

Чувствительность микрофона — что это значит?

Чувствительность, определяемая как отношение выходного аналогового напряжения или цифрового кода к входному давлению, — это ключевая характеристика любого микрофона. Преобразование единиц в акустической области в единицы в электрической определяет уровень выходного сигнала микрофона.

В статье обсуждается различие в определениях чувствительности цифровых и аналоговых микрофонов, рассматривается вопрос выбора микрофона с наиболее подходящей для конкретной задачи чувствительностью, а также поясняется, почему добавление одного или нескольких битов цифрового усиления способно улучшить сигнал.

Джерард ЛЬЮИС (Jerad LEWIS)
jerad.lewis@analog.com

Аналоговые и цифровые микрофоны

Чувствительность микрофона обычно измеряется путем подачи синусоидального сигнала с частотой 1 кГц и уровнем звукового давления (Sound Pressure Level, SPL) 94 дБ, что соответствует давлению 1 Па. Уровень аналогового или цифрового выходного сигнала микрофона при таком входном воздействии является мерой его чувствительности. Это значение, хоть и является одной из характеристик микрофона, ни в коей мере не дает полного представления о его качестве.

Чувствительность аналогового микрофона является интуитивно понятным показателем. Она обычно измеряется в логарифмических единицах дБ·В (децибел по отношению к 1 В) и говорит о том, каким будет выходное напряжение в вольтах при заданном уровне звукового давления. Для перевода чувствительности аналогового микрофона из линейных единиц (мВ/Па) в логарифмические единицы (дБ) можно воспользоваться следующим выражением:

$$\text{Чувствительность}_{\text{дБ·В}} = 20 \times \log_{10} \left(\frac{\text{Чувствительность}_{\text{мВ/Па}}}{\text{Выход}_{\text{AREF}}} \right),$$

где $\text{Выход}_{\text{AREF}}$ — это эталонный уровень чувствительности, равный 1000 мВ/Па.

На основании этой информации можно легко подобрать подходящий коэффициент усиления предварительного усилителя для согласования уровня выходного сигнала микрофона с желаемым уровнем входного сигнала остальной части схемы или системы. Рис. 1 иллюстрирует согласование пикового выходного напряжения микрофона (V_{MAX}) с входным напряжением полной шкалы АЦП (V_{IN}) при помощи усилителя с коэф-

фициентом усиления $V_{\text{IN}}/V_{\text{MAX}}$. Так, например, для согласования выходного напряжения микрофона ADMP504, которое имеет максимальный уровень 0,25 В, с АЦП, имеющим пиковое значение входного напряжения полной шкалы, равное 1 В, потребуется коэффициент усиления, равный 4 (12 дБ).

Чувствительность цифровых микрофонов, выражаемая в дБ по отношению к полной шкале (дБ FS), не столь интуитивно понятна. Различие в единицах измерения указывает на тонкий контраст в определениях чувствительности для аналоговых и цифровых микрофонов. В случае аналогового микрофона с выходным сигналом в виде напряжения единственным фактором, ограничивающим уровень выходного сигнала, является практическое ограничение напряжений питания системы. Хотя в большинстве случаев это нецелесообразно по практическим соображениям, никаких физических причин, по которым аналоговый микрофон не мог бы обладать чувствительностью 20 дБ·В (выходное напряжение 10 В при эталонном уровне входного сигнала), нет. Данное значение чувствительности допустимо при условии, что усилители, преобразователи и иные схемы способны поддерживать требуемые уровни сигнала.

В случае с чувствительностью цифрового микрофона разработчик имеет меньшую свободу, поскольку она зависит от единственного параметра проекта — максимального акустического входного сигнала. Когда максимальный уровень входного акустического сигнала микрофона отображается в значении полной шкалы цифрового кода (единственно разумный вариант отображения), чувствительность всегда должна быть равна разности между данным уровнем акустического сигнала и эталонным уровнем звукового давления (94 дБ). Таким образом, если максимальный уровень звукового давления микрофона равен 120 дБ, чувствительность микрофона будет равна -26 дБ FS (94–120 дБ). Изменить проект так, чтобы цифровой выходной сигнал при заданном уровне входного акустического сигнала был выше, невозможно без уменьшения максимального входного акустического сигнала на ту же величину.

Чувствительность цифровых микрофонов измеряется в процентах от выходного сигнала полной шкалы, соответствующего входному сигналу с уровнем звукового давления 94 дБ. Уравнение, позволяющее преобразовать чувствительность цифрового микрофона из линейных единиц в логарифмические, выглядит следующим образом:

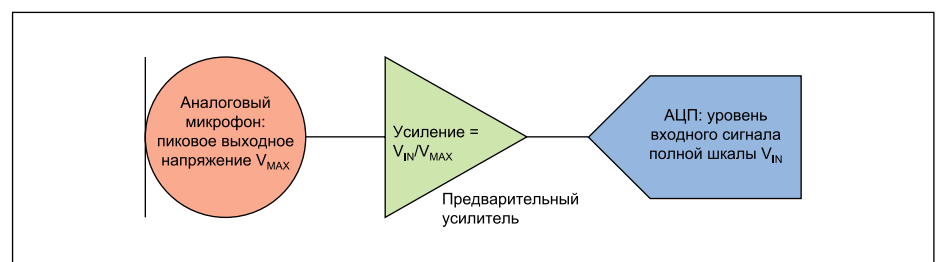


Рис. 1. Согласование выходного сигнала аналогового микрофона с входным уровнем АЦП при помощи предварительного усилителя

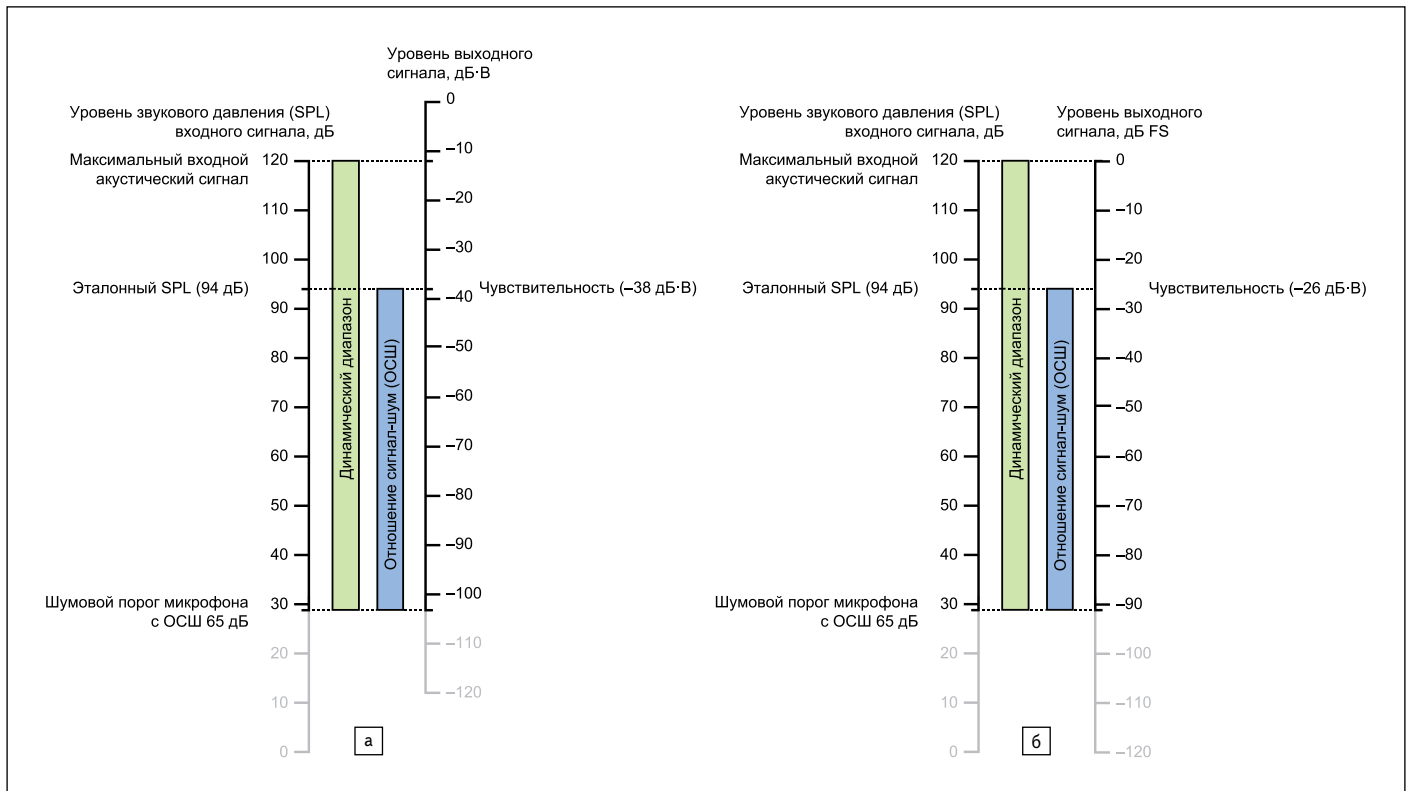


Рис. 2. Отображение входного акустического сигнала: а) уровень выходного напряжения аналогового микрофона; б) уровень цифрового выходного сигнала цифрового микрофона

$$\text{Чувствительность}_{\text{дБ FS}} = 20 \times \log_{10} \left(\frac{\text{Чувствительность}_{\% \text{ FS}}}{\text{Выход}_{\text{DREF}}} \right),$$

где $\text{Выход}_{\text{DREF}}$ — это уровень полной шкалы выходного цифрового сигнала.

И, наконец, еще один часто вводящий в заблуждение вопрос при сравнении аналоговых и цифровых микрофонов связан с применением пиковых и среднеквадратических значений. Акустические уровни входного сигнала микрофона, указываемые в дБ, — это всегда среднеквадратические значения, независимо от типа микрофона. В качестве эталонного уровня для выходного сигнала аналоговых микрофонов используется среднеквадратическое напряжение 1 В. Это вызвано тем, что для сравнения уровней аналоговых звуковых сигналов наиболее часто применяются среднеквадратические значения. В свою очередь, чувствительность и уровень выходного сигнала цифровых микрофонов указываются через пиковые значения, поскольку они привязаны к цифровому коду полной шкалы, также являющемуся пиковым значением. Тот факт, что для указания выходного сигнала цифровых микрофонов используются пиковые значения, как правило, необходимо учитывать при разработке последующих алгоритмов обработки, в которых может потребоваться знание точных уровней сигналов. Так, например, в алгоритмах преобразования динамического диапазона (компрессорах, ограничителях и пороговых шумоподавителях) пороги обыч-

но выставляются по среднеквадратическим уровням, поэтому при обработке выходного сигнала цифрового микрофона необходимо перейти от пиковых к среднеквадратическим значениям, вычтя соответствующую величину. Для синусоидального входного сигнала среднеквадратическое значение на 3 дБ ниже пикового, в то время как для сигналов более сложной формы это соотношение может быть иным. Рассмотрим в качестве примера микрофон МЭМС ADMP421, имеющий цифровой выход в формате с модуляцией плотности потока импульсов (pulse-density-modulated, PDM), чувствительность которого составляет -26 дБ FS. При синусоидальном входном сигнале с уровнем звукового давления 94 дБ пиковый выходной уровень будет равен -26 дБ FS, а среднеквадратический — -29 дБ FS.

Поскольку выходные сигналы цифровых и аналоговых микрофонов имеют разные единицы измерения, непосредственное сравнение этих двух типов микрофонов затруднено. В то же время в акустической области они работают с одной и той же единицей измерения — уровнем звукового давления. Независимо от формата выходного сигнала микрофона (аналоговое напряжение, цифровой сигнал в формате PDM или цифровой сигнал в формате I²S) максимальный входной акустический сигнал и отношение сигнал-шум (разница между эталонным уровнем звукового давления 94 дБ и уровнем шума) можно сравнивать напрямую. Рис. 2 иллюстрирует взаимосвязь между

акустическим входным сигналом и уровнями выходного сигнала аналогового и цифрового микрофонов при заданном значении чувствительности. Рис. 2а соответствует аналоговому микрофону ADMP504, который обладает чувствительностью -38 дБ·В и отношением сигнал-шум 65 дБ. Изменение его чувствительности относительно эталонного уровня звукового давления (94 дБ), указанного слева, означает перемещение шкалы выходного сигнала в дБ·В вверх (повышение чувствительности) или вниз (уменьшение чувствительности).

Рис. 2б соответствует цифровому микрофону ADMP521, который обладает чувствительностью -26 дБ FS и отношением сигнал-шум 65 дБ. Приведенный пример отображения уровней показывает, что чувствительность цифрового микрофона невозможно подстроить, не нарушив соотношения между максимальным уровнем входного акустического сигнала и значением полной шкалы цифрового кода. Такие характеристики, как отношение сигнал-шум, динамический диапазон, ослабление пульсаций напряжения питания и полный уровень гармонических искажений (THD), лучше отражают качество микрофона, чем чувствительность.

Выбор чувствительности и коэффициента усиления

Микрофон с высокой чувствительностью не всегда лучше микрофона с низкой чувствительностью. Чувствительность дает

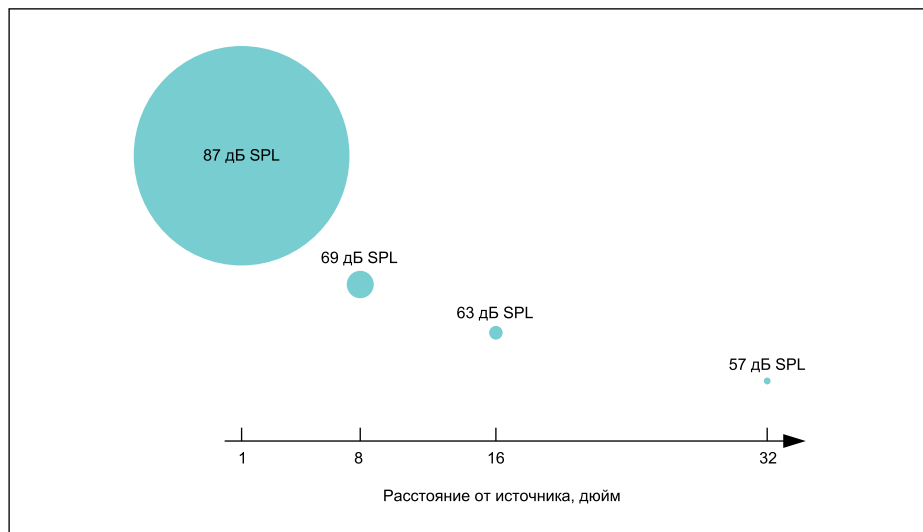


Рис. 3. Уменьшение уровня звукового давления на входе микрофона по мере увеличения расстояния от источника

определенную информацию о характеристиках микрофона, но не о его качестве. То, насколько хорошо отдельно взятый микрофон подходит для конкретной задачи, определяется соотношением уровня шума микрофона, точки ограничения, уровня искажений и чувствительности. Для микрофона с высокой чувствительностью может потребоваться меньший коэффициент усиления в предварительном усилителе, однако в то же время он может иметь меньший запас относительно точки ограничения по сравнению с микрофоном, обладающим меньшей чувствительностью.

В задачах приема сигнала в ближней зоне, например в сотовых телефонах, где микрофон находится близко к источнику сигнала, более вероятно, что микрофон с большей чувствительностью достигнет максимального уровня входного акустического сигнала, попадет в ограничение и будет давать искажения. С другой стороны, большее значение чувствительности может быть предпочтительнее для приема сигнала в дальней зоне, например в телефонах с громкой связью и видеокамерах охранных систем, где уровень звукового сигнала ослабевает по мере увеличения расстояния от источника до микрофона. Рис. 3 иллюстрирует влияние расстояния от источника звука до микрофона на уровень звукового давления. При каждом удвоении расстояния от источника акустического сигнала его уровень уменьшается на 6 дБ (вдвое).

Для примера на рис. 4 показаны типичные значения уровней звукового давления для различных источников звука — от тихой записи в студии (менее 10 дБ) до уровня болевого порога (более 130 дБ, уровень звука, вызывающий болевые ощущения у среднестатистического человека). Микрофоны редко способны перекрыть весь этот диапазон или большую его часть, поэтому на этапе проектирования важно выбрать подходящий

микрофон с учетом требуемого диапазона уровней звукового давления. Для согласования уровня выходного сигнала микрофона в представляющем интерес динамическом диапазоне с типичным рабочим диапазоном тракта обработки звуковых частот следует использовать информацию, которую дает значение чувствительности.

Аналоговые микрофоны имеют широкий диапазон возможных значений чувствительности. Некоторые динамические микрофоны могут иметь чувствительность на уровне всего -70 дБ·В. Некоторые конденсаторные микрофонные модули содержат интегрированные предварительные усилители и поэтому обладают очень высокой чувствительностью вплоть до -18 дБм. Большинство аналоговых электретных микрофонов и микрофонов на основе технологии МЭМС обладают чувствительностью в диапазоне от -46 до -35 дБ·В (5 – $17,8$ мВ/Па). Этот уровень является разумным компромиссом между шумовым порогом, которому в микрофонах МЭМС ADMP504 и ADMP521, например, соответствует уровень звукового давления всего 29 дБ, и максимальным входным акустическим сигналом (типичный уровень звукового давления около 120 дБ). Чувствительность аналогового микрофона можно отрегулировать в цепи предварительного усилителя, который зачастую интегрируется в один корпус с преобразовательным элементом.

Несмотря на очевидное отсутствие гибкости в выборе чувствительности цифрового микрофона, уровень его выходного сигнала легко может быть отрегулирован при помощи цифрового усиления в цифровом процессоре. Если процессор имеет достаточную разрядность для представления всего динамического диапазона исходного сигнала микрофона, цифровое усиление не приведет к ухудшению шумового уровня сигнала. В аналоговой схеме каждый усилительный

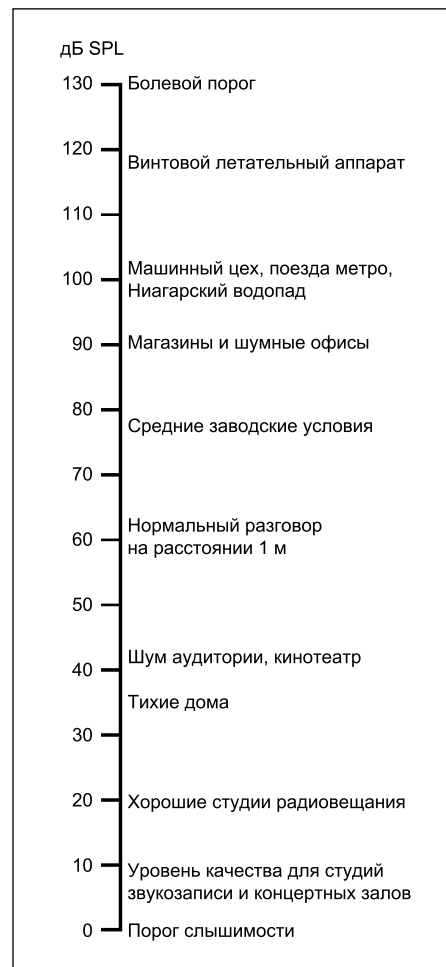


Рис. 4. Уровень звукового давления для различных источников

каскад будет вносить некоторый дополнительный шум в сигнал, и разработчик системы должен гарантировать, что шум, вносимый каскадами, не приведет к ухудшению качества звукового сигнала. В качестве примера рассмотрим микрофон ADMP441 с цифровым выходом в формате I²S, который обладает максимальным уровнем звукового давления 120 дБ (чувствительность -26 дБ FS) и эквивалентным входным шумом, соответствующим уровню звукового давления 33 дБ (отношение сигнал-шум 61 дБ). Динамический диапазон микрофона равен разности между наибольшим (максимальный уровень звукового давления) и наименьшим (шумовой порог) уровнями сигнала, которые он способен достоверно воспроизводить. Для ADMP441 он равен $120 - 33 = 87$ дБ и может быть представлен 15-разрядным цифровым словом. Сдвиг данных в цифровом слове на 1 бит приводит к изменению уровня сигнала на 6 дБ, поэтому даже 16-разрядный процессор с динамическим диапазоном 98 дБ допускает в данном случае усиление или ослабление на 11 дБ без ухудшения исходного динамического диапазона. Обратите внимание на то, что во многих процессорах максимальный входной

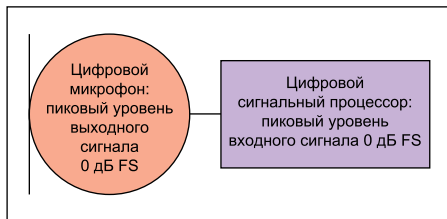


Рис. 5. Сигнальный тракт с непосредственным подключением цифрового микрофона к цифровому сигнальному процессору

акустический сигнал цифрового микрофона отображается в уровень полной шкалы внутреннего формата данных процессора. При таком отображении добавление любого усиления уменьшает динамический диапазон на соответствующую величину и снижает точку ограничения системы. Так, при работе с ADMP441 добавление усиления 4 дБ в процессоре приведет к ограничению сигнала в системе при подаче сигнала с уровнем звукового давления 116 дБ, если запас между уровнем полной шкалы сигнала и полной шкалой формата данных отсутствует.

На рис. 5 изображен цифровой микрофон с выходом I²S или PDM, подключенный непосредственно к цифровому сигнальному процессору. В данной конфигурации применение промежуточного каскада усиления не требуется, поскольку пиковый уро-

вень выходного сигнала микрофона уже соответствует полной шкале формата входного слова процессора.

Заключение

В статье даны пояснения, что такое чувствительность микрофона, как учитывать ее при проектировании каскадов усиления и почему, несмотря на связь между чувствительностью и отношением сигнал-шум, первый параметр не является показателем качества микрофона в отличие от второго. Независимо от типа используемого микрофона приведенная информация позволит разработчику подобрать наиболее подходящее для решения конкретной задачи устройство и добиться максимальных показателей от выбранного продукта. ■

Литература

1. Designing with MEMS Microphones. http://ez.analog.com/community/ask_the_expert/archived/mems-microphones
2. Lewis J. AN-1112 Application Note. Microphone Specifications Explained. Analog Devices. 2011.
3. MEMS Microphones. <http://www.analog.com/en/audio-video-products/mems-microphones/products/index.html>
4. Eargle J. The Microphone Book // Elsevier/Focal Press. 2004.