

# УПРАВЛЯЕМЫЙ НАПРЯЖЕНИЕМ АТТЕНЮАТОР

ЧЕН ЛЕОНГ ЛИМ (CHIN-LEONG LIM), Avago Technologies

*В статье обсуждаются способы построения аттенюаторов, управляемых напряжением, в частности, П- и Т-образные схемы. Описывается компактный модуль аттенюатора на базе PIN-диодов, разработанный компанией Avago для применения в системах кабельного и спутникового телевидения, который обеспечивает широкий динамический диапазон и полосу частот. Статья представляет собой перевод [1].*

Аттенюаторы, управляемые напряжением, обеспечивают идеальный контроль амплитуды в широком диапазоне частот с высокой стабильностью и точностью. Учитывая современную тенденцию к миниатюризации электронных устройств, они должны выполнять свои функции в максимально компактном корпусе. В данной статье пойдет речь о том, как был разработан диодный аттенюатор с П-образной схемой с широкой полосой пропускания и высокой точкой перехвата в компактном корпусе размером 3,8 × 3,8 мм. Данный аттенюатор, управляемый напряжением, предназначен для широкого спектра приложений, включая системы кабельного и спутникового телевидения, а также тестовое оборудование.

Несмотря на то, что имеется достаточно большой выбор топологий для реализации управляемого напряжением аттенюатора с постоянным импедансом, только П- и Т-образные схемы обеспечивают достаточно компактные размеры в частотном диапазоне 10...500 МГц. Кроме того, П- и Т-конфигурации являются широкополосными, поскольку они не строятся на частотно-зависимых компонентах, таких как линии передачи, квадратные мостовые соединения или циркуляторы. Поэтому такие топологии позволяют создавать компактные устройства, которые обеспечивают непрерывное частотное покрытие от нескольких МГц до нескольких ГГц. В частности, П-образные аттенюаторы, управляемые напряжением, благодаря низкой стоимости, небольшим размерам и широкой полосе пропускания популярны в системах кабельного и спутникового телевидения.

Размеры П-образных аттенюаторов на PIN-диодах, также как и других компонентов, используемых в беспро-

водных приложениях, должны быть как можно меньше для экономии пространства в конечных приложениях. На рисунке 1 показаны размеры аттенюаторов данного класса нескольких поколений. Линейная аппроксимация уменьшения размеров дает оценку скорости изменения площади этих компонентов на уровне примерно 20 мм<sup>2</sup> в год.

Одна из первых попыток миниатюризации аттенюаторов данного класса заключалась в том, что три PIN-диода были интегрированы в корпус таблеточного типа DIN 50B4 при создании прибора Intermetall TDA 1053. Однако 3-диодная топология 1960-х гг. исключена из графика на рисунке 1, поскольку она была вытеснена 4-диодной конфигурацией, предложенной в 1991 г. Данная топология быстро стала де факто стандартом, поскольку она устранила проблему асимметричного смещения, свойственную 3-диодной топологии. Кроме того она стала важным этапом в

миниатюризации управляемых напряжением аттенюаторов, поскольку эта конфигурация была представлена полностью в исполнении поверхностного монтажа. Последующие попытки миниатюризации были связаны с реализацией 2-х диодов в корпусе SOT-323, интегрированием диодов и других пассивных компонентов в интегральную схему и интегрированием всех четырех диодов в один корпус SOT-89. Монолитную технологию при сокращении размеров аттенюаторов применять нельзя, поскольку требуется, чтобы конденсаторы для аттенюаторов емкостью порядка нФ работали вплоть до нижней предельной частоты в 5 МГц для восходящего (upstream) канала кабельного телевидения.

Разработанный модуль аттенюатора имеет площадь посадочного места, равную 14 мм<sup>2</sup>, что соответствует 4% площади первого 4-диодного варианта устройства. Далее в статье будут описаны схема и конструкция модуля

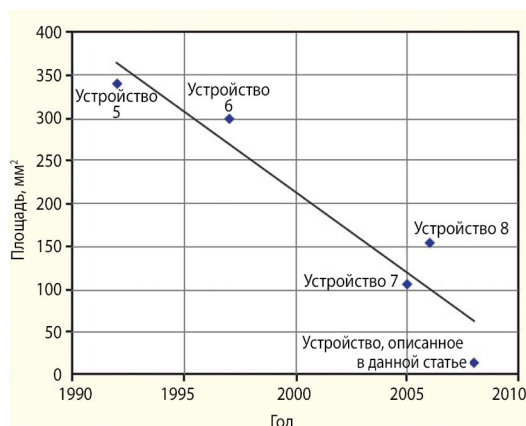


Рис. 1. Размеры П-образных переменных аттенюаторов на PIN-диодах уменьшались в соответствии с требованиями к широкополосным приложениям

и представлены экспериментальные данные, полученные в ходе тестирования устройства. Кроме того, будут обсуждаться подробности выбора переменного сопротивления и те изменения в схеме, которые были сделаны для уменьшения рабочего напряжения.

На рисунке 2 показана базовая схема П-образного аттенюатора, а также расчетные уравнения для данной схемы. Шунтирующий резистор R1 и последовательный резистор R3 выбирают исходя из требуемой величины ослабления  $A = 20 \log(K)$ , одновременно задавая входной и выходной импеданс, соответствующий характеристическому полному сопротивлению системы. При работе на частотах, значительно превышающих частоту среза  $f_c$ , PIN-диод может быть использован как управляемый ток переменный резистор, поэтому такие диоды можно использовать для замены фиксированных сопротивлений в схеме при создании переменного аттенюатора. Хотя для этого можно использовать полевые транзисторы, их линейность значительно хуже PIN-диодов и они требуют отрицательного управляющего напряжения.

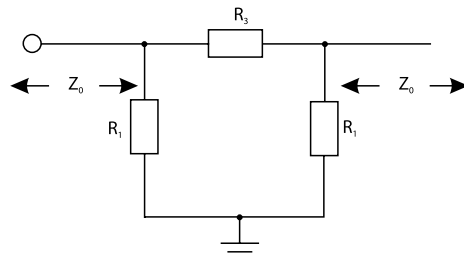
PIN-диоды различаются технологией изготовления (например, есть эпитаксиальные и объемные диоды) и высотой W слоя собственной проводимости I. Сочетание объемной подложки и толстого слоя I обеспечивает большое время жизни носителей  $\tau$  — важное условие низкого уровня искажений аттенюатора. Отрицательным моментом является то, что PIN-диод с большим временем жизни требует более высокого тока смещения для управления своим сопротивлением. Для иллюстрации зависимости между  $\tau$  и линейностью на рисунке 3 изображены точки перегиба второго и третьего порядка (IP2 и IP3) PIN-диодов с двумя разными значениями  $\tau$ . Из-за жестких требований к линейности в целевом приложении (системы кабельного и спутникового телевидения) для реализации данного аттенюатора, управляемого напряжением, был выбран диод с большим временем жизни носителей ( $\tau = 1500$  нс), т.к. системы кабельного и спутникового телевидения должны поддерживать одновременно большое число каналов без взаимных помех.

Если последовательный резистор в нерегулируемом аттенюаторе заменить на два диода, то получится аттенюатор с симметричной схемой (см. рис. 4). Разделение последовательного резистора позволяет подключить резистор смещения R3 к средней точке последовательной цепи, а не к одному из ее концов как в 3-диодной топологии. Симметрия в схеме гарантиру-

ет идентичные токи смещения через шунтирующие диоды. Реализация последовательной цепи в виде пары противоположно включенных диодов (антипараллельной пары диодов) также уменьшает искажения второго порядка, поскольку нелинейные иска-

жения сдвинуты по фазе на  $180^\circ$  и взаимно компенсируют друг друга.

Ток смещения диодов и, соответственно ослабление, управляется напряжением  $V_c$ . Резисторы R1 и R2 обеспечивают обратное смещение для последовательных и шунтирующих



$$R_1 = Z_0 \frac{(K + 1)}{(K - 1)}$$

$$R_3 = \frac{Z_0}{2} \left[ K - \frac{1}{K} \right]$$

где K – отношение входного напряжения к выходному, а  $Z_0$  – импеданс источника и нагрузки

Рис. 2. П-образный аттенюатор с фиксированным ослаблением и расчетные уравнения для схемы

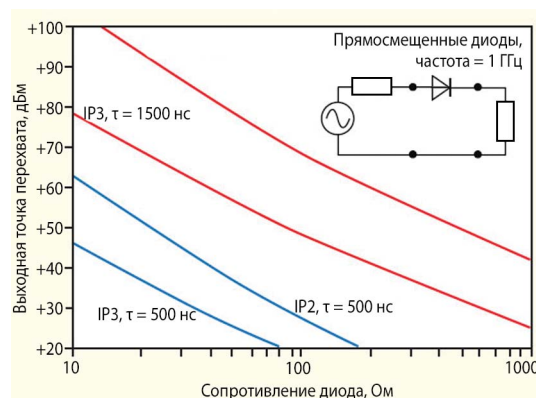


Рис. 3. Сравнение точек перегиба второго и третьего порядка IP2 и IP3 для PIN-диодов с двумя разными значениями времени жизни  $\tau$

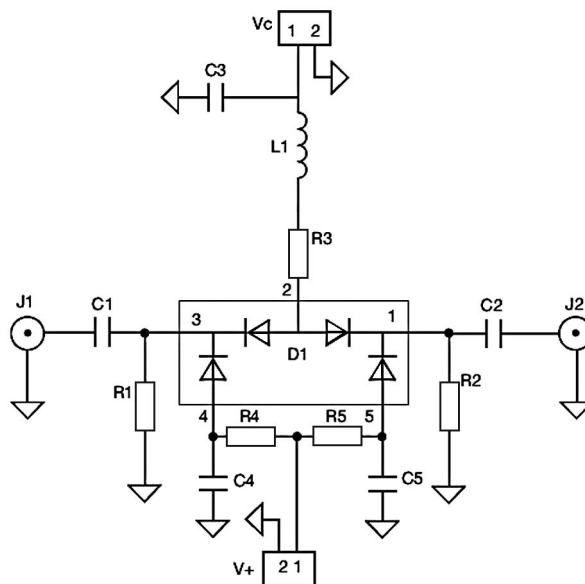


Рис. 4. Заменяя последовательный резистор в П-образном нерегулируемом аттенюаторе двумя диодами, можно получить регулируемый аттенюатор

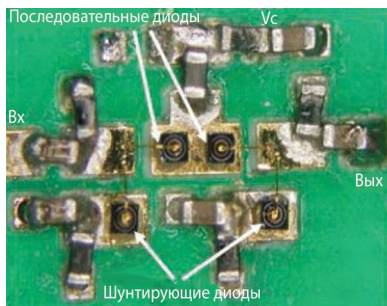


Рис. 5. Тестовая плата аттенюатора, управляемого напряжением, содержит 50-Ом микрополосковые линии, изготовленные на ламинате RO4350 компании Rogers Corp.

диодов. Поскольку эти два резистора шунтируют радиочастотный тракт, их сопротивление должно быть достаточно высоким для блокировки радиочастоты, но не слишком высоким, чтобы на них не возникало большого падения постоянного напряжения. Ток через шунтирующие диоды задается фиксированным напряжением  $V_+$  и ограничивается резисторами R4 и R5. В данной схеме величина  $V_+$ , равная 1,5 В DC, была определена эмпирическим путем так, чтобы обеспечить наименьшие обратные потери при всех уровнях ослабления.

4-диодные аттенюаторы, управляемые напряжением, были спроектированы для управляющего напряжения, которое может изменяться в пределах 0...15 В. Поскольку напряжение питания современных устройств ограничено, то число возможных потребителей таких схем сокращается. Но отрицательным эффектом ограничения максимального значения  $V_c$  величиной 5 В является увеличение минимального ослабления с 3 дБ до 9,5 дБ (при 1 ГГц) вследствие уменьшения максимальной величины тока, необходимого для смещения последовательных диодов.

Чтобы достичь исходной величины минимального ослабления, но при значении управляющего напряжения в три раза меньшем, в данной схеме используются резисторы R1—R3 меньших номиналов, чтобы обеспечить более высокий ток через последовательно включенные диоды. Номиналы резисторов R1 и R2 были уменьшены

примерно на 42% (с 560 Ом до 330 Ом), а R3 — более, чем на 93% (с 330 Ом на 22 Ом). Однако эти резисторы шунтируют радиочастотный тракт и при снижении их сопротивления ниже величины 4-кратного характеристического сопротивления ( $4Z_0$  или, например,  $R < 300$  Ом для 75-Ом системы) снижается их эффективность как высокочастотного фильтра. Чтобы компенсировать снижение эффективности R3 последовательно с ним включается ферритовая катушка индуктивности L1.

Ферритовая катушка была выбрана потому, что она является эффективным широкополосным дросселем. Всего в автономный модуль управляемого напряжением аттенюатора размером 3,8×3,8 мм были интегрированы 4 PIN-диода, 6 резисторов, 5 конденсаторов и одна ферритовая катушка индуктивности. Сборка компонентов была выполнена по технологии многокристального монтажа на плате (Multi-Chip-On-Board — MCOB) на многослойном ламинате толщиной 10 мил<sup>1</sup> с диэлектрической постоянной  $\epsilon_r = 3,48$  и тангенсом угла диэлектрических потерь, равным 0,004. Сквозные переходные отверстия соединяют проводники на верхней стороне платы с контактными площадками на нижней стороне. Монтажная сторона платы запрессовывается, в результате чего формируется модуль высотой 1 мм.

Экспериментальные результаты подтвердили, что данный проект аттенюатора обеспечивает заданную полосу частот, рабочее напряжение и характеристики линейности. Тестирование модуля аттенюатора, управляемого напряжением, было проведено в пределах частотного рабочего диапазона для систем кабельного и спутникового телевидения как целевых приложений. Тестовая плата аттенюатора (см. рис. 5) содержит 50-Ом микрополосковые линии (передающие линии 1 и 2, TL1 и TL2), изготовленные на ламинате RO4350. Линии TL1 и TL2, которые подсоединяются соответственно к входному и выходному выводам тестируемой платы, имеют длину примерно 10,6 мм каждая. Эти микрополосковые линии

на краях печатной платы можно подсоединить к коаксиальным кабелям с помощью SMA-разъемов J1 и J2 (типа 142-0701-851 производства компании Johnson Components).

Измерение частотной характеристики и диапазона ослабления аттенюатора было выполнено путем подсоединения тестовой платы к микроволновому векторному анализатору цепей (см. рис. 6). Напряжение  $V_c$  изменялось в диапазоне 0,5...5 В, что обеспечило разное ослабление в зависимости от частоты (см. рис. 7). Как видно из рисунка, характеристика имеет чрезвычайно пологий вид: амплитуда меняется меньше, чем на 3 дБ при изменении частоты в диапазоне 0,1...6 ГГц для напряжений  $V_c \geq 1,2$  В, а если диапазон измерения ограничить частотами 50...2050 МГц, что соответствует рабочему диапазону систем кабельного и спутникового телевидения, то отклонение амплитуды не превысит 1 дБ. Однако пологую характеристику не удается сохранять при более низких управляющих напряжениях (к примеру, при  $V_c \geq 1,0$  В), поскольку при таком низком напряжении последовательные диоды выключаются, и радиочастотный сигнал может стекать через паразитную емкость диодов. Поскольку реактивное сопротивление паразитной емкости обратно пропорционально частоте, кривая ослабления при  $V_c = 1,0$  В приобретает частотную зависимость и изменяется со скоростью 6 дБ на октаву. Диапазон, в котором может меняться ослабление, максимален на низкой частоте (более 55 дБ при 100 МГц) и постепенно уменьшается при увеличении частоты — до 30 дБ на частоте 6 ГГц.

На рисунке 8 показана зависимость ослабления от напряжения  $V_c$ . Как мы видим, почти нет никаких изменений ослабления при  $V_c$  меньше 1 В. Выше 1 В ослабление меняется быстро при увеличении  $V_c$ , стабилизируясь при напряжениях выше 2 В. При этом наблюдается заметное изменение примерно на 2 дБ на участке между 2 и 5 В. При  $V_c = 5$  В ослабление достигает конечной величины, равной приблизительно -4 дБ, и данное значение сравнительно стабильно на частотах 0,3...3 ГГц, что видно по перекрывающимся кривым. Поэтому пригодные для использования напряжения  $V_c$  находятся в диапазоне 1...5 В. Большая часть изменений ослабления амплитуды, сконцентрированная в диапазоне 1...2 В, является неизбежным следствием сжатия диапазона управляющего напряжения с 15 до 5 В.

Входная точка перехвата третьего порядка IP3 изменяется в зависимости от ослабления (см. рис. 9). Сопротивление последовательной и шунтирующей цепей меняется противоположным образом, т.е. при большой величине ослабления сопротивление последовательной

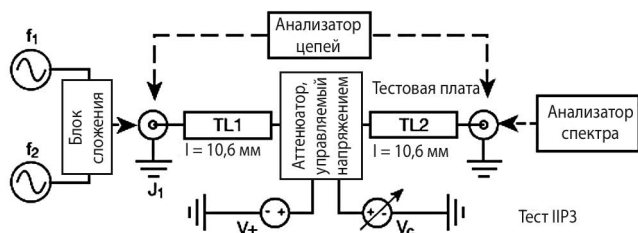


Рис. 6. Упрощенная блок-схема измерений характеристик тестовой платы

<sup>1</sup> 1 мил = одна тысячная дюйма (прим. переводчика)

цепи велико, в то время как сопротивление шунтирующих диодов мало. Поэтому меньшая величина  $IP_3$  при большом ослаблении обусловлена большей относительной частью радиочастотного тока, которая направляется в шунтирующий диод на входе, что неблагоприятно модулирует слой I диода.  $IP_3$  увеличивается при более высоких рабочих частотах (выше на частоте 1,9 ГГц, чем на частоте 900 МГц). В пределах 40-дБ диапазона ослабления  $IP_3$  выше +52 дБм. Для сравнения:  $IP_3$  П-образного аттенюатора на основе MOSFET меняется от -2 до 14 дБм в том же диапазоне ослабления, т.е. примерно на 50 дБ ниже, чем в схеме на базе PIN-диодов.

Подведем итоги. Был разработан и реализован автономный модуль П-образного аттенюатора на базе PIN-диодов. В качестве ключевых задач разработки ставилось достижение высокой линейности и низкий уровень управляющего напряжения. С использованием технологии многокристалльной сборки на плате (МСОВ) все необходимые компоненты были интегрированы на площади 3,8×3,8 мм, и тем самым был установлен новый этап в миниатюризации устройств данного класса. После запрессовки модуля было проведено тестирование, результаты которого продемонстрировали исключительно высокие радиочастотные характеристики, в частности, низкую неравномерность амплитудно-частотной характеристики, высокую линейность и увеличение  $IP_3$  по сравнению с эквивалентной схемой на базе MOSFET более, чем на 50 дБ. Ослаблением можно управлять в пределах 45 дБ в диапазоне рабочих частот для систем кабельного телевидения 50...1950 МГц и в пределах 30 дБ в диапазоне частот 5 МГц...6 ГГц. Хотя целевыми приложениями были системы кабельного и спутникового телевидения, 3-декадная полоса частот аттенюатора позволяет расширить области его применения до таких устройств как измерительные приборы и сканирующие радиоприемники.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Chin-Leong Lim. VVA Extends BW And Dynamic Range//www.mwrf.com.

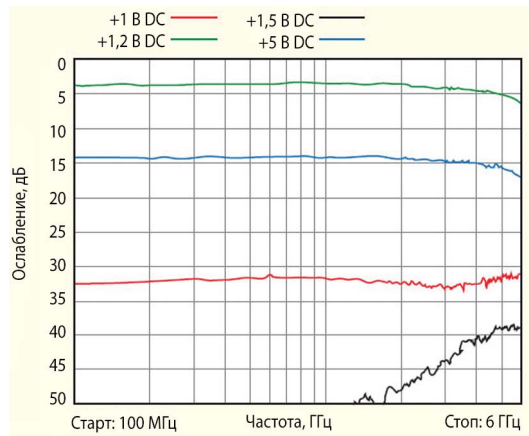


Рис. 7. Зависимость ослабления от частоты при разных значениях управляющего напряжения

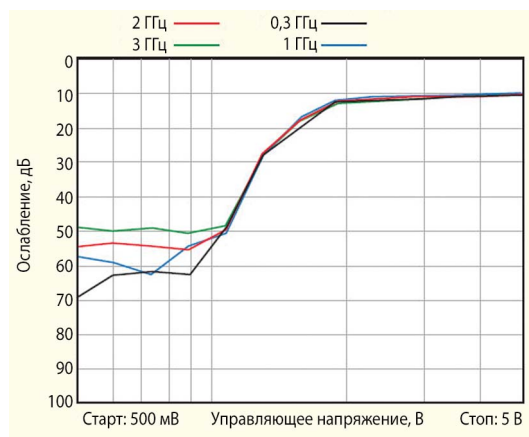


Рис. 8. Зависимость ослабления от управляющего напряжения

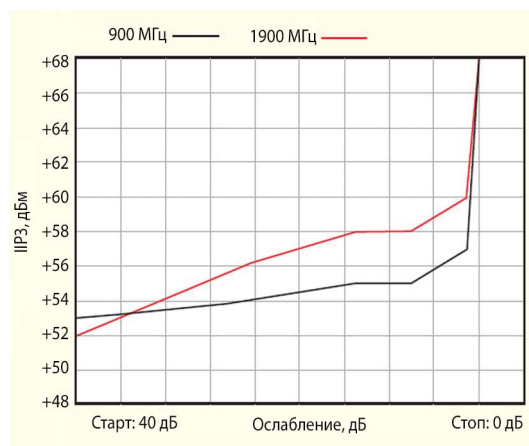



Рис. 9. Зависимость точки перехвата третьего порядка на входе  $IP_3$  от величины ослабления

# ГРАНИТ-ВТ

Электронная аппаратура для ответственных применений



- Серийное производство электронных модулей, в т.ч. с приемкой "5"
- Контрактное производство высокотехнологичной электроники, в т.ч. BGA с рентген-контролем

- Париленовое влагозащитное покрытие
- Контрактная разработка и инженерное сопровождение

**Интерактивный конструктор электронных приборов на сайте [www.granit-vt.ru](http://www.granit-vt.ru)**

ЗАО "ГРАНИТ-ВТ" т./ф.: 8 (812) 274-04-48, e-mail: mail@granit-vt.com, www.granit-vt.ru

191014, Санкт-Петербург, ул. Госпитальная 3