

## Микросхемы современных логарифмических усилителей для радиочастотных приложений

Электронные схемы подразделяют на две широкие группы: схемы, обрабатывающие и преобразующие сигналы, и схемы, предназначенные для измерения параметров сигналов. Функции обработки и преобразования часто объединяются, например, в блоке ПЧ радиоприемника, где осуществляется усиление, демодуляция, а также измерение мощности принимаемого сигнала, в результате чего вырабатывается медленно меняющееся напряжение, которое можно использовать для индикации мощности принимаемого сигнала или для систем автоматического управления усилением или/и частотой гетеродина.

Павел МИХАЛЕВ

### Введение

Схемы для измерения мощности радиочастотного сигнала обычно называют детекторами. Непосредственно величину мощности измеряют с помощью термоэлементов (боллометров). Интегральные микросхемы детекторов оперируют с выборкой измеряемого сигнала в виде напряжения. Схемы этого класса классифицируются по типу сигнала, который они преобразуют. В 1976 г. фирма Analog Devices представила первые монолитные детекторы ("true-rms") для использования на средних частотах. В настоящее время линейка таких микросхем включает в себя приборы, например AD8361, возможности которых расширились до микроволнового диапазона частот. Высокая точность определения мощности сигнала вне зависимости от его вида и формы является важным свойством таких микросхем для применения их в современных коммуникационных системах, включая системы с многостанционным доступом с кодовым разделением каналов (МДКР). В отличие от термодетекторов новые микросхемы используют аналоговое вычисление для прямой (непосредственной) реализации соответствующих уравнений на частотах гигагерцового диапазона.

Другой полезный тип радиочастотного детектора (также использующего процедуру аналогового вычисления) — это демодулирующий логарифмический усилитель (ЛУ) [1]. В соответствии с названием такие микросхемы усиливают сигнал, который принимается приборами этого класса для измерения сигналов малого уровня, и демодулируют периодический ВЧ-сигнал, вырабатывая на выходе медленно меняющийся сигнал «квазипостоянного тока». По сути дела, такой детектор выделяет огибающую ВЧ-сигнала (рис. 1).

Однако в отличие от среднеквадратических (rms) детекторов, выходной сигнал которых пропорционален среднеквадратической величине входного напряжения, логарифмические детекторы выдают выходной сигнал, пропорциональный уровню входного сигнала, выраженного в децибелах, по отношению к некоторой задаваемой величине опорного напряжения  $V_{INT}$ . Выходной сигнал, как правило, в виде напряжения, может быть интерпретирован в терминах напряжения или мощности за счет простого использования различной величины параметра масштабирования, который характеризует крутизну характеристики логарифмического детектора.

Для ВЧ логарифмических усилителей необходимо использовать напряжение как ме-

ру всех сигналов и параметра крутизны характеристики усилителей. Для определения уровня входного сигнала используют дБВ-дБ по отношению к 1 В среднеквадратичному, что предпочтительнее, чем обращаться к дБм-дБ по отношению к мощности 1 мВт. Это является точно выраженным, независимым от выбора входного импеданса определением и наилучшим образом подходит для микросхемы детектора. Например, 0 дБВ соответствует амплитуде синусоидального сигнала 2,83 В (от пика до пика); аналогичным образом величина -60 дБВ относится к синусоидальному сигналу с амплитудой от пика до пика, равной 2,83 мВ.

### Основные параметры логарифмических усилителей

Основное назначение ЛУ — это компрессия (сжатие) сигнала с широким динамическим диапазоном в его децибелный эквивалент. Вследствие этого такой усилитель может быть отнесен к категории измерительных приборов. Более того, ЛУ лучше называть логарифмическим конвертором (или преобразователем), поскольку ЛУ преобразует сигнал из одной области представления в другую через нелинейное преобразование.

Логарифмическая компрессия приводит к ситуации, которая может показаться парадоксальной. К примеру, напряжение смещения, добавленное к выходному сигналу, эквивалентно увеличению усиления входного сигнала до подачи его на вход ЛУ. В обычной ситуации, когда все переменные являются напряжениями, независимо от структуры, соотношение между переменными может быть выражено следующим образом:

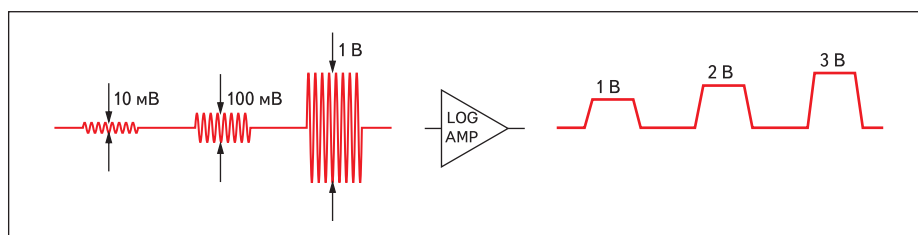


Рис. 1. Идеальная передаточная характеристика ЛУ и огибающая ВЧ-сигнала

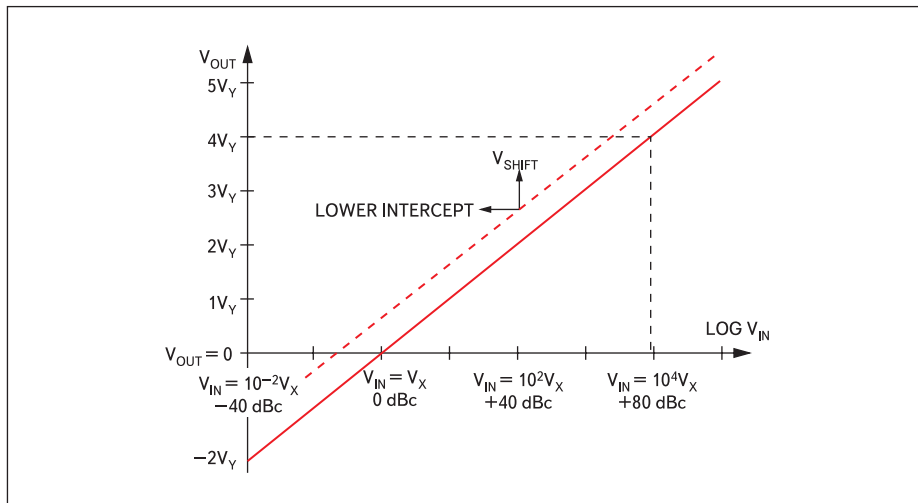


Рис. 2. Общая форма характеристики ЛУ

$$V_{OUT} = V_Y \times \log \left( \frac{V_{IN}}{V_X} \right), \quad (1)$$

где  $V_{OUT}$  — выходное напряжение;  $V_{IN}$  — входное напряжение (напряжение входного сигнала);  $V_Y$  — напряжение, определяющее крутизну характеристики ЛУ (обычно используют десятичный логарифм, вследствие чего это напряжение измеряется в В/декада);  $V_X$  — напряжение (точка) перехвата. При  $V_{IN} = V_X$   $V_{OUT} = 0$ , что собственно и поясняет смысл этого параметра.

ЛУ характеризуется двумя параметрами ( $V_Y$  и  $V_X$ ), определяющими его характеристику и, соответственно, его схему. Точность ЛУ не может быть выше, чем точность установки его параметров. На рис. 2 приведена характеристика ЛУ, построенная на основе (1).

Данный график (рис. 2) отражает соотношение вход/выход идеального ЛУ в соответствии с выражением (1). По горизонтальной оси отложено входное напряжение в логарифмическом масштабе ( $\log V_{IN}$ ), которое охватывает широкий динамический диапазон (как показано на рис. 1, свыше 120 дБ или шести декад). График передаточной функции ЛУ (сплошная прямая линия) проходит через 0 в точке  $V_{IN} = V_X$ , которая называется точкой перехвата, и остается идеальной прямой для отрицательных значений выходного напряжения при значениях  $V_{IN} < V_X$ . В идеальном случае прямая линия, описывающая  $V_{OUT}$  должна быть непрерывной и бесконечной в обоих направлениях. Штрихпунктирная линия отражает результат добавления напряжения смещения ( $V_{SH}$ ) к выходному напряжению, что приводит к уменьшению значения напряжения  $V_X$ . Точно такое же изменение  $V_X$  может быть достигнуто при увеличении усиления (или уровня входного сигнала) до ЛУ, что определяется отношением  $V_{SH}/V_Y$ .

Например, если  $V_Y = 500$  мВ/декада (25 мВ/дБ), смещение величиной +150 мВ, добавленное

к выходному напряжению, будет проявляться в уменьшении напряжения точки перехвата в 20 раз/декада или на 6 дБ. Таким образом, добавление напряжения смещения к выходному напряжению идентично увеличению уровня входного напряжения на 6 дБ.

Передаточная функция ЛУ, описываемая выражением (1), отличается от передаточной функции линейного усилителя: приращение усиления, описываемое производной

$$\frac{dV_{OUT}}{dV_{IN}},$$

строго зависит от величины изменения  $V_{IN}$ . В случае, когда основанием логарифма является число  $e$ , мы получаем следующее соотношение:

$$\frac{dV_{OUT}}{dV_{IN}} = \frac{V_Y}{V_{IN}}. \quad (2)$$

Это приращение усиления обратно пропорционально приращению величины входного напряжения. Величина этого приращения справедлива для логарифма по любому основанию. Обычно это основание выбира-

ется равным 10. Это удобно для любых целевых параметров, которые могут быть выражены в дБ.

Из этого следует, что идеальный ЛУ должен обладать бесконечным усилением в режиме усиления малых сигналов. В реальности данный вывод отражает тот факт, что, независимо от целей использования ЛУ, точность его характеристики в режиме усиления малых сигналов требует усилителя с очень высоким значением площади усиления. И как следствие, при отсутствии входного сигнала даже очень малое значение теплового шума на входе ЛУ будет вызывать на его выходе реакцию конечной величины: передаточная характеристика ЛУ отклоняется от идеальной (на рис. 2 — сплошная линия), сдвигаясь влево или вправо от точки перехвата.

### Принципы схемотехники логарифмических усилителей для радиочастотных приложений

Детекторы мощности должны обладать широким динамическим диапазоном, которого невозможно достичь на ЛУ стандартной схемотехники. В силу этого схемотехника современных ЛУ построена по принципу кусочно-линейной аппроксимации характеристики ЛУ, реализация которой обеспечивается многокаскадной структурой [1]. Упрощенная структурная схема такого ЛУ приведена на рис. 3.

Ядро схемы — каскадное соединение нескольких усилителей (в данном примере их 5). Каждый из них имеет линейный коэффициент усиления  $A$ , величина которого обычно выбирается в пределах от 10 до 20 дБ. Такой усилительный каскад называют «А/0» (А/ноль) усилителем, поскольку крутизна его амплитудной характеристики в идеальном случае равна «А» в пределах линейного интервала от 0 до  $V_{IN} = E_K$  и равна нулю за пределами этого интервала [2] (рис. 4).

Рассмотрим работу такого каскадного соединения, подав на вход первого каскада синусоидальный сигнал малой амплитуды

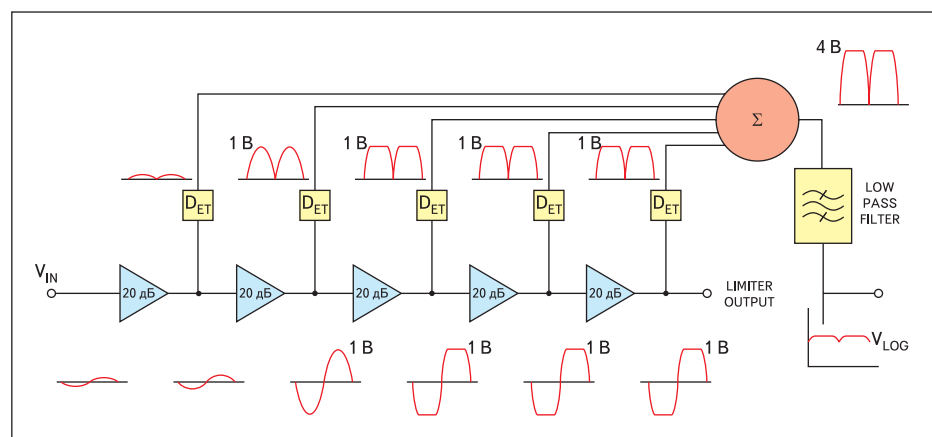


Рис. 3. Упрощенная структурная схема логарифмического усилителя

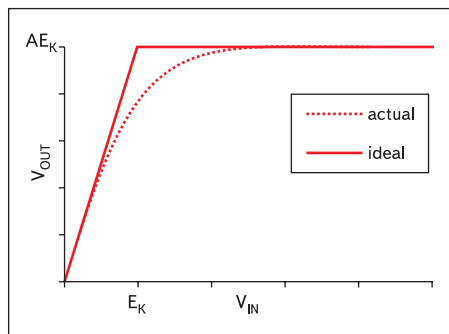


Рис. 4. Амплитудная характеристика

(Эпюры сигналов на входах и выходах каскадов приведены в нижней части рис. 3). Первый каскад усиливает сигнал на 20 дБ. При прохождении сигнала через последующие каскады добавляется по 20 дБ усиления. При увеличении амплитуды усиливаемого сигнала от каскада к каскаду на выходе какого-то из них начнет проявляться эффект насыщения, который приведет к ограничению роста амплитуды и, как следствие этого, к искажению формы усиливаемого сигнала. В данном примере, полагая верхнюю границу линейного участка амплитудной характеристики одного каскада равной 1 В, ограничение амплитуды и искажение усиливаемого сигнала проявляются на выходе третьего каскада. На выходах последующих каскадов искажения выходного сигнала лишь увеличиваются, но амплитуда искаженного сигнала остается равной 1 В.

Выходной сигнал каждого усилительного каскада подается на двухполупериодный выпрямитель, на схеме рис. 3 обозначенный как детектор (Det). Эпюры выходных напряжений этих детекторов для каждого каскада в отдельности приведены в верхней части рис. 3. Выходные напряжения всех детекторов суммируются и далее фильтруются с помощью ФНЧ для исключения ВЧ-составляющих и сглаживания пульсаций выходных сигналов детекторов. Здесь следует отметить, что вклад выходных сигналов детекторов начальных каскадов в результирующий сигнал сумматора достаточно мал по сравнению с вкладами от оконечных каскадов, и поэтому им можно пренебречь. Это приводит к выходному сигналу, который будет установившимся квазилогарифмическим сигналом постоянного тока для входного сигнала переменного тока с неизменными, установившимися параметрами.

Конкретным примером практической реализации логарифмического усилителя, реализованного по данной идеологии, может служить схема MAX4000 [3], структура которой приведена на рис. 5.

Реальные приборы содержат дополнительные элементы схемотехники, которые формируют требуемое усиление и предельные функции для обеспечения сглаженного и точного логарифмического характера между де-

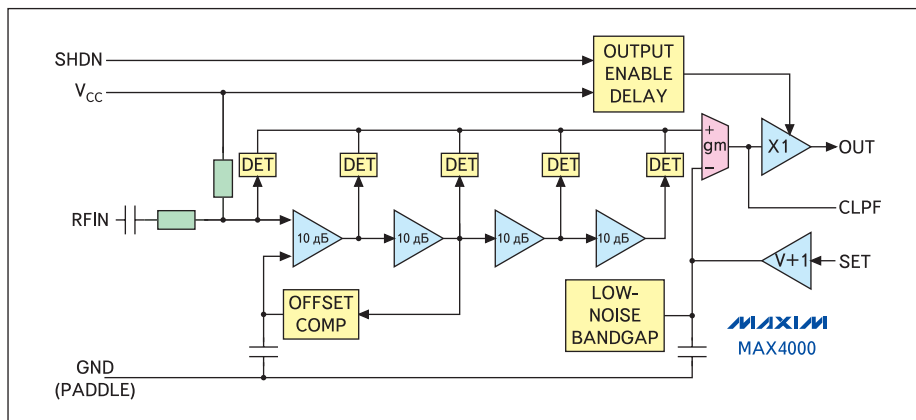


Рис. 5. Функциональная диаграмма микросхемы логарифмического усилителя MAX4000

кадными интервалами, с ограничением выходной суммы, сопоставимой с характеристикой логарифма.

Для того чтобы понять, как это преобразование сигнала приводит к логарифму огибающей входного сигнала, рассмотрим, что произойдет, если входной сигнал уменьшится на 20 дБ (в 10 раз). Как это отражено на рис. 3, выход сигнала сумматора до фильтра имеет величину 4 В (разумеется, в рамках величин рассматриваемого примера). Если входной сигнал уменьшается в 10 раз (на 20 дБ), выходной сигнал первого каскада будет иметь пренебрежимо малую величину. Вследствие этого величина результирующего выходного напряжения изменится примерно до 3 В. Если величину входного сигнала первого каскада вновь уменьшить в 10 раз (еще на 20 дБ), то на выходе сумматора сигнал будет составлять примерно 2 В. Таким образом, выходной сигнал изменяется на 1 В при каждом 10-кратном (на 20 дБ) изменении амплитуды сигнала на входе схемы. Поэтому мы можем описать логарифмический усилитель как усилитель, имеющий в данном конкретном примере крутизну характеристики, равную 50 мВ/дБ.

Крутизна характеристики и точка перегиба — это два параметра (технические

требования), характеризующие передаточную функцию логарифмического усилителя, которая определяет соотношение уровней напряжений входного и выходного сигналов.

На рис. 6 приведена передаточная функция логарифмического усилителя AD8313 на частоте 900 МГц. Данный усилитель предназначен для работы в диапазоне частот от 100 МГц до 2 ГГц с собственным динамическим диапазоном, равным 65 дБ.

На рис. 6 указаны кривые ошибок преобразования в зависимости от температуры от  $-40$  до  $+85$  °С. Можно видеть, что выходное напряжение изменяется примерно на 180 мВ на каждые 10 дБ изменения входного сигнала. Это определяет крутизну передаточной функции логарифмического усилителя величиной 18 мВ/дБ. Когда величина входного сигнала меньше  $-65$  дБм, характеристика становится пологой вблизи начала координат (на уровне 0,5 В для данного примера). Но если линейную часть характеристики передаточной функции экстраполировать до пересечения с осью абсцисс до теоретического уровня величины выходного напряжения 0 В, эта линия проходит через точку перегиба, соответствующую для данного примера значению  $-93$  дБм.

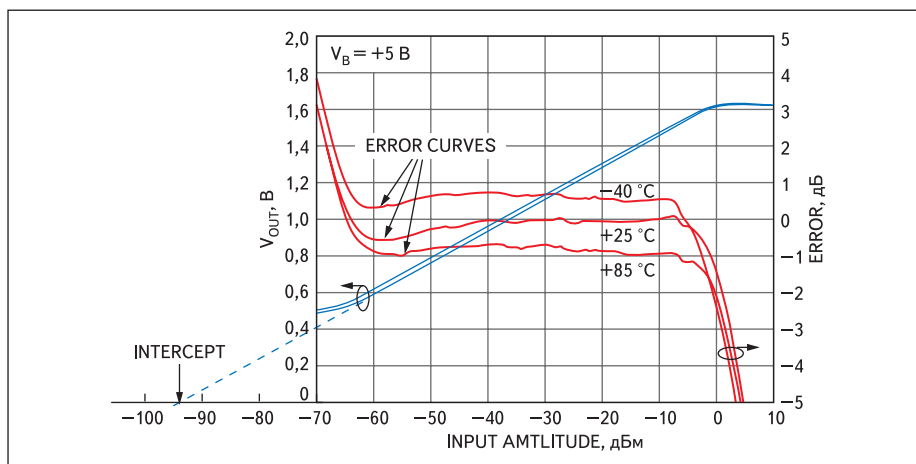


Рис. 6. Передаточная функция логарифмического усилителя AD8313

В пределах линейного участка характеристики (для данного примера это интервал от 0 до -65 дБм) номинальная величина выходного напряжения логарифмического усилителя может быть определена по простой формуле:

$$V_{OUT} = Slope \times (P_{IN} - Intercept). \quad (3)$$

Например, если входной сигнал имеет величину -40 дБм, выходное напряжение усилителя будет равно:

$$18 \text{ мВ/дБ}(-40 \text{ дБм} - (-93 \text{ дБм})) = 0,95 \text{ В}.$$

В итоге предварительного анализа схемотехнических принципов реализации логарифмического усилителя, реализованного по рассмотренной идеологии, можно сделать вывод о том, что получение большого динамического диапазона основано на кусочно-линейной аппроксимации передаточной функции логарифмического усилителя. При этом число сопрягаемых линейных участков, каждый из которых реализуется отдельным каскадом, определяет своим числом динамический диапазон, а специфические схемотехнические решения, применяемые разными фирмами, обеспечивают линеаризацию характеристики в целом и, как следствие, качество этой линеаризации, что минимизирует общую ошибку измерения выходного напряжения.

## Заключение

Логарифмические усилители современной схемотехники, ориентированные на радиочастотные приложения, позволяют в силу специфики своей структуры обеспечивать измерение мощностей передающих устройств и в оконечных узлах беспроводных линий связи с разными типами их идеологии. Кроме того, с их помощью можно осуществлять управление уровнем выходных сигналов усилителей мощности, обеспечивая тем самым наиболее оптимальный режим их работы при экономичном расходовании энергии от источника питания.

Принятая многокаскадная структура таких усилителей, в которых одна усилительная ячейка объединяется с двухполупериодным выпрямителем (детектором), и использование метода прогрессивной компрессии позволяют получить кусочно-линейную аппроксимацию передаточной функции такого усилителя в весьма широком динамическом диапазоне. Это позволяет измерять мощность в очень широких пределах (до 100 дБ), что крайне актуально при реализации уверенной и устойчивой связи, например, в сотовой телефонии и других беспроводных системах беспроводной передачи информации в диапазоне рабочих частот, достигающем до 10 ГГц и выше. В известной степени данная направленность при-

менения таких приборов и была стимулятором их разработки и широкого производства.

Номенклатура таких микросхем, выпускаемых фирмой Analog Devices, которую можно с уверенностью считать пионером в данной области, достаточно велика. Это дает возможность в зависимости от специфики решаемой задачи использовать наиболее оптимальные по параметрам и характеристикам микросхемы и тем самым обеспечивать высокое качество и экономичность проектируемого устройства.

В первой части данной статьи рассмотрены базовые принципы функционирования логарифмических усилителей нового поколения, ориентированные на радиочастотные приложения. Во второй части будет предложен краткий обзор микросхем, выпускаемых фирмой Analog Devices. ■

## Литература

1. Nash E. Logarithmic Amplifier Explained. Analog Dialogue, 33-3, 1999.
2. Simoneau J. B. Multitone Feedback Through Demodulating Log Detector for Detection of Spurious Emissions in Software Radio. IEEE Transactions on Circuits and Systems. Vol. 54, No. 10, October 2007.
3. MAX4000 — 2.5 GHz 45 dB RF-Detecting Controllers. [www.max-ic.com](http://www.max-ic.com)