

Василий Горбачев
Виктор Кочемасов, к. т. н.
Сергей Хорев

Аттенюаторы.

Часть 2

В первой части этой статьи, опубликованной в журнале «СВЧ электроника» № 1 за 2023 год, подробно изложены общие сведения об аттенюаторах и описаны чип-аттенюаторы и маломощные LTCC-аттенюаторы.

Во второй части столь же полно описаны аттенюаторы с коаксиальными соединителями и Low PIM-аттенюаторы. Окончание серии публикаций выйдет в следующем номере нашего журнала.

Аттенюаторы с коаксиальными соединителями

Фиксированные

Рассматриваемые аттенюаторы чаще всего конструктивно состоят из коаксиального или микрополоскового элемента ослабления и двух торцевых коаксиальных разъемов. Подавляющее большинство производимых индустрией аттенюаторов этого типа имеют разъемы с импедансом 50 Ом. И значительно меньшее количество ослабителей оснащено разъемами 75 Ом. Надо отметить, что именно с коаксиальным типом радиочастотной среды передачи связан примечательный сюжет о том, как импеданс 50 Ом стал стандартом де-факто. Из истории отрасли известно, что величина 50 Ом, повсеместно принятая в качестве стандарта являет собой компромисс между значениями 30 и 77 Ом, при которых имеется, соответственно, наибольшая передача мощности и наименьшие потери. Процесс этого «усреднения» проходил в 20–30-х годах прошлого века в период становления отрасли. В руко-

водящем документе американской фирмы Bird [1] приводится еще один довод в пользу 50 Ом: утверждается, что в 40-х годах XX века некий консультант К. Л. Роу (C. L. Rouault) из ассоциации производителей радиооборудования (Radio Manufacturers Association — RMA) рекомендовал использовать 50 Ом в качестве стандарта в ВМФ США в том числе потому, что в продаже имелись медные водопроводные трубы как с наружным диаметром 1 дюйм, так и с внутренним 2,3 дюйма, что позволяло из этих труб получить искомым импеданс при изготовлении коаксиального волновода с воздушным диэлектриком. В документе утверждается, что именно с тех пор американские водопроводчики гордятся своим вкладом в развитие радиочастотной отрасли.

Достаточно подробно конструкция и характеристики ослабителей этого типа изложены в работе [2]. Остается добавить несколько классификационных признаков. В отличие, например, от чип-аттенюаторов коаксиальные бывают поглощающего и непоглощающего типа. В свою очередь поглощающие аттенюаторы разделяются на ослабители с проводящим и непроводящим поглотителем. Так, аттенюаторы Т- и П-дизайна [2] являются компонентами поглощающего типа с проводящим поглотителем. В качестве поглощающих элементов для таких ослабителей для частот в несколько гигагерц и выше могут использоваться чип-резисторы с соответствующей формой контактных площадок (рис. 23).

Учитывая, что подобные же резистивные поглотители применяются и в микрополоско-

вых, и в волноводных ослабителях, поглощающие резисторы выпускаются как комплектующие для производства аттенюаторов. Так, в Российской Федерации поглощающие элементы для мощных ВЧ-аттенюаторов и нагрузок производит АО «ОНИИП» (г. Омск). На предприятии проведен цикл работ по увеличению удельной мощности рассеяния с применением накладок из теплопроводной керамики на резисторы из нитрида тантала на подложках из нитрида алюминия [3]. Заявленная производителем удельная мощность рассеяния серийных образцов 100 Вт/см². Еще одним российским предприятием, выпускающим поглотители, является АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина» (Фрязино). Уровень поглощаемой мощности этих изделий достигает 22 Вт/г. Рабочая температура до +800 °С.

Примером поглощающего аттенюатора с непроводящим поглотителем служит коаксиальный аттенюатор с полистирольным поглотителем (рис. 24).

К непоглощающим аттенюаторам относится предельный (запредельный) ослабитель. Применительно к коаксиальной тематике он выглядит как отрезок запредельного волновода, включенного в разрыв коаксиальной линии (рис. 25).

Несколько слов о конструкции и свойствах. Напомним, что если длина волны распространяющегося в волноводе электромагнитного излучения превысит некоторое критическое для этого волновода значение, перенос активной мощности (распространение волны) прекратится. Указанный волновод для этой волны станет предельным (запредельным).



Рис. 23. Планарный резистор как поглощающий элемент



Рис. 24. Коаксиальная линия с поглотителем из полистирола

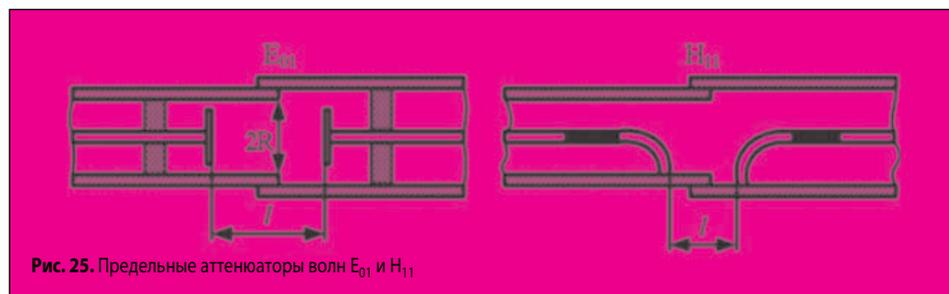


Рис. 25. Предельные аттенюаторы волн E_{01} и H_{11}

В зависимости от вида элементов связи на входе и выходе встроенного в коаксиальную линию волновода в нем происходит возбуждение волн E- или H-типа. Если выполняется правило предельности, излученная волна будет экспоненциально затухать. Ослабление предельного аттенюатора основано на том, что затухающая волна передаст, тем не менее, некоторую часть активной мощности от излучающего элемента связи к приемному. Понятно, что ослабление будет пропорционально длине l предельного волновода (рис. 25). Предельные аттенюаторы имеют следующие недостатки: меньшую по сравнению с поглощающими ширину полосы и обусловленную конструкцией относительную сложность получения малых величин ослабления. К основным достоинствам можно отнести точность настройки/установки ослабления и непоглощающий принцип действия, востребованный в некоторых приложениях отрасли.

Говоря о конструкции коаксиального аттенюатора, уместно остановиться еще на одной особенности этих приборов. Несмотря на кажущуюся простоту коаксиального аттенюатора как механического устройства, существуют весомые технологические проблемы обеспечения его целевых параметров. Например, контроль требуемого импеданса. В этой проблеме самым тонким местом является соединение концевых разъемов с элементом ослабления. Именно в этой области имеются самые большие потери активной мощности, максимальные отражения, влияющие на точность ослабления и фазовые характеристики сигнала. Так, в Southwest Microwave предлагается использовать пространственно-временной метод измерения отражений сигнала для обнаружения неоднородностей среды распространения [4]. Тестовая линия передачи представляет собой копланарный микрополосковый волновод, имеющий на обоих концах коаксиальные разъемы. На входной разъем платы подается пикосекундный импульс, при прохождении которого производится измерение отражения сигнала от каждой точки линии передачи на пути сигнала (рис. 26.)

После окончания измерения производится наложение сигнала рефлектометра на изображение тестовой платы. Сигнал рефлектометра нормируется так, что нулевое его значение соответствует импедансу 50 Ом и цена деления вертикальной шкалы (0,01) равна 1 Ом. Таким образом, все значения выше нуля показывают индуктивный характер сопротивления, а ниже — емкостный. На рис. 26 хорошо видно, что именно в местах соединения волновода с разъемами имеются самые большие отклонения импеданса от номинала. Например, точка обозначенная красным кружком — это импеданс 45 Ом.

В статье [2] приведены обзорные таблицы маломощных (табл. 3) аттенюаторов и средней и большой мощности (табл. 4) с коаксиальными соединителями. Предлагаемое в этом материале продолжение таблицы (табл. 4, 5) дополняет данные 2017 года и отражает современное состояние на рынке ослабителей.

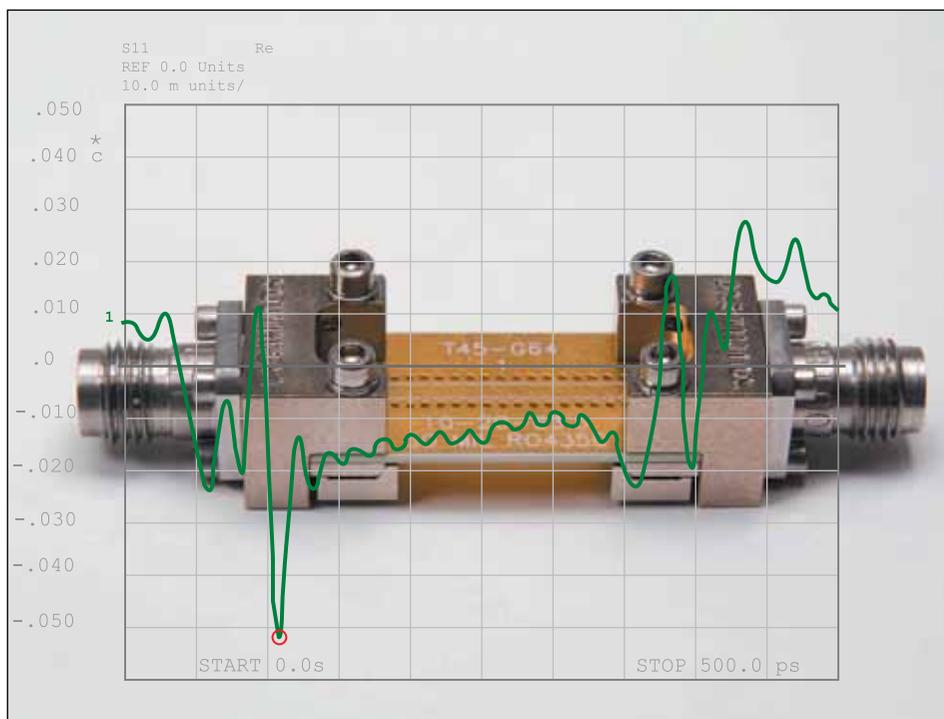


Рис. 26. Наложение сигнала рефлектометра на изображение тестовой платы

Таблица 4. Аттенюаторы с коаксиальными соединителями малой мощности (до 2 Вт)

Фирма	Модель/серия	Рабочая частота, ГГц	Ослабление, дБ	КСВ (макс.)	$P_{вх}$, Вт	Соединитель	Примечание
P1dB	P1AT-18MF-67G2W-10	DC-67	10	1,3	2	1,8 мм	
SHX	2.92TS2-40	DC-40	1-9,10-20, 20-30, 40	1,35	2	2,92 мм	Китай
Midisco	MDC7065x	DC-23	0-40	1,25	2	SMA	
Inmet	9023 9024 9025	DC-18	0-10, 12, 15, 20, 30, 40, 50, 60	1,6	2	SMA m/f	
XMA Corp.	2082-604x	DC-18	3, 6, 10, 20, 30	1,35	2	SMA	
Trilithic Inc.	XFP-18	DC-18	1, 3, 6, 10, 20, 30	1,35	2	SMA,N	
Yantel Corp.	FAT18xxS2SM	DC-18	1-10, 15, 20, 30, 40	1,35	2	SMA	Китай
Электрон-Маш	IFATxx	DC-18	3, 6, 8	1,4	0,5	SMA	Россия
Hewlett-Packard	HP8492A-10	DC-18	10	1,3	2	APC7	
Huber+ Suhner	6820.17A	DC-12,4	20	1,25	1	N m/f	
HJTechnologies	HJA2	6, 8, 12	1-40	1,35	2	BNC, SMA, TNC, N	Китай
Telegärtner Inc.	1000241	10	3, 6, 10, 20	1,22	2	N	
SRTechnology	F01-B0820-05	DC-8	20	1,2	2	SMA	Южная Корея
Cernex-Wave	CFADC04xxx	DC-4	3, 6, 10, 20	1,2	1	SMA	
Mini-Circuits	HAT	DC-2	1-10, 12, 15, 20, 30	1,4	0,3-1	BNC	

Таблица 5. Аттенюаторы с коаксиальными соединителями средней и большой мощности (свыше 2 Вт)

Фирма	Модель/серия	Рабочая частота, ГГц	Ослабление, дБ	КСВ (макс.)	$P_{вх}$, Вт	Соединитель	Примечание
SHX	2.92TS50	DC-40	30, 40	1,6	50	2,92 мм	Китай
Cernex-Wave	CFADC40xxx	DC-40	3, 6, 10, 15, 20, 30	1,6	5, 10, 20	2,92 мм	
Hewlett-Packard	HP8498A	DC-18	30	1,3	25	N m/f	
P1dB	P1AT-SAMF-18G5W-20	DC-18	20	1,35	5	SMA	
Mini-Circuits	BW-S10W20+	DC-18	10	1,4	20	SMA	
XMA Corp.	3082-6502-x	DC-18	1-12, 15, 20, 30, 40	1,4	10	N	
Huber+ Suhner	5910_N-50-010/199_NE	DC-18	10	1,4	10	N m/f	
Trilithic Inc.	HFP-510-18	DC-18	3, 6, 10, 20, 30, 40	1,35	10	N	
Inmet	18N10W-20	DC-18	20	1,4	10	N	
Yantel Corp.	FAT15xxN5	DC-15	3, 6, 10, 20, 30, 40	1,55	5	N	Китай
Midisco	MDC1102-x	DC-12,4	3, 6, 10, 20, 30	1,35	20	N	
HJTechnologies	HJA25	6, 8, 12	1-40	1,35	25	BNC, SMA, TNC, N	Китай
SRTechnology	F04-J0430-07	DC-4	30	1,3	100	N m/f	Южная Корея
ЭРКОН	ПР1-25-2000	DC-2,5	20, 30, 40	1,35	2000	N, тип III	Россия

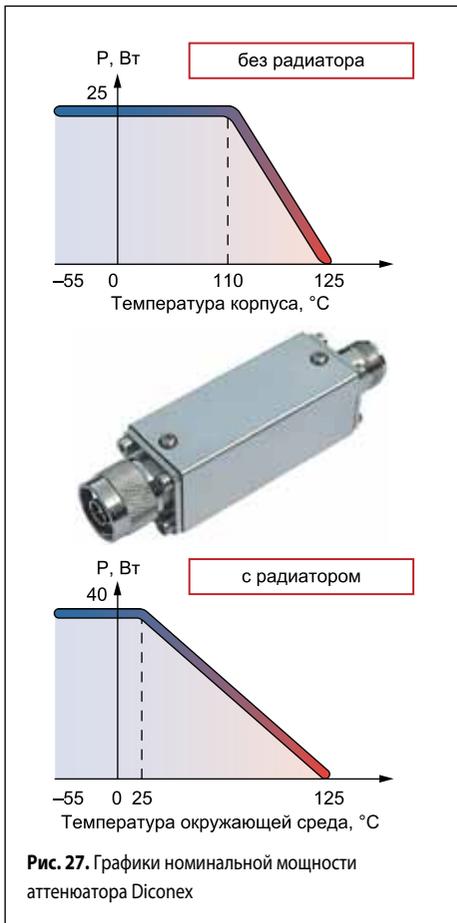


Рис. 27. Графики номинальной мощности аттенюатора Diconex

Температурные особенности применения поглощающих аттенюаторов

Несмотря на то что поглощающие коаксиальные аттенюаторы имеют поверхности охлаждения, соответствующие их мощности, изменение параметров ослабления при изменении температуры остается актуальной проблемой использования данных изделий. Причем применение радиатора в конструкции изделия (возможно, это будет выглядеть как каламбур) «не только упрощает, но и усложняет» охлаждение изделия, поскольку наличие радиатора не только позволяет отдать больше тепла в атмосферу, но и увеличивает зависимость температуры аттенюатора от температуры окружающей среды. Это хорошо видно на примере изделий французской фирмы Diconex. Так, в каталоге 2022 года присутствует коаксиальный ослабитель до 2,5 ГГц, имеющий мощность 25 Вт в исполнении без

радиатора и 40 Вт с радиатором [5]. При этом в ТТХ изделия приведены два графика зависимости мощности от температуры (рис. 27).

Отметим, что в исполнении без радиатора на графике указана температура корпуса ослабителя, а в радиаторном варианте — температура окружающей среды. Обращает на себя внимание и то, что у радиаторного исполнения номинал по мощности гарантируется только до температуры +25 °С, притом, что указанный температурный диапазон изделия составляет -55...+125 °С.

В общем и целом этот момент не регламентирован и сам производитель выбирает температурный параметр для указания в описании ослабителя. Так, фирма Bird для своих безрадиаторных фиксированных аттенюаторов (например, серия 3-A-MFB-XX) указывает в ТТХ, в отличие от предыдущего примера, окружающую температуру. При этом понятно, что из трех одноранговых терминов: температура корпуса (Case Temperature), окружающая температура (Ambient Temperature) и рабочая температура (Operating Temperature) последний сообщает минимум информации о температурных свойствах ослабителя с радиатором. Иногда это может создавать проблему выбора. К примеру, фирма Atlantic Microwave для своих фиксированных аттенюаторов с радиаторами серий АВ06 и АВ18 (частоты до 6 и 18 ГГц соответственно) указывает рабочую температуру (Operating Temperature) до +125 °С и до этой же температуры линейность мощности (Power Derating) без указаний на то, какая конкретно температура представлена в ТТХ изделия.

Достаточно общий подход при наличии у изделия радиатора заключается в том, что производитель указывает в документации пространственное положение радиатора, при котором реализуется паспортная мощность. Это, в частности, практикуют такие фирмы, как Bird, Weinschel и Narda.

Еще один способ уменьшения зависимости от температурной нестабильности поглощающих коаксиальных ослабителей предлагает фирма МЕСА. В ее продуктовой линейке имеются измерительные наборы аттенюаторов на диапазоны частот до 800, до 2200 и до 4200 МГц, предназначенные для ежедневного контроля мощности базовых станций. Эти изделия появились как реакция на значительный разброс значений ежеднев-



Рис. 28. Измерительный набор МЕСА

ных измерений мощности, связанный с температурой окружающей среды. В качестве основного аттенюатора с минимальными искажениями предлагается использовать направленный ответвитель как устройство, почти не имеющее поглощения и связанных с ним проблем. Например, в наборе МФК-РМК-1 (до 2200 МГц) входит 500-Вт ответвитель на 30 дБ, три 2-Вт коаксиальных аттенюатора на 6, 10 и 20 дБ и оконечная нагрузка на 100 Вт (рис. 28).

Измеряемая мощность снимается с порта ответвления и через маломощный аттенюатор подается на измеритель мощности. Выход основного канала ответвителя нагружается терминатором [6].

Существует еще один класс аттенюаторов с коаксиальными соединителями, имеющий специфические температурные характеристики. Развитие квантовых компьютеров в текущем веке привело к появлению аттенюаторов, работающих при экстремально низких температурах в искусственно охлаждаемых средах. Так, американская фирма ХМА Corporation выпускает около двух десятков серий коаксиальных аттенюаторов, предназначенных для работы при температуре 4 Кельвина (-269 °С). Все эти изделия, кроме цифрового индекса, имеют в названии приставку -CRYO. Понятно, что основной проблемой при работе резистивных элементов при такой температуре является сверхпроводящий режим, превращающий ослабитель поглощающего типа в линию без потерь. В аттенюаторах ХМА применяется проприетарный тонкопленочный резистор, имеющий отклонение 2% при температуре около абсолютного нуля. На рис. 29 представлено несколько изделий из CRYO-линейки ХМА.



Рис. 29. CRYO-аттенюаторы ХМА: а) серия 2782-6051-xx-CRYO, 26,5 ГГц, 2 Вт, SMA m/f, 0–30 дБ; б) серия 4880-5523-xx-CRYO, 18 ГГц, 1 Вт, 2,92 мм f/f, bulkhead, позолоченная медь; в) серия 2982-6140-xx-CRYO, 18 ГГц, 1 Вт, SMP m/f, 0, 3, 6, 10, 20 дБ

Low PIM-аттенуаторы

На примере аттенуаторов с коаксиальными соединителями можно упомянуть еще об одной особенности применения этих приборов. Речь пойдет об интермодуляционных искажениях сигнала, возникающих в радиочастотных аттенуаторах и нагрузках, в моделях большой мощности. Вкратце напомним, что классическая интермодуляция возникает при работе активных каскадов в нелинейном режиме, когда происходит либо внешнее «эфирное», либо «внутреннее» (в устройстве) взаимодействие двух близких частот с появлением суммарных и разностных частот, паразитно расширяющих спектр. Кроме классических интермодуляционных искажений эти же эффекты могут наблюдаться в пассивных компонентах устройств, в частности в ослабителях. Такой тип искажений называют пассивной интермодуляцией (ПИМ), а пассивные приборы, позволяющие снизить уровень таких искажений, — Low PIM. Сложность проблемы заключается в том, что причиной ПИМ могут быть совершенно разные и нередко слабо контролируемые эффекты и явления. Например, погодное (температурное) воздействие, приводящее к искажению геометрии соединения или среды распространения, может стать фактором, провоцирующим ПИМ. Список таких «провокаторов» удручающе велик. Это может быть:

- гальваническое несоответствие металлов в соединении;
- наличие ферромагнетиков в среде распространения или рядом;
- грязь, пыль, влага, окисление в контактах;
- инородные включения в средах передачи — металлическая стружка, клеи и т. п.;
- плохо закрученные, поврежденные или некачественные разъемы;
- резкие геометрические изменения тракта ВЧ-тока в мощных радиочастотных приборах;
- наличие движущихся и неподвижных проводящих предметов в прямом и боковом лепестках ДН-антенны.

Список можно продолжать, и это говорит о серьезности проблемы. Из-за своей «вездесущести» ПИМ даже получил шуточное прозвище «эффект ржавого болта» (Rusty bolt effect).

По сложившейся методике, отраженной в руководящих документах ИЕС, уровень ПИМ измеряют на частоте нечетного (практически всегда третьего) порядка интермодуляционного искажения либо в стандартных единицах дБм, либо относительно уровня одной из исходных частот (дБн, dBc). Значения ПИМ в этих единицах будут различаться. К примеру, ПИМ-продукт третьего порядка (IM3) в –110 дБм также будет иметь значение –153 дБн при условии стандартного двухчастотного тестового сигнала 2×20 Вт. Поскольку при измерении ПИМ используются интермодуляционные продукты третьего порядка, то наряду с термином Low PIM существует и термин Low IM3.

Отметим, что в отечественной отраслевой терминологии нет термина, аналогичного Low PIM (надо обратить внимание, что речь идет именно о Low PIM, а не просто о ПИМ (ПИИМ), который широко используется). Ближайшим

подобием можно считать термин «неискажающий» (аттенуатор), хотя, конечно, применение этого термина подразумевает более серьезные требования к устройству, чем просто снижение пассивной интермодуляции.

Если попытаться ответить на вопрос, чем конструктивно отличается Low PIM-аттенуатор от обычного, то почти наверняка никаких особых приемов конструирования этих изделий мы не увидим. Ответ будет выглядеть примерно так: «Если аттенуатор — это хороший прибор, то Low PIM-аттенуатор — это очень хороший прибор». Вот как, например, описывается конструкция Low PIM-аттенуатора в документе компании R&D Microwaves LLC [7]. Заметим сразу, что в цитируемом документе устройство называется PIM-Free. Речь пойдет об изделии AT-A09, наборе из трех идентичных измерительных ослабителей, предназначенных для контроля параметров усилителей сетей 4G в диапазоне 400–2900 МГц (рис. 30). Это устройство в настоящее время не производится, и мы воспользуемся его описанием для прояснения конструктивных особенностей изделий данного класса.

Каждый из трех каналов состоит из направленного ответвителя на 30 дБ, катушки микроволнового кабеля и резистивной нагрузки. Направленный ответвитель собран из пяти четвертьволновых секций (патентованная конструкция R&D Microwaves LLC), имеет KCB в полосе 1,08, неравномерность частотной характеристики $\pm 0,05$ дБ на каждые 20 МГц в полосе и типовой ПИМ –174 dBc. С канала ослабления мощность подается на измеритель, а с основного канала — на катушку и далее на нагрузку. Микроволновый кабель для снижения ПИМ пропитан расплавленным оловом. Далее отмечается, что вместо разъемов N-типа на входе ответвителя для улучшения качества сигнала использованы соединители 7/16-DIN, поскольку они позволяют прикладывать больший крутящий момент при создании соединения. На канале ответвления использованы разъемы N-типа для лучшего согласования с измерительным оборудованием. В итоге, если не учитывать проприетарную конструкцию направленного ответви-



Рис. 30. PIM-Free-аттенуатор AT-A09

теля, все остальные меры по снижению пассивной интермодуляции достаточно стандартные. В частности, здесь мы увидели использование более подходящего для уменьшения ПИМ разьема и применение в качестве согласующего аттенуатора катушки микроволнового кабеля дополнительно покрытого оловом. Это достаточно известный прием. Так, в [8] приводятся экспериментальные данные о том, что применение 10 м подготовленного для снижения ПИМ кабеля с разъемами 7/16-DIN уменьшает уровень ПИМ на 30 дБ на частоте 1,8 ГГц, по сравнению с обычным кабелем и соединителями SMA.

Отметим дополнительно, что подобные катушечные аттенуаторы, производившиеся более десятилетия назад той же фирмой R&D Microwaves и рядом других компаний в качестве самостоятельных изделий и характеризовавшиеся очень малым уровнем (по отношению к другим типам аттенуаторов) интермодуляционных искажений, в настоящее время не используются. Прежде всего, в силу достаточно узкого частотного диапазона, обусловленного, впрочем, понятными причинами. Например, одна из старых Low PIM-моделей R&D Microwaves AT-A12-B1-800 имела полосу всего 200 МГц (диапазон 700–900 МГц).

Некоторое время назад в отраслевой среде присутствовало мнение, что ПИМ возникает вследствие ошибок проектирования. Сегодня эта точка зрения не определяет тренд развития. Видимо, отчасти и из-за этого значи-

Таблица 6. Low PIM аттенуаторы

Фирма	Модель	Мощность, Вт	Частота, ГГц	ПИМ, дБн	Ослабление, дБ	Примечание
SHX	DTS300-xx-0830-N-LIM	300	0,8–3	–150	10, 20, 30, 40	Китай
R&D Microwaves	AT-A69	250	0,4–13	–160	10, 20, 30	Самое мощное изделие фирмы
API technologies	Model 245	175	DC–6,5	–140 –155	10, 20, 30, 40	Изделие выпускается по договору с Weinschel
Yantel Corp.	серия FAT04-xxN150	150	DC–3,5	–	3, 6, 10, 20, 30, 40	Китай
MECA	LPA50 LPA100	50 100	0,698–2,7	–150 –160	15–40	
API technologies	Model 298 LIM	100	DC–6	–140 –155	3–30	Изделие выпускается по договору с Weinschel
Telegärtner Inc.	100025361	100	0,698–2,7	–161	30	Прежнее название J01444A0010
Weinschel (Aeroflex)	WA47(LIM)	50	DC–18	–110*	6–40	
JFW Industries	50FLP-xxx-100	100	0,698–2,7	–165	5–30	
Infacom	Серия IF-ATLx/x/x	10, 13	0,6–2,7	–150	6, 10, 13, 15, 20	Испания
Techniwave	Выпускаются Low PIM-версии изделий основной производственной линейки					

Примечание. * Фирма Weinschel Associates производит Low PIM-ослабители как опции основного ряда линейки, в связи с чем параметр ПИМ отсутствует в технических данных изделия. Приведенное значение взято из описания аналогичного аттенуатора (model 47 LIM) фирмы Aeroflex, в настоящее время входящей в Weinschel.



Рис. 31. Атенюаторы QMA с быстроразъемными соединителями

тельное количество фирм производят Low PIM-аттенюаторы. В основном это мощные модели, поскольку как отмечалось выше, именно мощные пассивные приборы наиболее подвержены генерации интермодуляционных составляющих. Некоторые производители Low PIM-ослабителей приведены в табл. 6.

Кроме собственно Low PIM-аттенюаторов, в продуктовых линейках фирм присутствуют комплектующие изделия с высокими интермодуляционными характеристиками, что позволяет разработчикам проектировать тракты с пониженной интермодуляцией. Так, тайваньская компания Juebao производит большую линейку Low PIM-разъемов, среди которых присутствуют SMA, N, 7/16, в том числе в исполнении «под гайку», прямые и 90-градусные. Частотный диапазон достигает 18 ГГц, KCB не хуже 1,35.

Фирма Atlantic Microwave предлагает наборы полужестких Low PIM-кабелей. Использование сплава олова и меди в качестве наружного слоя позволяет производителю заявлять невысокую цену изделий по сравнению с медным наружным проводником. Длина кабелей в наборе составляет 2–60 дюймов, с изменением через дюйм. Полоса DC–18 ГГц, KCB 1,1–1,4, постоянная мощность до 15 Вт. Необходимо отметить, что ПИМ-характеристики (–155 дБм) получены двухчастотным способом на частоте 6 ГГц с уровнем +26 дБм.

Подобные же наборы кабелей с различными типами соединителей предлагает и фирма R&D Microwaves (например, CBL-xxFT-xx-402). Заявлен ПИМ не хуже –160 дБм и возвратные потери 25 дБ на частоте 3 ГГц. В отличие от предыдущего примера заявлена средняя мощность до 550 Вт на частоте 1 ГГц.

Отступая от темы Low PIM-комплектующих, надо отметить еще один тренд современности. Если для улучшения PIM-свойств аттенюаторов требуется более сильная затяжка разъемов, то существует и обратный процесс создания ослабителей с быстроразъемными соединителями. Этот тренд является следствием постоянного уменьшения размеров микроволновых устройств, в результате чего монтажное пространство уже не позволяет использовать динамометрический ключ для затяжки разъема. Серийные быстроразъемные микроволновые соединители производит, например, компания Midwest Microwave. Она интегрировала интерфейс компании Emerson Network Power Connectivity Solution “KwiQMate” в линейку своих аттенюаторов QMA (рис. 31)

50-Ом серия QMA работает в частотном диапазоне 0–6 ГГц на мощностях до 2 Вт при +25 °С. Максимальный KCB 1,3. Ослабления: 1, 2, 3, 6, 10 дБ. Корпусы ослабителей выполнены из латуни с финишным покрытием Tri-Alloy.

Ручные плавнопеременные аттенюаторы с коаксиальными соединителями

Некоторые конструкции переменных коаксиальных аттенюаторов были представлены в [9]. Рассмотрим еще несколько моделей. Поскольку коаксиальная линия является довольно неудобной конструкционной основой для плавнопеременного ослабления микроволновой мощности, в большинстве серийных конструкций переменных аттенюаторов между входными и выходными коаксиальными разъемами применяются другие среды передачи. Например, фирма Merrimas имеющая большую линейку переменных ослабителей, применяет прямоугольную среду распространения, в которой центральный проводник нагружен поглощающей ферритовой вставкой (рис. 32).

Ферритовая вставка смонтирована на графитовой системе перемещения, которая кроме собственно изменения положения поглотителя является каналом отвода тепла и обеспечивает сухую смазку при вращении механизма. Эта конструкция переменного поглотителя применяется на частотах до 18 ГГц.

На рис. 33 представлено несколько изделий из линейки плавнопеременных коаксиальных аттенюаторов Merrimas.

Сравнивая фрагменты на рис. 33г и на рис. 33д, можно увидеть, что Merrimas, как и другие производители подобного оборудования, оснащает одну и ту же модель аттенюатора разными системами отсчета. В данном случае речь идет об изделии AU-25A. Частотный диапазон 1–19 ГГц, средняя мощность 4 Вт, KCB до 1,5, диапазон ослаблений 0–30 дБ. В серии AU-25A семь моделей: пять (с разными типами разъемов) под шлицевую отвертку и два с микрометрическим механизмом и так же с разными комбинациями разъемов.

Иной принцип плавнопеременного ослабления реализован в изделиях компании Narda. Если Merrimas использует для ослабления поглощающий центральный проводник, то Narda в своих аттенюаторах применяет поглощающий внешний проводник (lossy wall attenuator). В таких конструкциях часть внешнего проводника полосковой линии заменяется на материал с потерями [11]. При изменении взаимного расположения центрального проводника и фрагмента внешнего проводника с потерями происходит регулируемое поглощение микроволновой мощности во внешнем проводнике (рис. 34).

Очевидное преимущество этой конструкции состоит в том, что поскольку поглощение про-



Рис. 32. Распределение поля и принцип устройства переменного ослабления

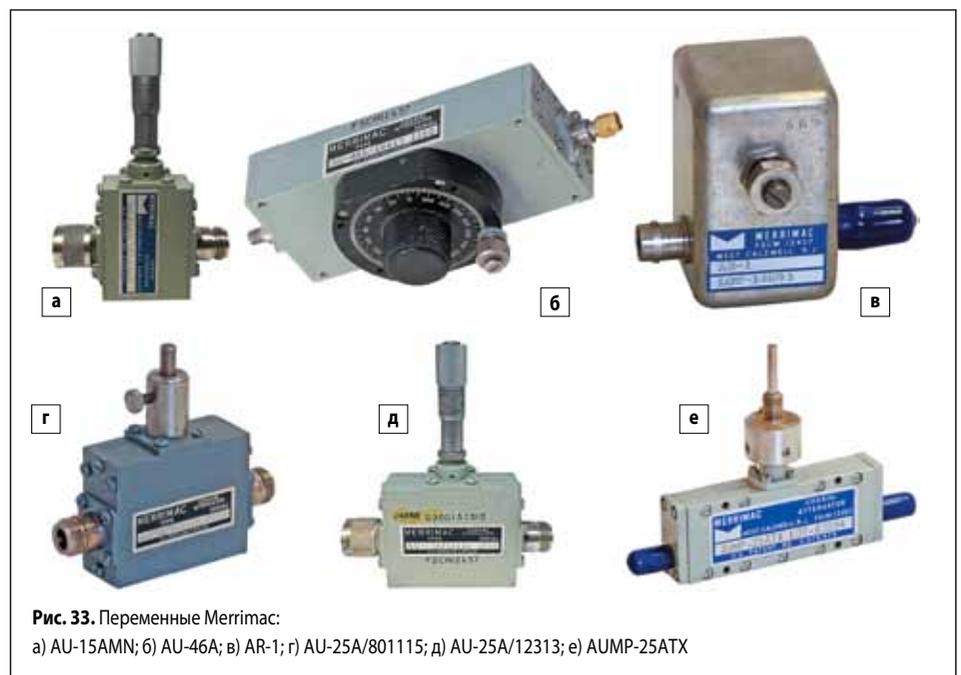


Рис. 33. Переменные Merrimas: а) AU-15AMN; б) AU-46A; в) AR-1; г) AU-25A/801115; д) AU-25A/12313; е) AUMP-25ATX

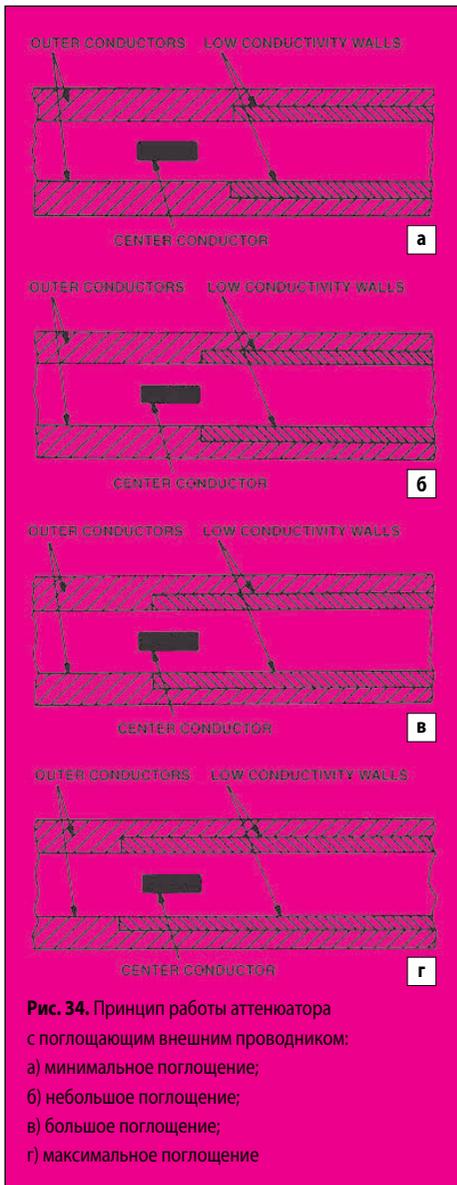


Рис. 34. Принцип работы аттенюатора с поглощающим внешним проводником:
 а) минимальное поглощение;
 б) небольшое поглощение;
 в) большое поглощение;
 г) максимальное поглощение

исходит во внешнем проводнике, упрощается отвод тепла в отличие от изделий Merrimas. Возможно, по этой причине большинство переменных аттенюаторов Narda рассчитано на мощности до 10 Вт (у Merrimas до 5 Вт). Ограничения существующих материалов с потерями делают эффективным применение этой технологии начиная с 2 ГГц. Например, в технических данных моделей 791F и 792F (рис. 36г, д) ослабление приборов указано отдельно для диапазонов 2–2,5 ГГц (для 791F 0–35 дБ) и 2,5–12,4 ГГц (для 791F 0–37,5 дБ). Верхняя граница частоты обычно не превышает 18 ГГц. Зависимость свойств поглощающего материала от частоты принуждает искать компромисс между частотным диапазоном, ослаблением и неравномерностью аттенюатора. Например, одна и та же модель прибора может применяться на частоте 16 ГГц с затуханием 90 дБ и на частоте 12 ГГц с затуханием 50 дБ (имеется в виду, при одном и том же положении системы позиционирования). Все сказанное можно проиллюстрировать рисунком, на котором графики «ослабление/частота» для Lossy Wall аттенюаторов сравниваются с такой же зависимостью для переменного ослабителя другой технологии (рис. 35).

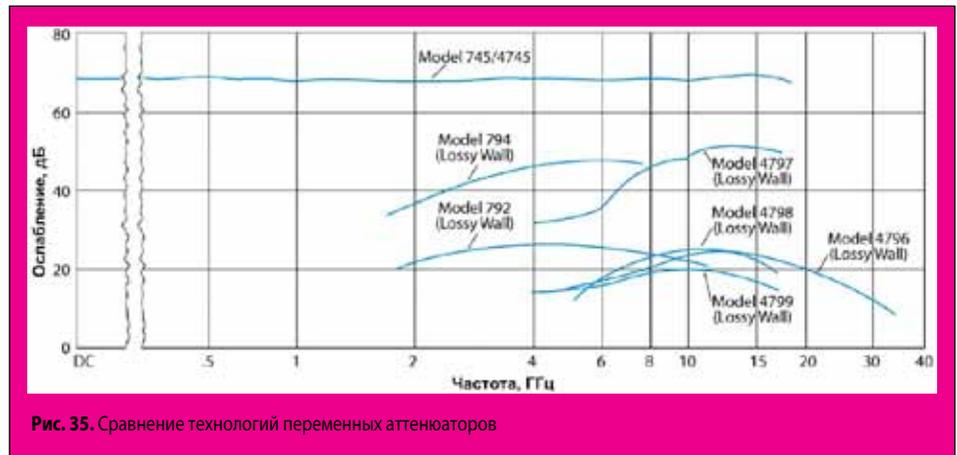


Рис. 35. Сравнение технологий переменных аттенюаторов

Самый верхний график рис. 35 (Model 745/4745) относится к модели переменного пошагового аттенюатора. По сути, это набор тонкопленочных фиксированных аттенюаторов, соединяемых в последовательную цепь посредством системы переключения. Таким образом, можно представить себе частотные свойства Lossy Wall-аттенюаторов по сравнению с другими типами переменных ослабителей. На рис. 36 представлены примеры аттенюаторов Narda.

Литература

1. www.docviewer.yandex.ru/view/586450164/?page=1&*=-dP5TZ2Nvhx5La8s%2FMecu7zafjYN7InVybCI6Imh0dHBzOi8vYmlyZHFmLmNvbS9%2BL2lZGhL0JpcmQvRmlsZXMvUERGhLJlc29lcmNlcy9hcHAtbm90ZXMuU2NpZW5jZS1vZi0lMCI1PaG1zLmFzaHgiLCJ0aXRzS16lNjaWVvY2Utb2YtNTAtT2htcy5hc2h4Iiwibm9pZnJhbWUzOnRydWUzInVpZCI6IjU4NjQlMDE2NCIsInRlZjoxNjUxOTQ5NDA5OTA1LCJ5dSI6IjM0Mjc2MzY5NTE2NDY2NzU3MzEiLCJzZXJwUGFyYW1zIjoIdG09MTY1MTk0OTQwMiZ0bGQ9cnUmbGFuZz1lbiZuYW1pVnJaWVvY2Utb2YtNTAtT2htcy5hc2h4JnRleHQ9c2NpZW5jZStvZis1MCTvaG0rQmlyZCZ1cmw9aHR0cHMLM0EvL2JpcmRyZi5jb20yfi9tZWVpY39CaXJkL0ZpbGVzL1BERi9SZXNvdXJjZXMuYXBwLW5vdGVzL1NjaWVvY2Utb2YtNTAtT2htcy5hc2h4JmxyPTIxNjQ2MyZtaW1pX3BkZiZsMTBuPXJ1NjNpZ249MTljYWIxYWEx
2. Кочемасов В., Белов Л. Фиксированные аттенюаторы — производители и характеристики. Часть 1 // Электроника НТБ. № 6. 2017. стр. 108–116.
3. Корж И. А., Николаенко К. В., Кузнецов А. Н. Тонкопленочные резисторы с повышенной рассеиваемой мощностью // Техника радиосвязи. 2018. Вып. 2.
4. [www.hasco-inc.com/content/Technical_Articles/Utilizing_Time_Domain_\(TDR\)_Test_Methods.pdf](http://www.hasco-inc.com/content/Technical_Articles/Utilizing_Time_Domain_(TDR)_Test_Methods.pdf)
5. www.diconex.fr/wp-content/uploads/2022/02/Coaxial-Attenuators-ed7.1i-22fev2022.pdf
6. www.e-meca.com/blogs/news/rf-measurement-kit
7. Antkowiak M. PIM-Free Attenuator Aids Amplifier Testing, R&D Microwaves LLC. www.d2f6h2rm95zg9t.cloudfront.net/81644761/PIM_free_attenuator_29942083.pdf
8. Белов Л. Интермодуляционные явления при усилении и обработке СВЧ-сигналов // СВЧ-электроника. 2016. № 1.
9. Кочемасов В., Белов Л. Аттенюаторы с ручным управлением. Производители и характеристики // Электроника НТБ. 2017. № 3.
10. RF & Microwave Variable Attenuators DC–18 GHz General Information. www.yumpu.com/en/document/read/25743648/rf-microwave-variable-attenuators-dc-180-ghz
11. www.nardamiteq.com/product-spec/037-AttenuatorAppNotes.pdf



Рис. 36. Переменные Narda: а) 4798; б) 4797; в) 22682; г) 791FM; д) 792FF; е) 793FF