

# АТТЕНЮАТОРЫ СВЧ-СИГНАЛОВ



Л.Белов

Аттенюаторы, или ослабители, СВЧ-сигналов находят широкое применение в электронных устройствах\*. Такие узлы разрабатывают и выпускают все ведущие производители электронных компонентов. При кажущейся простоте аттенюаторов их функциональное назначение и технические требования к параметрам отличаются значительным разнообразием. В мире десятки фирм выпускают множество различных вариантов аттенюаторов. Поэтому обзор современного состояния этого сектора рынка и анализ тенденций его развития представляют несомненный интерес.

Ослабители СВЧ-сигналов используются для калиброванного измерения уровня мощности сигнала, для снижения чувствительности характеристик узла аппаратуры к изменениям импеданса нагрузки, для оперативного изменения коэффициента передачи, балансировки каналов электронной аппаратуры, согласования импедансов в межкаскадных СВЧ-цепях, создания векторных модуляторов, а также при формировании сигналов со сложными видами модуляции. Во многих случаях применение аттенюаторов осложняется расширенной до десятков гигагерц полосой рабочих частот системы, высоким и быстро изменяющимся уровнем мощности входного сигнала, необходимостью контролировать параметры сигналов и цепей с прецизионной точностью, требованиями сохранения основных характеристик узла в широком интервале температуры и другими дестабилизирующими воздействиями.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И КЛАССИФИКАЦИЯ АТТЕНЮАТОРОВ

Для корректного определения параметров аттенюатора представим его как четырёхполюсник СВЧ-цепи, характеризующийся S-матрицей передачи с следующими комплексными коэффициентами:  $S_{21}$  – коэффициент передачи сигнала от входа к выходу;  $S_{11}$  – коэффициент отражения от входа (Return Loss – RL);  $S_{22}$  – коэффициент отражения от выхода и  $S_{12}$  – коэффициент прохождения сигнала с выхода на вход. Для пассивных ослабителей с взаимными свойствами входной и выходной цепей  $S_{21} = S_{12}$ . К параметрам, описывающим аттенюатор, относятся следующие:

- $k = |S_{21}|$  – коэффициент ослабления (Insertion Loss – IL);
- $\varphi = \arg(S_{21})$  – фазовый сдвиг сигнала в ослабителе;
- $k_{св} = (1 + \rho)/(1 - \rho)$  – коэффициент стоячей волны (КСВ) во входной цепи, характеризующий реакцию входной цепи аттенюатора на импеданс нагрузки, где  $\rho = |S_{11}|$  – модуль коэффициента отражения от входа.

\*Статья продолжает серию публикаций, характеризующих современное состояние производства электронных компонентов СВЧ-диапазона [1]. Надеемся, что изучение тенденций мирового рынка этих компонентов на примере аттенюаторов будет полезным как для разработчиков новой аппаратуры, так и для организаторов развития электронной промышленности в России.

Для невзаимных моделей дополнительно указывается коэффициент обратного прохождения мощности  $k_{обр} = |S_{12}|$ . Каждый из коэффициентов  $k$ ,  $\rho$  (или  $k_{св}$ ),  $k_{обр}$  зависит от полосы рабочих частот, поэтому необходимо знать их частотные характеристики. Для широкополосных аттенюаторов нормируют также значение наибольшей неравномерности коэффициента ослабления в полосе рабочих частот  $\varepsilon$ , измеряемое в децибелах.

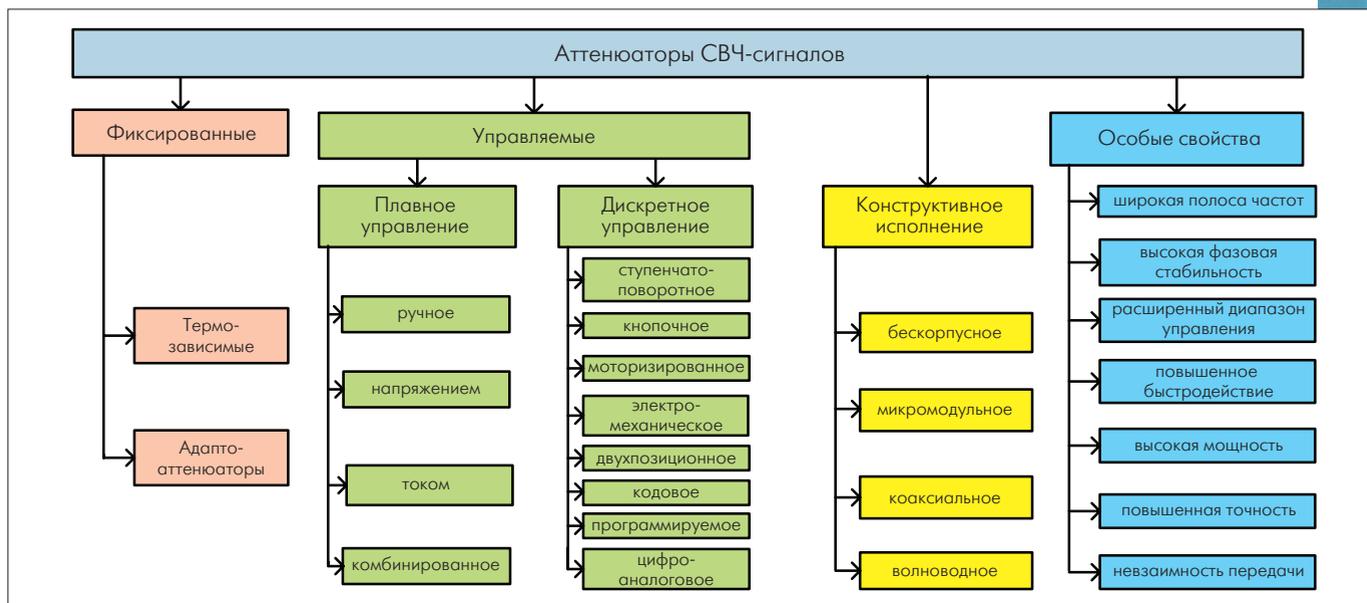
Общепринятого определения нижней  $f_n$  и верхней  $f_b$  границ рабочей полосы частот для аттенюаторов нет. Обычно в качестве этих величин принимают частоты, на которых коэффициент ослабления  $k$  изменяется более чем на  $\pm 6$  дБ по сравнению со средним значением в рабочей полосе частот. Для каждого аттенюатора с калиброванным ослаблением или шкалой изменения ослабления должна быть установлена наибольшая погрешность калибровки  $\Delta$ . Для перестраиваемых ослабителей указывается также наибольшая скорость перестройки в виде граничной частоты по цепи управления  $F_{гр}$  или длительности переключения дискретных значений ослабления  $\tau$ .

Допустимый уровень мощности входного сигнала указывается производителем либо в виде границы линейного режима  $P_{1дБ}$  – мощности входного СВЧ-сигнала, при которой коэффициент передачи уменьшается на 1 дБ по сравнению со значением при малом сигнале, либо в виде максимальной мощности входного сигнала  $P_m$ , превышение которой может привести к необратимым изменениям характеристик ослабителя. Для аттенюаторов, работающих в импульсном режиме, дополнительно приводится предельная пиковая мощность при определённых значениях длительности импульсов и их скважности (обычно – длительность 5 мкс и частота повторения 100 Гц).

Классификация аттенюаторов СВЧ-сигналов (рис. 1) осложнена наличием разнообразных сочетаний основных характеристик, таких как интервал рабочих частот; значение ослабления и возможность его изменения; тип соединителя и конструкция; допустимый уровень входной мощности; погрешность калибровки. Существуют три основные группы моделей аттенюаторов: с фиксированным значением ослабления, с плавным и с дискретным его изменением. Каждая модель может быть выполнена в корпусе для поверхностного монтажа, иметь коаксиальное или волноводное исполнение и отличаться особыми свойствами. Рассмотрим эти группы.

## АТТЕНЮАТОРЫ С ФИКСИРОВАННЫМ ОСЛАБЛЕНИЕМ

**Пассивные аттенюаторы с фиксированным ослаблением**, или фиксированные аттенюаторы (ФА) (табл. 1), часто выполняются на основе взаимной резистивной цепи Т- или П-конфигурации (рис. 2а, б). Значения сопротивления резисторов рассчитываются



**Рис. 1. Классификация аттенюаторов СВЧ-сигналов**

по правилам линейной электротехники, исходя из нужного ослабления и значений входного и выходного импедансов. Например, в П-образной схеме (рис.2б) при  $R11 = R21 = 150 \text{ Ом}$  и  $R31 = 37 \text{ Ом}$  и сопротивлении нагрузки  $RL = 50 \text{ Ом}$  входное сопротивление  $R_{вх} = 49,8 \text{ Ом}$ ,  $k = k_{обр} = -6 \text{ дБ}$ ;  $\rho = -53 \text{ дБ}$ . На сайтах некоторых компаний-производителей аттенюаторов (например, Amplifonix) можно найти таблицы или калькуляторы, позволяющие быстро рассчитать нужные номиналы элементов таких схем. С ростом рабочей частоты входного сигнала  $u_{вх}(f)$  и увеличением ослабления  $k$  в схемах ФА типа приведенных на рис.2а,б усиливается влияние паразитных параметров, обусловленных межэлектродными ёмкостями и индуктивностями выводов, параметрами корпусов резисторов. Это приводит к ограничению полосы рабочих частот, снижению КСВ входной и выходной цепей до недопустимых значений.

Аттенюатор с безынерционным нелинейным элементом (НЭ) (рис.2в) позволяет изменять значения коэффициента ослабления  $k = u_{вых}(f)/u_{вх}(f)$  в широких пределах путем оперативного изменения смещения  $E$  во входной цепи НЭ. Кроме того, в таком аттенюаторе за счёт невзаимных свойств входной и выходной цепей обеспечи-

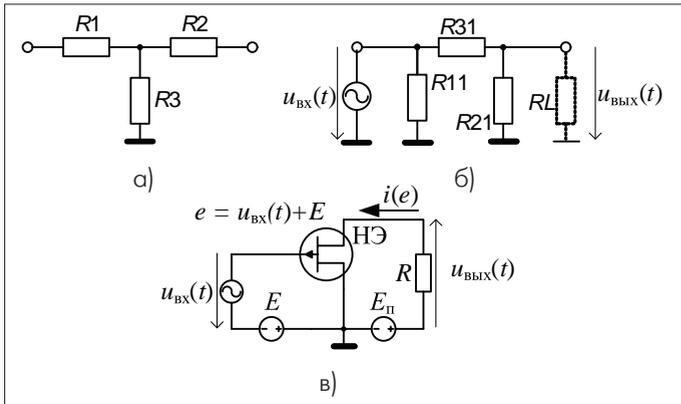
вается высокое значение их развязки  $k_{обр} = |S_{12}| \neq |S_{21}|$ . Однако в такой схеме с ростом мощности входного сигнала  $u_{вх}(f)$  могут появляться нелинейные и перекрёстные искажения его спектрального состава, а обеспечение постоянства коэффициентов отражения  $\hat{S}_{11}$  и  $\hat{S}_{22}$  в требуемом диапазоне частот и ослаблений затрудняется. Поэтому многие производители в качестве управляемых двухплюсников используют СВЧ-узлы на полевых транзисторах, включая их, например, по схеме рис.2б. Возможно также каскадное включение схем типа показанных на рис. 2а или 2б.

ФА выпускаются в виде твердотельных бескорпусных устройств (в терминологии производителей – chip или die) или микросхем для поверхностного монтажа (ПМ). Различия между этими двумя типами ФА незначительны: размеры бескорпусных моделей минимальны (например,  $0,85 \times 0,85 \times 0,1 \text{ мм}$ ), тогда как ПМ-модели лучше защищены от влияния окружающей среды и имеют от 4 до 16 контактных площадок. Компания Skyworks выполняет бескорпусные тонкопленочные аттенюаторы на высокоомной кремниевой подложке, что позволяет поднять верхнюю границу рабочей температуры до  $175^\circ\text{C}$ . Твердотельные ФА фирмы Skyworks работают

**Таблица 1. Аттенюаторы с фиксированным ослаблением**

Модель (сайт производителя)	Особенность	$f_n - f_b$ , ГГц	$k$ , дБ	$\varepsilon$ , дБ	КСВ	$P_{м.ср}$ , Вт	Размер, мм	Диапазон температур, °C	Соединитель
33-1052-30.00 (www.rflabs.com)	ВМ, Ф	0,8–1	30	±0,5	1,25:1	250	5,3×31, 6×12×7	-55...150	-
RPAX-250 (www.res-netmicrowave.com)	ВМ, К	0–2,4	0,5–40	±0,5	1,25:1	250	139×38×38	0...100	N
HPCA5420 00W3 (www.emct.com)	ПМ	0–2,5	20	±0,5	1,35:1	20	12×12×1	-55...150	-
AS-30N (www.microlab.fxr.com)	ВМ	0–3	30	±0,5	1,3:1	100	152×101×101	-55...125	N
Chip-120-40 (www.rflabs.com)	ПМ, ВМ	0–3	40	1	1,15:1	120	5,8×8,9×1	-55...150	-
BW-40N100W (www.minicircuits.com)	ВМ, К, СТЧ	0–4	40	±1,6	1,35:1	100	87×87×161	-55...85	N
AB series (www.microlab.fxr.com)	ВМ, С	0–4,5	1–60	±2	1,35:1	4	5×5×20	-55...125	TNC, N, BNC
GAT-20 (www.minicircuits.com)	ПМ	0–8	20	±0,4	1,05:1	0,5	3×3	-45...85	-
TS04 series (www.emct.com)	ПМ	0–12	0–20	±0,5	1,05:1	0,1–10	3,1×3,7	-55...150	-
HRM080CN03G (www.emct.com)	ТЗ, ПМ, З	0–18	8	±0,5	1,3:1	0,2	1,9×1,5×0,3	-55...125	-
RA5-18 series (www.electrotechnik.com)	ВМ, СШП	0–18	1–30	±0,5	1,3:1	5	25×29×9	-65...125	SMA
BW-S40NW5 (www.minicircuits.com)	К, ВТ	0–18	40	±0,85	1,3:1	5	GN986	-55...85	SMA
2052-6042-10 (www.xmacorp.com)	АА	0–18	10	0,75	1,15:1	2	13×13×16	-55...85	SMA
BW-S7W2 (www.minicircuits.com)	К	0–18	0,4–7	±0,02	1,25:1	2	9×22×8	-50...100	SMA
Бескорпусный (www.piconics.com)	ПМ	0–20	1–20	1	1,1:1	2	3,7×2 5×1	-55...125	-
ATN3580 Series (www.skyworksinc.com)	ПМ	0–40	1–40	-	1,35:1	1	0,7×0,8	-55...175	-
640 series, (www.midwestmicrowave.com)	К, СШП	0–40	0–20	-	1,4:1	1	20×3×3	-65...125	SMA
5510V-302-XdB (www.picosecond.com)	АА	0–60	3–20	±1,2	1,06:1	2	29×8×8	-55...85	V

Примечание. АА – адаптоаттенюатор; ВМ – высокой мощности; ВТ – высокочастотный; З – защищён от внешних воздействий; К – коаксиальный; ПМ – поверхностный монтаж; С – варианты соединителей типа N, BNC или TNC; СТЧ – слабая температурная чувствительность; СШП – сверхширокополосные; ТЗ – термозависимый; Ф – фланцевая конструкция.

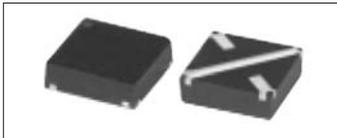


**Рис.2. Простейшие схемы аттенуаторов: Т-образная (а) и П-образная (б) резистивные линейные цепи; безынерционный нелинейный преобразователь (в)**

в сверхширокой полосе частот 0–40 ГГц при допустимой мощности  $P_M = 1$  Вт (серия ATN3580). В такой полосе частот при достаточно стабильном значении  $k$  качество согласования с повышением частоты ухудшается: коэффициент отражения  $\rho = -45$  дБ для  $f = 1$  ГГц,  $-30$  дБ для 10 ГГц,  $-25$  дБ для 20 ГГц,  $-20$  дБ для 30 ГГц и  $-18$  дБ для 40 ГГц.

Производители ФА используют подложку из нитрида алюминия (AlN) или окиси бериллия (BeO): при одинаковых размерах элемента в первом случае получают на 25% более высокую граничную частоту и более низкий КСВ, во втором – более высокую максимальную рассеиваемую мощность.

Значение ослабления в резистивных ФА, предназначенных для поверхностного монтажа (рис.3), составляет 1–60 дБ при рассеиваемой мощности менее 1 Вт и рабочей частоте до 60 ГГц. Коэффициент неравномерности амплитудно-частотной характеристики для лучших образцов равен  $\pm 0,5$  дБ в полосе частот 0–20 ГГц и возрастает до  $\pm 2$  дБ для частот в полосе 40–60 ГГц.



**Рис.3. ФА серии GAT-20 для поверхностного монтажа фирмы Mini-Circuits**

Характерные особенности аттенуаторов для поверхностного монтажа серии TS04 фирмы EMC Technology – отсутствие полупроводниковых компонентов, тройная защита от воздействия внешней среды, возможность рассеяния мощности до 2 Вт. Фирма EMC разработала и выпускает **термочувствительные** аттенуаторы по запатентованной технологии Thermorad. Коэффициент чувствительности ослабления к изменению температуры аттенуаторов фирмы калибруется и может принимать заданные положительные или отрицательные значения.

В сверхмощных аттенуаторах для поверхностного монтажа применяют фланцевую конструкцию с внешним теплоотводом. Фланцевые изделия фирмы RF Labs выпускаются на среднюю мощность 10–250 Вт, работают в диапазоне частот до 4 ГГц, размер их не более  $1,3 \times 1,3 \times 0,3$  мм. Значение ослабления в аттенуаторах полуфланцевой конструкции компании MITEQ достигает  $30 \pm 1$  дБ в полосе частот 0–3 ГГц при мощности до 100 Вт. 75-ваттный ослабитель этой фирмы АТТ-75-30-НF работает с КСВ 1,15:1 при температуре среды  $-55...75^\circ\text{C}$  и по стойкости к механическим воздействиям (не менее 7 г) удовлетворяет требованиям военного стандарта MIL-STD-810B.

Интерес представляют адаптоаттенуаторы, т.е. устройства, которые согласуют импедансы цепей и одновременно обеспечивают заданное значение ослабления. Лучшие модели таких устройств



**Рис.4. ФА с коаксиальными соединителями: а) серии VAT и NAT фирмы Mini-Circuits; б) мощные аттенуаторы фирмы Microlab/FXR; в) адаптоаттенуаторы серии 640 фирмы Midwest-Microwave**

(фирм Mini-Circuits, ХМА) выполняются из нержавеющей стали с золочеными контактными зонами.

Значительное число моделей ФА выполняются с коаксиальными соединителями, что позволяет улучшить согласование значений входного и выходного импедансов в широкой полосе частот, снизить погрешность калибровки аттенуатора (до 0,5% от номинального значения), использовать при проведении измерений сменные наборы калиброванных ослабителей. ФА с коаксиальными соединителями способны рассеивать до 1 кВт непрерывной СВЧ-мощности в полосе частот 0–3 ГГц (модели серии 82 фирмы Aeroflex Weinschel с ослаблением 10–40 дБ, работающие в диапазоне температур  $-55...125^\circ\text{C}$ ), до 500 Вт на частотах 4–26 ГГц и до 20 Вт на частотах до 40 ГГц (аттенуаторы фирмы Microlab/FXR).

Аттенуаторы с коаксиальными соединителями, отличающиеся малыми погрешностями установки и малой неравномерностью коэффициента передачи в широкой полосе частот, часто применяются при измерении параметров СВЧ-цепей и трактов. Ряд фирм предлагают наборы сменных измерительных ФА в коаксиальном исполнении.

В аттенуаторах с коаксиальными соединителями (рис.4) применяются разъемы типа N, SMA, BNC и другие. Для частот до 60 ГГц фирма Picosecond Pulse Labs использует микроминиатюрные V-образные разъемы диаметром 1,85 мм. Групповое запаздывание аттенуатора модели 5510V-302-20dB фирмы составляет 90 пс при полосе рабочих частот 0–60 ГГц и при превосходном КСВ = 1,06:1. Длительность фронта выходного сигнала при коммутации мощности на входе ФА, по значению которой проверяется фактическая ширина полосы сверхширокополосных моделей, не превышает 5 пс.

**АТТЕНУАТОРЫ С ПЛАВНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ОСЛАБЛЕНИЯ**

Для изделий с изменяющимся ослаблением указывают значение, соответствующее минимальному управляющему воздействию, и диапазон изменения ослабления. Аттенуаторы этого класса выпускаются с ручным управлением и управлением аналоговым сигналом.



**Ручной способ** управления реализуется в аттенуаторах с коаксиальными и волноводными конструкциями (табл.2).

Для подобных устройств иногда нормируют такой дополнительный параметр, как допустимое для механической конструкции число перемещений регулятора, например 200 тысяч. В качестве примера аттенуаторов с ручным управлением можно привести регулируемый аттенуатор фирмы Alan Industries, в котором ослабление изменяется вращением винта с некалиброванным углом

**Рис.5. Регулируемый аттенуатор с плавным изменением ослабления модели 50CA8-3 фирмы Alan Industries**



Таблица 2. Атенюаторы с ручным управлением

Модель (сайт производителя)	Особенность	$f_n - f_v$ , ГГц	$k$ , дБ	$IL$ , дБ	$\epsilon$ , дБ	КСВ	$P_m$ , Вт	Размер, мм	Диапазон температур, °С	Соединитель
ARC-2 (www.merrimacind.com)	К, П	0–0,4	0–8	2,5	±0,5	1,3:1	0,5	27×35×23	-55...85	SMA
5-3-127-A-1-S-12V (www.trilithic.com)	К, ЭМ, ТТЛ, ВТ	0–1	0–127	0,1	±1	1,33:1	1	4×9,5×2,7	-25...70	SMA
BMA-35111 (www.trilithic.com)	Р, ЭМ	0–2,5	0–111	2,6	±0,05	1,25:1	2	50×40×180	0...50	SMA, BNC, N
50CA8-30 (www.alanindustries.com)	Рег	4–8	0–30	0,75	±1	1,5:1	5	9×6×44	-65...125	SMA
Серия AJ-41 (www.microlab.fxr.com)	Р, К, ВТ	2–12,4	20–40	0,5	±0,1	1,5:1	5	94×66×15	-55...125	N, TNC
Серия DRA-28 (www.millitech.com)	И	26–40	0–60	±0,5	±0,25	1,15:1	1	175×165×122	-50...85	WR08, WR06
22114-AA (www.flann.com)	ВМ	30–36	0–45	1,5	0,6	1,05:1	15	–	-50...85	WR229, WR8
Серия 020 (www.flann.com)	ММВ	1,7–140	0–30	–	0,5	1,07:1	0,2 (140 ГГц)	–	-50...85	WR
Серия MWA-06 (www.millitech.com)	М, ТТЛ	110–170	0–60	2	0,1	1,25:1	0,3	81×68×89	-50...85	WR

Примечание. ВМ – высокой мощности; ВТ – высокой точности; И – измерительный; К – коаксиальный; М – моторизованный; ММВ – миллиметровые волны; П – монтируемый на переднюю панель; Р – роторный; Рег – регулировочный; ТТЛ – управляемый кодом; ЭМ – электромеханический.

поворота (рис.5), а также калиброванные измерительные аттенюаторы (рис.6). Для снижения погрешности установки положение регулятора иногда фиксируется механически, например через каждые 30° поворота ротора или используют двухроторную конструкцию. При этом значения ослабления становятся дискретными и изменяются с малым шагом.

Для частот 20–170 ГГц выпускаются волноводные модели измерительных аттенюаторов с нониусной установкой ослабления (рис.7). Полоса рабочих частот таких аттенюаторов ограничена сечением волновода, но облегчена прецизионная установка калиброванного ослабления с малой погрешностью и реализована самая высокая для данного диапазона частот допустимая мощность  $P_m$ . Например, прецизионные (погрешность ±0,2 дБ при ослаблении 30 дБ) волноводные аттенюаторы серии 020 фирмы Flann Microwave рассчитаны на мощность 0,2 Вт на частоте 140 ГГц.

Аттенюаторы с изменением ослабления аналоговым сигналом (табл.3) позволяют строить быстродействующие измерители параметров СВЧ-трактов, системы автоматической регулировки уровня мощности, амплитудные модуляторы. В аттенюаторах этого типа дополнительно нормируют нелинейность статической зависимости ослабления от управляющего воздействия (напряжения или тока) и скорость установки заданного ослабления при скачке управляющего сигнала. В аттенюаторах с аналоговым управлением обеспечивается достаточно большой динамический диапазон регулировки ослабления. Так, для неотражающих аттенюаторов серии D196 фирмы Herley управляемое напряжением изменение ослабления в многооктавной полосе 0,5–18 ГГц может достигать 60 дБ.

Для плавного изменения ослабления обычно используются одно- или двухкаскадные схемы вида, приведенного на рис.2а и 2б, где активные поглотители выполняются на широкополосных  $p-i-n$ -диодах или полевых транзисторах с управляемым смещением. В некоторых моделях применяются невзаимные управляемые устройства типа показанных на рис.2в. Для сверхширокополосных моделей предлагается настроенная таблица с сочетаниями управляющих сигналов. На рис.8 приведены зависимости ослабления от частоты для разных значений

управляющего напряжения аттенюатора модели UVD50SC фирмы Centellax, выполненного на пяти полевых транзисторах и работающего в полосе частот 0–50 ГГц с ослаблением 0–30 дБ.



Рис.7. Волноводные модели измерительных аттенюаторов компаний Millitech (а) и Flann Microwave серий 114 (б) и 020 (в)

Технические трудности создания аттенюаторов с плавным изменением ослабления аналоговым сигналом связаны с необходимостью обеспечения в широкой полосе частот одновременного изменения импедансов нескольких сосредоточенных элементов так, чтобы коэффициент ослабления монотонно изменялся в больших пределах, а коэффициенты отражения от входа и выхода изменялись незначительно. Для решения этой задачи разработчики включают в состав аттенюатора узел линеаризатора с одним аналоговым входом (для управления током или напряжением) и необходимым числом выходных сигналов, подключаемых к управляемым элементам. Лучшие модели линеаризаторов позволяют уменьшить погрешность отклонения от линейности до 3–5% наибольшего ослабления. Однако надо иметь в виду, что энергопотребление линеаризаторов как отдельных аналоговых узлов достаточно велико. К тому же, в результате их применения снижается быстродействие по цепи управления.

В быстродействующей модели НМС346 компании Hittite использована двухзвенная цепь вида, приведенного на рис.2б, на шести управляемых напряжением полевых транзисторах. Продолжительность изменения ослабления модели с 0 до 32 дБ не превышает

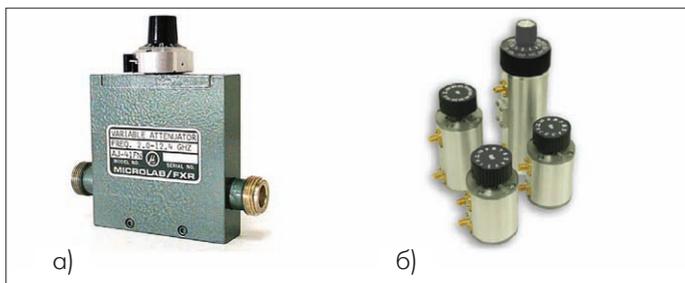


Рис.6. Измерительные коаксиальные аттенюаторы с ручным управлением: AJ-41 компании Microlab/FXR (а) и BMA35111 с роторной установкой ослабления компании Trilithic (б)

Таблица 3. Атенюаторы с управлением аналоговым сигналом

Модель (сайт производителя)	Особенность	$f_H - f_B$ , ГГц	$k$ , дБ	$E_y$ , В	$I_y$ , мА	$P_n$ , Вт	Размеры, мм	Диапазон температур, °С	$\tau$ , нс	Соединитель
AV101-12 (www.skyworksinc.com)	ПТ, ПМ	0,8–1	1–21	–	0–5	25	5×6,2×1,7	-40...85	5000	–
TG9030 (www.amplifonix.com)	Л, ПМ	0,005–2	25–40	0...15	0...7	0,1	ТО-8	-55...100	200	–
VACC-22 (www.minicircuits.com)	ПМ, ОН, МИ	1,6–2,2	1,2–25	0...5	0...10	18	3,8×3,8×1,3	-45...85	–	–
RVA-2500 (www.minicircuits.com)	Ni, BM	0,01–2,5	3,3–43,3	0...17	30	100	12×12×5	-55...85	1000	TNC, SMA
HMC346MS8G (www.hitite.com)	ТК, ПМ, ВС	0–8	0,5–32	0...3	–	0,01	2,9×2,9×1	-40...85	120	–
ATN12400 (www.esmicrowave.com)	Ц, Комб, Л	8–12	1–55	0...5	0...10	0,5	–	-40...85	650	SMA
AP-N000-32V (www.umcc111.com)	ФС, Комб., К	7,5–16	1–32	0...3	–	0,1	41×51×13	-45...75	500	SMA
Серия МРАТ (www.miteq.com)	ПМ, ВС	0,95–20	10–60	0...20*	**)	20	42×45×12	0...70	20	–
3498Н-64 (www.herley.com)	Комб,	0,75–18	1–64	0...+8	–	0,01	51×76×18	-40...85	300	SMA
AT-G000-HC (www.umcc111.com)	Л, ТК	9–19	0–60	–	0...10	0,1	16×41×9	-45...75	500	SMA
UVD50SC (www.centellax.com)	СШП, ПМ	0...50	2–27	-1...0,5	–	0,005	1,6×0,9	-45...+85	5	–

Примечание. BM – высокая мощность входного сигнала; ВС – высокая скорость управления; К – коаксиальный; Комб – комбинированное цифровое и аналоговое управление; Л – с встроенным линейризатором; МИ – с малыми искажениями; ОН – однонаправленный (-20 дБ); ПМ – для поверхностного монтажа; ПТ – с полевым управляющим транзистором; СШП – сверхширокая полоса частот; ТК – встроенный термокомпенсатор; ФС – фазостабилизатор; Ц – цифровой; Ni – никелированный; \*) имеются модели с управляющим напряжением 0–5 В; \*\*) имеются модели с токовым управлением.

2 нс. Эту микросхему рекомендуется применять для быстродействующей автоматической регулировки усиления и для формирования амплитудно-модулированных сигналов, т.е. она представляет собой *аттенюатор-модулятор*.

В аттенюаторах с управлением аналоговым сигналом для регулировки ослабления используются полупроводниковые нелинейные элементы (*p-i-n*-диоды или полевые транзисторы), поэтому актуальный для них параметр – допустимая входная мощность в линейном режиме  $P_{1дБ}$ . Эта величина в сильной степени зависит от установленного значения ослабления. Например, для модели UVD50SC фирмы Centellax на частоте 25 ГГц при  $k < 10$  дБ допустимое значение мощности в линейном режиме  $P_{1дБ}$  равно 2 мВт, при  $k > 15$  дБ эта величина возрастает до 18 мВт, а на частоте 5 ГГц – до 40 мВт. Фирма UMCC для двукратного повышения допустимой мощности использует на входе квадратурный разветвитель, в каналах – регуляторы и на выходе – квадратурный сумматор.

На рынке представлены модели с встроенными согласующими драйверами, благодаря чему управляющим сигналом по выбору потребителя может быть либо напряжение, либо ток. В некоторых из них в состав драйвера входят программируемая энергонезависимая память, ЦАП и преобразователь тока в напряжение, что позволяет выбирать любой из вариантов управляющего сигнала. Атенюатор модели 3495Н-64 фирмы Herley Farmingdale имеет тройное управление: током, напряжением или кодом. В полосе частот 0,75–18 ГГц он обеспечивает изменение ослабления на 80 дБ при входной мощности до 1 Вт и времени переходного процесса по установке нового значения ослабления 300 нс.

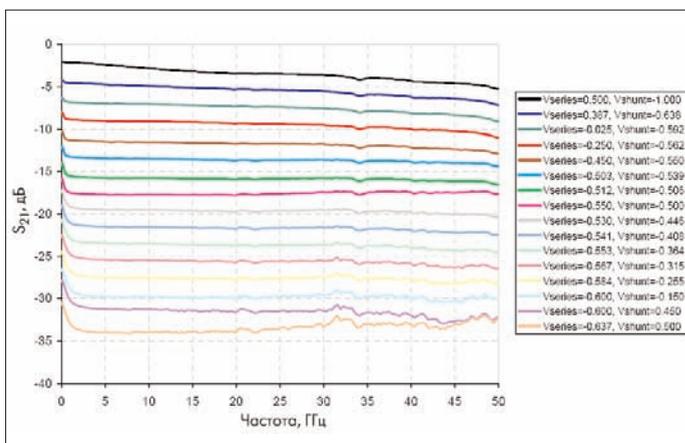


Рис.8. Амплитудно-частотные характеристики аттенюатора UVD50SC фирмы Centellax при разных сочетаниях управляющих напряжений

В ряде применений к аттенюатору СВЧ-сигнала предъявляется требование незначительно изменять фазовый сдвиг  $\varphi$  в диапазоне рабочих частот при регулировке ослабления, а также в интервале температур окружающей среды. В стандартных моделях аттенюаторов на частоту 4 ГГц изменение ослабления от 1 до 60 дБ приводит к изменению фазового сдвига до 50°. В модели AP-N000-32D фирмы UMCC, разработанной с учётом требования стабилизации этого параметра, гарантируется фазовый сдвиг не более  $\pm 5^\circ$  для полосы частот 6-18 ГГц при ослаблении 32 дБ.

### АТТЕНЮАТОРЫ С ДИСКРЕТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В эту группу входят самые разнообразные аттенюаторы (табл.4), позволяющие смягчить противоречие между стабильностью значения ослабления в диапазоне рабочих частот и в интервале дестабилизирующих факторов с одной стороны, и возможностью быстрого изменения ослабления в широких пределах, с другой. Атенюаторы с дискретным управлением (ДУ) можно разделить на три подгруппы: а) с механическим (электромеханическим) переключением или регулятором; б) с аналоговым управляющим сигналом, снабжённые ЦАП; в) электронные коммутаторы.

Модели аттенюаторов с ДУ с *механическим* переключением предназначены для измерения или отладки СВЧ-систем. У них кнопочное или шаговое поворотное управление (например, серия Pushbutton – ПВ или роторные аттенюаторы серии RSA фирмы Trilithic, работающие в полосе частот 0–4,5 ГГц с ослаблением -1... -110 дБ).

*Электромеханическое* переключение при помощи системы реле в аттенюаторах серии TTL фирмы Alan Industries в полосе частот 0–1,5 ГГц обеспечивает коммутацию ослабления в пределах 1–127 дБ с шагом 1 дБ при времени переключения между дискретными значениями ослабления (дискретами) 6 мс. Для электромеханических коммутаторов нормируется гарантированное число циклов коммутации, которое в предлагаемых на рынке моделях колеблется от 200 тыс. до 10 млн. В некоторых моделях регуляторы предусматривают установку заданного дискрета ослабления при помощи набора клавиш (тумблеров). В других – значение ослабления устанавливается стандартным двоичным кодом по параллельной шине входных сигналов.

Атенюаторы волноводного типа с *моторизованным управлением*, выпускаемые фирмой Millitech (серия MWA-06), предназначены для автоматизированных измерителей или регуляторов мощности в диапазонах частот 18–170 ГГц. В эти модели встроены соответствующие драйверы интерфейса, позволяющие организовать автоматизированное электромеханическое управление с малой

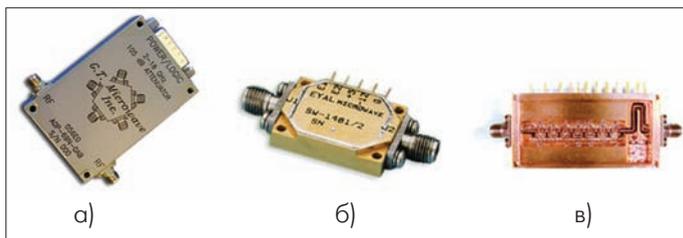
**Таблица 4. Атенюаторы с дискретным управлением**

Модель (сайт производителя)	Особенность	$f_{\text{н}} - f_{\text{в}}$ , ГГц	$k$ , дБ	$\Delta$ , дБ	$n$ , бит	$P_{\text{м}}$ , Вт	Размеры, мм	Диапазон температур, °С	$\tau$ , нс	Источник питания
AT-204 (www.synergymicrowave.com)	А-К	0,01-1	50/3,5	-	1	0,001	10×10×12,6	-55...85	2	-
TAD2104 (www.amplifonix.com)	ДрТ, ВС	0,01-2	31,0	1	7	1	24-выводной	-55...85	0,015	5 В/3 мА; -12 В/4 мА
AA210-25 (www.skyworksinc.com)	ВС, МИ	0-2	15	0,7	4	30	5,8×9,8×1,7	-40...85	0,015	-5 В/200 мкА
PE4302-01 (www.peregrine-semi.com)	ПР/ПС, МП	0-3	31,5	0,5	6	0,25	4×4×0,8	-45...85	1000	3 В/100 мкА
50MDA127-3 (www.alanindustries.com)	ЭМР	0-3	0-127	1-64	11	2	160×10×10	-45...85	3000	12 В/15 мА/бит
HRF-AT4510 (www.honeywell.com)	ПИ, ПМ	0-4	15,5	0,5	5	1	4×4×1	-40...85	0,015	5 В/35 мА
AT90-1107 (www.macom.com)	ДрТ	0-4	31,5	0,5	6	0,25	6×4×1	-40...85	0,075	5 В/10 мА
PE94302 (www.psemi.com)	РС, ПМ	0-4	31,5	0,5	6	0,02	9×9×1	-40...85	1	3 В/100 мкА
MW SA20606 (www.mw-elisra.com)	ТК	2-6	1-63	1	6	0,1	15×51×6	-55...95	0,05	5 В/150 мА; -12 В/140 мА
HMC425LP3 (www.hittite.com)	ПМ, МП	2,4-8	31,5	0,5	6	1	3×3×1	-40...85	0,16	+5 В/30 мкА
AS-M500-319 (www.umcc111.com)	ВС,МИ, ТТЛ	4-12	31	1	5	0,5	-	-45...75	0,01	5 В/130 мА; -5 В/130 мА
ADP-69N-0MG (www.gtmicrowave.com)	СШП, ПЗУ, ДрТ	2-18	105	0,03	12	0,02	80×50×20	0...50	0,35	-
AVP-69T-1 (www.gtmicrowave.com)	ЭМР	2-18	80	0,125	10	0,02	-	-55...85	1000	-
PHASE_Inv (www.gtmicrowave.com)	ФС	6-18	32	0,125	8	0,1	-	-40...85	0,35	5 В/100 мА
SA-0518-1-40 (www.eyal-emi.com)	ВС	0,5-18	0-40	-	1	0,2	-	-45...85	0,02	5В/90 мА; -12В/60 мА
AGTN-0320-00DD-100 (www.americanmicrowavecorp.com)	СШП	0,1-20	0-64	0,25	8	0,1	50×45×12	-55...125	1	12 В/250 мА; -12 В/50 мА

*Примечание.* А-К – аттенюатор-ключ; ВС – высокая скорость управления; ДрТ – встроенный драйвер ТТЛ; МИ – с малыми искажениями; МП – с малым энергопотреблением; ПЗУ – встроенная энергонезависимая память; ПИ – параллельный интерфейс; ПМ – для поверхностного монтажа; ПР/ПС – встроенный параллельный/последовательный интерфейс; РС – радиационно-стойкий; СШП – сверхширокополосный; ТК – встроенная термокомпенсация; ТТЛ – встроенный ЦАП с ТТЛ управлением; ФС – фазостабилизатор; ЭМР – электромагнитное реле.

погрешностью установки ослабления за счёт ступенчатого регулирования.

Дискретные аттенюаторы на основе аналоговых регуляторов с ЦАП (рис.9) по сравнению с электромагнитными устройствами имеют более высокую (от 8 до 12 бит) разрядность по цифровому входу, допускают применение средств линеаризации характеристики управления, но уступают им по допустимому уровню входной мощности при широкополосном сигнале.



**Рис.9. Атенюаторы с цифровым, аналоговым или комбинированным управлением фирм G.T. Microwave, ADP-69N-DAP (а) и EYAL Microwave, SA-26-6-1 (б) и Ф1354 (в)**

Модели, использующие СВЧ-ключи для коммутации широкополосных цепей, типа приведенных на рис.2а и 2б, обеспечивают наи-

большее быстродействие по цепи управления и высокий допустимый уровень СВЧ-сигнала. Поскольку в этих моделях могут быть использованы несколько конфигураций ослабляющих цепей, их динамический диапазон изменения ослабления предельно широк.

Среди аттенюаторов ключевого типа можно выделить *двухпозиционные* модели (с одним разрядом по цепи управления). По существу – это узлы с быстрой двоичной манипуляцией коэффициента передачи. Например, для модели AT-204 на основе аттенюатора-ключа фирмы Synergy Microwave с полосой частот 10 МГц–1 ГГц время изменения затухания в цепи с -3,5 до -50 дБ не превышает 2 мкс, а в модели AT-213 с полосой частот 5–400 МГц изменение затухания с -6 до -70 дБ занимает 10 нс. Это свойство аттенюатора может использоваться для измерений или для защиты приёмника при работе с приёмопередающей антенной.

В аттенюатор модели ADP-69N-DAP фирмы G.T.Microwave встроены энергонезависимая память, хранящая значения ослабления и закон связи между ослаблением и управляющим сигналом (линейный или логарифмический); АЦП для преобразования аналогового сигнала управления; цифровой термокомпенсатор, позволяющий исключить влияние температуры окружающей среды. Такие модели с развитым цифровым управ-

лением называют программируемыми, в отличие от моделей с простой установкой кода заданного дискрета ослабления. Модель ADP-69N-DAP представляет собой *аттенюатор-модулятор* ключевого типа: модуляция амплитуды выходного сигнала на 40 дБ в сверхширокой полосе частот 0,25–24 ГГц занимает менее 10 нс.

Интерес представляет аттенюатор с цифровым управлением модели PE94302 фирмы Peregrine Microwave, предназначенный для поверхностного монтажа. Его ослабление в полосе частот 0–4 ГГц составляет 1–31 дБ с шагом 1 дБ. Аттенюатор имеет встроенные средства параллельного и последовательного управления параметрами и *радиационно-стойкое исполнение* (выдерживает дозу радиации до 300 крад/с).

Представленные в статье модели аттенюаторов СВЧ-сигналов отличаются большим разнообразием по полосе рабочих частот, глубине ослабления, уровню погрешностей, функциональным возможностям. Можно выделить такие новые области их применения, как узлы, входящие в состав фазовых и векторных модуляторов миллиметрового диапазона с высокой скоростью управления. Близкими характеристиками обладают аттенюаторы сигналов оптического диапазона, предназначенные для применения в волоконно-оптических линиях передачи (например, изделия фирмы Fiber Optic Communication, [www.foci.com.tw](http://www.foci.com.tw)).

За последние несколько лет отмечается значительное увеличение числа моделей в микрополосковом исполнении, функционирующих в полосе частот 0–50 ГГц, а также моделей в коак-

сиальном исполнении, рассчитанных на полосу частот 0–60 ГГц, и в волноводном исполнении на частоты до 170 ГГц. Обширная база данных по выпущенным в мире моделям аттенюаторов и других радиокомпонентов представлена на сайте ООО Радиокomp [2].

Мировой рынок СВЧ-аттенюаторов насыщен высококачественными моделями, производство которых требует высокой технологической культуры. Можно отметить продвижение на передовые места в этом секторе фирм из Юго-Восточной Азии, Японии, Израиля.

США, как ведущая страна-производитель СВЧ-компонентов, проводит известную политику ограничения экспорта в Россию электронных узлов для формирования и обработки сигналов на частоты свыше 18 ГГц. Чтобы поддержать развитие наукоёмких отраслей промышленности нашей страны, необходимо развивать собственные исследования и технологию производства узлов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона.

*Автор благодарит В.Н.Кочемасова за полезные обсуждения и предоставление информационной поддержки.*

#### 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; Hitite Microwave – Портрет фирмы. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, № 8, с.46.
2. РАДИОКОМП – радиокомпоненты мировых производителей. <http://www.radiocomp.ru>