор уровня выходной мощности с температурной стабилизацией. Групповое запаздывание сигнала в диапазоне 5–40 ГГц составляет 35±3 пс. В модели UAPL65SC при токе потребления 103 мА коэффициент шума не превышает 4 дБ. Выпускается в ультра-плоском (100±10 мкм) бескорпусном исполнении.

В качестве примера двунаправленного усилителя можно привести модель антенного усилителя HD18026-5 компании RF Amplifiers. Усиление излучаемого сигнала на частоте 2,4–2,5 ГГц составляет 24 дБ, выходная мощность – 500 мВт при минимальной входной мощности 1 мВт. Линейное усиление 14 дБ при коэффициенте шума 3,5 дБ.

К последним достижениям в области СВЧ-усилителей повышенной мощности можно отнести усилители серии FSD4 фир-

мы MITEQ с встроенными гармониковыми фильтрами, подавляющими в выходном сигнале вторую и третью гармоники, а также модель CMM1431-SM компании Mimix Broadband, отличающаяся высокой экономичностью ( $\eta_{РАЕ} = 26\%$ ) при выходной мощности ~1,5 Вт на частоте 14 ГГц.

Интерес представляет и термокомпенсированный усилитель SNA7010 французской компании United Monolithic Semiconductor на полосу частот 8,4–10,4 ГГц. Выполнен он на подложке размером 4,7×4,4 мм, на которой размещены четыре транзистора первого каскада и восемь транзисторов второго каскада. Выходная мощность каскадов суммируется. КПД усилителя  $\eta_{РАЕ} = 35\%$ . Эта же фирма выпускает бескорпусную модель SNA5297 с высокой для диапазона миллиметровых волн (37–40 ГГц) выходной мощностью  $P_{\text{вых.1дБ}} = 28$  дБмВт. Модель построена по трёхкаскадной схеме на арсенид-галлиевых pHEMT, размещённых на кристалле размером 4,1×2,6×0,05 мм. Первый каскад выполнен на одном транзисторе, второй – на двух и третий – на четырех с мостовыми сумматорами.

Выпускаются мощные усилители субмиллиметрового диапазона. Так, выходная мощность модели APH577 фирмы Velocium превышает 1 Вт на частоте 81–83 ГГц, а модели FPA156016 ирландской фирмы Farran Technology – 1 Вт в полосе частот 55–65 ГГц.

### Широкополосные усилители

Широкополосными считаются усилители с коэффициентом перекрытия по частоте  $k_f > 0,2$  (табл.3). К приборам этого класса относятся трансимпедансные усилители семейства SFT фирмы Sirenza Microdevices, работающие с двухуровневыми видеомпульсными сигналами и предназначенные для вы-

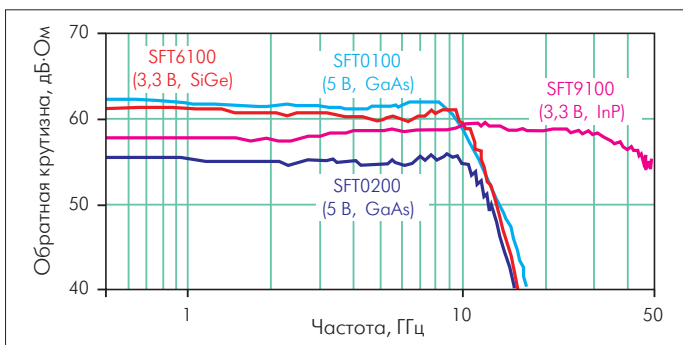


Рис.9. Частотные характеристики трансимпедансных усилителей семейства SFT фирмы Sirenza Microdevices

**Таблица 4. Характеристики усилителей с расширенными функциональными возможностями**

Модель, сайт	Особенность	f, ГГц	NF, дБ	k <sub>p</sub> , дБ	P <sub>вых.1дБ</sub> , дБмВт	P <sub>вых.1P3</sub> , дБмВт	КСВ, вх/вых	E <sub>0</sub> , В	I <sub>0</sub> , мА	Габариты корпуса, мм
ENL9654, www.amplifonix.com	Огр, ФС	0,01–1	-25...+10	55	-0,5*	10	55	15	75	20×10×1
DAML6275, www.daico.com	УУ, МШ, Огр	0,06–2,1	1–19	-1...39	–	1,3	40	5	100	45×20×10
VG025, www.wj.com	ВЛ	0,05–2,2	21	15,6	39	3,7	17	5	150	16×4×2
AG101, www.wj.com	ВЛ	0,25–3	15	14	32	2,4	–	4,5	50	4×4×2
KMS1070, www.ar-worldwide.com	ВМ	3,4–3,7	43	–	44	–	–	12	10000	151×75×63
ECG003, www.wj.com	ВЛ	0–6	24	15	37	3,5	3,5	7,3	120	4×4×2
CLA28-8001, www.ciaowireless.com	Огр	2–8	-50...20	50	14±1,5*	4	64	15	600	45×20×9
AVG4-020008000-20, www.miteq.com	УУ	2–8	10	32	–	2	15	15	120	21×26×7
AFSW4-08001200-11, www.miteq.com	ИМ	8–12	10	32	–	1,1	15	15	150	18×14×3
AFD8-120180-LM, www.miteq.com	Огр	12–18	-15...10	33	20	8	25	15	450	40×32×16

**Примечание.** ВЛ – высокая линейность; ВМ – высокая мощность; ИМ – импульсная модуляция; МШ – маломушящий; Огр – ограничивающий; УУ – управляемое усиление; ФС – фазостабильный; \*мощность насыщения.

сокоскоростных волоконно-оптических приемопередатчиков. Рабочая полоса частот модели SFT-0200 составляет 11,5 ГГц, а перспективной SFT-9100 – достигает 45 ГГц (рис.9). Усилители отличаются высоким произведением коэффициента усиления на полосу (площадь усиления). Основные параметры – коэффициент дифференциального усиления  $k_{диф}$ , измеряемый в децибелах, умноженных на ом, и чувствительность  $P_{вх.min}$ . Усилители серии SFT выполняются на GaAs, SiGe или InP и выпускаются в бескорпусном исполнении размером 1×1 мм.

Особенность усилителей серии A0120 фирмы Marki Microwave – возможность работы в жёстких условиях эксплуатации (рабочий диапазон температур – -55...100°C).

Новые типы СВЧ-усилителей должны отвечать требованиям Директивы защиты окружающей среды RoHS. Этим требованиям, в частности, соответствует микросхема SKY65013-92LF фирмы SkyWorks – миниатюрный каскадируемый усилитель на основе InGaP, работающий в полосе частот от 10 МГц до 12 ГГц с малосигнальным усилением 12,5 дБ и уровнем линейности по выходу 12,5 дБмВт.

Бескорпусной усилитель UATM30M2C фирмы Centellax, функционирующий в полосе частот от 40 МГц до 30 ГГц, является одновременно как сверхширокополосным, так и маломушящим. Его восьмикаскадная схема размещена на подложке размером 2,4х 0,9х 0,1 мм. Коэффициент усиления составляет не менее 18 дБ в полосе частот от 40 МГц до 20 ГГц с неравно-

мерностью ±0,3 дБ, и не менее 16 дБ на частотах до 30 ГГц. Усилитель может каскадироваться, имеет встроенный детектор уровня выходной мощности с чувствительностью 0,5 мВ/мВт. Динамический диапазон мощности входных сигналов превышает 30 дБ. Линейное усиление сверхширокополосного (от 200 кГц до 65 ГГц) трёхкаскадного усилительного модуля UA1L65VM этой фирмы составляет 30 дБ при входной мощности от -20 до -8 дБмВт, коэффициенте шума – 5,5 дБ. Уровень мощности насыщения – 23 дБмВт.

Серии усилителей с удачным сочетанием таких характеристик, как широкая рабочая полоса, уровни мощности, усиления и шума, выпускает компания Lucix Amplifiers. Так, усиление модели S080120P4701 в полосе частот 8–12 ГГц равно 47 дБ при уровне линейности  $P_{вых.1дБ} = 30$  дБмВт и  $NF = 2,8$  дБ. Модель S001200L3205 работает в сверхширокой полосе частот от 100 МГц до 20 ГГц с  $k_{p0} = 32$  дБ и  $NF = 3$  дБ при диапазоне линейности до  $P_{вых.1дБ} = 20$  дБмВт.

Микросхема AFPD44-00102000-20P фирмы MITEQ (полоса частот 0,5–20 ГГц, усиление 26 дБ,  $NF = 5$  дБ) имеет два выхода с  $P_{вых.1дБ} = 20$  дБмВт каждый. Ослабление связи между портами составляет -30 дБ. По заказу может быть включён третий порт.

Отметим и новый широкополосный усилитель XP1003 компании Mimix Broadband, выполненный на четырех GaAs pHEMT по 0,15-мкм технологии с использованием моста-разветвителя и моста-сумматора. Его выходная мощность превышает 2 Вт



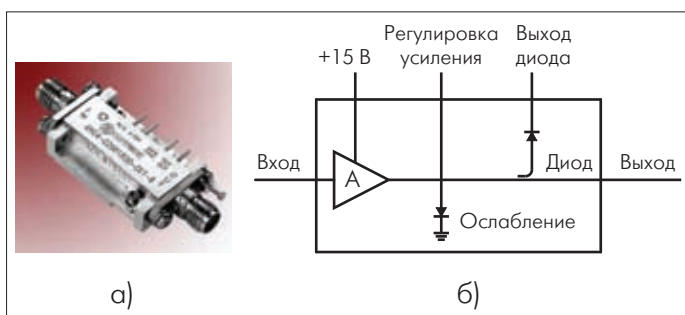


Рис. 10. Усилитель серии AVG4 фирмы MITEQ (а) и его электрическая схема (б)

в полосе частот 27–35 ГГц. В схему встроен детектор выходной мощности и модулятор для формирования сигнала с кодо-амплитудной модуляцией.

### Усилители с расширенными функциональными возможностями

К устройствам этого класса относятся усилители серии AVG фирмы MITEQ на диапазон частот 0,1–20 ГГц с функцией управляемого усиления (табл.4). Путем изменения управляющего аналогового напряжения от 0 до 2 В усиление приборов этой серии варьируется в пределах от 32 до 15 дБ. Предусмотрена также возможность контроля уровня мощности выходного сигнала (рис.10). Двухкаскадные усилительные микросборки серий AFSW и AFTL этой компании позволяют выполнять импульсную модуляцию выходного сигнала. Длительность фронта включения – 50 нс, выключения – 250 нс.

Усилитель AG101 фирмы Watkins-Johnson Communications (полоса частот 0,25–3 ГГц,  $k_p = 14$  дБ,  $P_{1дБ} = 15$  дБмВт,  $P_{\text{вых.1ПЗ}} = 32$  дБмВт) отличается широким динамическим диапазоном линейного усиления. На входе микросхемы ECG003 компании для обеспечения высокой линейности и отказа от цепи установки входного смещения включена Дарлингтонская пара транзисторов.

Ограничивающий усилительный модуль KMS1070 фирмы AR-WorldWide, разработанный с учетом высоких требований к линейности характеристик и отвечающий стандарту WiMAX (IEEE 802.16d), рассчитан на диапазон 3,7–3,7 ГГц,  $P_{\text{вых.1дБ}} = 20$  Вт, а уровень ограничения составляет 40 Вт. Модуль выполнен на GaAs-полевых транзисторах. Может каскадироваться. Ограничивающий усилитель ENL9654 фирмы Amplifonix предназначен для приёма сигналов на частоту до 1 ГГц с угловой модуляцией. Его малосигнальное усиление в интервале входной мощности -25...10 дБмВт достигает 55 дБ, ограничение выходного сигнала – на уровне -0,5 дБмВт с погрешностью не более  $\pm 0,9$  дБ, отклонение крутизны фазочастотной характеристики не превосходит 0,004 градуса/дБ·МГц.

### Цепи питания и блокировки усилителей поверхностного монтажа

Возможность достижения устанавливаемых производителем параметров СВЧ-усилителей существенным образом зависит

от выбора типа и топологии размещения вспомогательных цепей подключения питания и блокировочных элементов. На рынке представлены фирмы, специализирующиеся на выпуске пассивных СВЧ-компонентов – разделительных конденсаторов (Bloc DC) с малой индуктивностью выводов; катушек индуктивности (Bias Tee) без резонанса на частотах свыше 20 ГГц; широкополосных цепей питания коллекторной цепи, способных пропускать постоянный ток заданного значения. Многие разработчики усилительных узлов выпускают такие компоненты для поверхностного монтажа, согласованные с производимыми микросхемами (Mini-Circuits, MITEQ и др.), либо создают микросборки с интегрированными элементами, что становится неизбежным по мере повышения рабочей частоты.

На сайте фирмы РАДИОКОМП [2] можно найти обширную базу данных по усилительным и вспомогательным узлам, получить квалифицированную помощь в приобретении нужных изделий, в том числе по лицензируемым моделям.

Усилительные СВЧ-узлы отличаются чрезвычайно разнообразным сочетанием таких параметров, как рабочая полоса частот, чувствительность, выходная мощность в линейном режиме, экономичность, массогабаритные показатели, дополнительные функциональные возможности (высокоскоростное управление усилением, использование эффекта насыщения и др.). Выявляется тенденция к интеграции таких узлов с вспомогательными цепями питания, устройствами блокировки, термостабилизации. Наиболее высокие технические характеристики имеют усилители, предназначенные для массовых приложений: беспроводных систем связи различных стандартов, волоконно-оптических линий передачи. Происходит быстрое внедрение новых pHEMT-, HFET-технологий, направленных на создание интегральных узлов с рабочей частотой до 20–90 ГГц на базе SiGe, InP, InGaP.

С учётом политики государств, занимающих ведущие позиции в электронной отрасли и не допускающих на российский рынок компоненты на частоты свыше 18 ГГц, необходимо всемерно поддерживать развитие исследований, методов расчёта и технологических возможностей создания элементной базы миллиметрового диапазона длин волн.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Л.А. Портрет MITEQ. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, № 4, с. 99; Mini-Circuits – надёжный поставщик микроволновых компонентов. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, № 6, с. 38; Hittite microwave – Портрет фирмы. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, № 8, с.46.
2. РАДИОКОМП – радиокомпоненты мировых производителей. <http://www.radiocomp.ru>