

UDC 651:681.322

Audio Signal Quantization Companding Laws Comparative Analysis

Aleksei A. Matskaniuk

Sochi State University, Russia
354000, Sochi, Sovietskaya st., 26a
PhD, Associate professor
E-mail: alexmatsk@gmail.com

Abstract. We describe the results of research on the effectiveness of the optimal in the sense of minimum error variance quantization scale audio playback (Lloyd-Max algorithm), and scales based on the A and Mu-law companding.

Keywords: quantization level audio signals; the optimal quantization; companding law; A and Mu-Law.

Известен метод сжатия аналоговых сигналов путем использования неравномерной шкалы квантования по уровню. Если при этом задаться целью минимизировать дисперсию шума квантования, то получается оптимальная шкала квантования, описываемая, например, в [1, глава 6]. Дисперсия шума квантования минимизируется путем подбора положения границ шагов квантования при фиксации их количества и диапазона покрываемых шкалой значений квантуемого сигнала. Оптимальное квантование можно реализовать, например, при помощи алгоритма Ллойда-Макса [2, стр. 259].

В процессе сжатия сигнала иногда используют комбинацию нелинейного преобразователя (компрессора) исходного сигнала x во вспомогательный сигнал $y(x)$ и квантователя сигнала y с использованием обычной равномерной (с постоянным шагом квантования) шкалой квантования. В качестве такого квантователя используют стандартный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Для восстановления исходного сигнала в этом случае используется стандартный (с постоянным шагом) цифро-аналоговый преобразователь и экспандер, осуществляющий обратное преобразование $x(y)$. Известно (см. [3], [1] и др.), что функция $y(x)$, называемая «законом компандирования» [4], зависит от функции плотности вероятности $f(x)$ квантуемого сигнала x (1):

$$y(x) = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{S} \int_{x_{\min}}^x \sqrt{f(x)} dx + x_{\min}, \quad (1)$$

где $S = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \sqrt{f(x)} dx$ - функционал плотности распределения вероятности $f(x)$ квантуемого сигнала x .

Достижимая при использовании закона компандирования (1) минимальная дисперсия $D_{\varepsilon \min}$ ошибки ε описывается формулой (2):

$$D_{\varepsilon \min} = \frac{S^2}{12n^2}, \quad (2)$$

где n – количество шагов квантования.

Дисперсия $D_{\varepsilon \text{ равн}}$ ошибки ε при использовании равномерной шкалы от функции $f(x)$ плотности распределения вероятности квантуемого сигнала x не зависит и описывается формулой (3):

$$D_{\varepsilon \text{ равн}} = \frac{\delta^2}{12}, \quad (3)$$

где δ – размер шага квантования по уровню.

Дисперсия D_{ε} ошибки ε квантования для произвольной шкалы квантования находится по формуле (4):

$$D_{\varepsilon} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n \delta_i^2 P_i \quad (4)$$

где δ_i – размер i -го шага квантования по уровню;

P_i – вероятность попадания значения квантуемого сигнала в пределы i -го шага.

Практическое использование закона компандирования (1) требует проведения достаточно сложных вычислений и потому затруднительно. Телекоммуникационными

стандартами для передачи телефонных разговоров в качестве законов компандирования предусмотрено применение А и μ -законов, которые описываются формулами (4) и (5) [5]:

$$y_A = \begin{cases} x \frac{A}{1+\ln A} & |x| \leq \frac{1}{A} \\ \frac{\text{sign}(x)}{1+\ln A} (1 + \ln A + \ln |x|) & \frac{1}{A} \leq |x| \leq 1 \end{cases}, \text{ где } A=87,6 \quad ; \quad (4)$$

$$y_\mu = \frac{\text{sign}(x)}{\ln(1+\mu)} \ln(1 + \mu |x|), \text{ где } \mu=100 \text{ или } 255. \quad (5)$$

Здесь $-1 \leq x \leq 1$ – нормированный аргумент x .

А-закон используется в Европе, а μ -закон – в Северной Америке и Японии.

Представляет интерес оценка влияния на дисперсию ошибки вида квантуемого аудиосигнала и некоторых параметров шкалы – закона компандирования, размера и количества шагов квантования и диапазона квантуемых значений.

С этой целью был проведен численный эксперимент, в ходе которого в качестве квантуемых сигналов были взяты 6 аудиозаписей – 4 речевых записей с одной из интернет-радиостанций общей длительностью 126 мин. и 2 музыкальные композиции (песни Mylene Farmer и Whitney Houston) общей длительностью 22 мин. Параметры этих записей представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры исходных аудиофайлов

| Тип | Имя файла | Длительность (мин:сек) | Точность (бит) | Частота дискретизации | Количество. отсчетов |
|--------|-----------------|------------------------|----------------|-----------------------|----------------------|
| Речь | 0 | 2:23 | 16 mono | 44,1 кГц | 6 310 807 |
| | 1 | 33:12 | | | 85 670 935 |
| | 2 | 47:30 | | | 125 508 887 |
| | 3 | 43:42 | | | 115 508 887 |
| Музыка | Mylene Farmer | 12:45 | 16 stereo | | 68 218 905 |
| | Whitney Houston | 8:44 | | | 46 345 505 |

Все исходные аудиофайлы при помощи программы Wavosaur (www.wavosaur.com) были преобразованы в файлы формата *raw binary* и обработаны VB-программой (VB – Visual Basic 6) с целью извлечения отсчетов и подсчета частот появления каждого из возможных значений отсчетов байтовыми числами, т.е. числами в интервале от 0 до $2^{16}-1=65535$. На выходе эта программа выдавала текстовый файл с 65536 числами - частотами появления каждого из 65536 возможных значений отсчетов в исходном аудиофайле.

Далее эти текстовые файлы импортировались в среду Excel 2010. Частоты отсчетов использовались для вычисления оценки плотности распределения вероятностей соответствующей аудиозаписи и вычисления на ее основе по формулам (2-7) дисперсий ошибок воспроизведения исходного аудиопроцесса, которые образовывались в результате их квантования по уровню с применением различных законов компандирования (1), (4), (5).

В формулах (4) и (5) используется нормированный аргумент x ($-1 \leq x \leq 1$) и получают соответствующие нормированные значения А и μ законов компандирования y_A и y_μ . В реальности же значения исходного аудиопроцесса x_r в данной работе менялись в пределах от 0 до 65535. Помимо этого, для настройки законов компандирования были введены «уровни отсекаания» редких малых и больших значений отсчетов. По ним находился интервал (x_{min}, x_{max}), в пределах которого и строилась шкала квантования.

Поэтому для использования формул (4) и (5) пришлось перейти от реального аргумента x_r , принимающего значения от x_{min} до x_{max} , к нормированному x (6), а затем пересчитать y_A и y_μ в реальный y_r (7):

$$X = 2 * \frac{x_r - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} - 1 \quad (6)$$

$$Y_r = \frac{(y_\mu \text{ или } y_A) + 1}{2} (x_{max} - x_{min}) + x_{min} \quad (7)$$

Кроме того, параметр μ в μ -законе в данной работе был принят равным 100, так как дисперсия ошибки в этом случае получается меньше, чем в случае, если принять $\mu=255$.

Результаты проведенного численного эксперимента представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Результаты расчетов оценок дисперсии ошибок воспроизведения аудиосигналов

| Файл | | Количество отсчетов | Уровни отсекания отсчетов (%) | | Размер шага равн. шкалы | Кол. шагов | Дисперсия ошибки | | | | | | | | |
|--------------------|-----------------|---------------------|-------------------------------|-------|-------------------------|------------|-------------------|-------------|--------------------|-------------------|--------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|
| | | | | | | | Оптимальная шкала | | | Равномерная шкала | | U-закон | | A-закон | |
| | | | | | | | Теория | Эксперимент | Откл. от опт.теор. | Абс. знач. | Откл. от опт.теор. | Абс. знач. | Откл. от опт.теор. | Абс. знач. | Откл. от опт.теор. |
| Голос | 0 | 6 310 807 | 0,50 | 99,50 | 100 | 367 | 557,10 | 562,49 | 0,97% | 833,33 | 49,58% | 1973,27 | 254,20% | 3505,50 | 529,24% |
| | | | 5,00 | 95,00 | 100 | 207 | 708,49 | 713,81 | 0,75% | | | 2546,54 | 259,43% | 4552,57 | 542,57% |
| | | | 0,50 | 99,50 | 10 | 3662 | 5,60 | 5,56 | -0,71% | | | 19,33 | 245,18% | 34,31 | 512,68% |
| | | | 5,00 | 95,00 | 10 | 2057 | 7,15 | 6,00 | -16,08% | | | 19,20 | 168,53% | 34,24 | 378,88% |
| | 1 | 85 670 935 | 0,50 | 99,50 | 100 | 115 | 509,35 | 513,10 | 0,74% | 833,33 | 63,61% | 1279,42 | 151,19% | 2237,22 | 339,23% |
| | | | 5,00 | 95,00 | 100 | 62 | 639,55 | 629,06 | -1,64% | | | 1713,58 | 167,94% | 2978,34 | 365,69% |
| | | | 0,50 | 99,50 | 10 | 1137 | 5,17 | 5,21 | 0,77% | | | 13,05 | 152,42% | 22,93 | 343,52% |
| | | | 5,00 | 95,00 | 10 | 615 | 6,58 | 6,04 | -8,21% | | | 16,27 | 147,26% | 28,68 | 335,87% |
| | 2 | 125 785 879 | 0,50 | 99,50 | 100 | 126 | 491,12 | 483,23 | -1,61% | 833,33 | 69,68% | 1194,20 | 143,16% | 2088,10 | 325,17% |
| | | | 5,00 | 95,00 | 100 | 677 | 6,23 | 6,25 | 0,32% | | | 18,75 | 200,96% | 33,73 | 441,41% |
| | | | 0,50 | 99,50 | 10 | 1248 | 4,98 | 5,03 | 1,00% | | | 12,60 | 153,01% | 22,13 | 344,38% |
| | | | 5,00 | 95,00 | 10 | 69 | 606,85 | 621,60 | 2,43% | | | 1841,98 | 203,53% | 3261,42 | 437,43% |
| | 3 | 115 508 887 | 0,50 | 99,50 | 100 | 178 | 445,64 | 450,01 | 0,98% | 833,33 | 87,00% | 1200,91 | 169,48% | 2090,99 | 369,21% |
| | | | 5,00 | 95,00 | 100 | 80 | 649,44 | 614,68 | -5,35% | | | 1644,32 | 153,19% | 2890,41 | 345,06% |
| | | | 0,50 | 99,50 | 10 | 1725 | 4,50 | 4,46 | -0,89% | | | 11,73 | 160,67% | 20,39 | 353,11% |
| | | | 5,00 | 95,00 | 10 | 791 | 6,64 | 6,54 | -1,51% | | | 19,53 | 194,13% | 35,17 | 429,67% |
| Музыка | Mylene Farmer | 68 218 905 | 0,50 | 99,50 | 100 | 283 | 446,65 | 567,46 | 27,05% | 833,33 | 86,57% | 1330,32 | 197,84% | 2337,04 | 423,24% |
| | | | 5,00 | 95,00 | 100 | 155 | 547,46 | 727,90 | 32,96% | | | 2289,79 | 318,26% | 4062,11 | 641,99% |
| | | | 0,50 | 99,50 | 10 | 2819 | 4,50 | 5,54 | 23,11% | | | 12,70 | 182,22% | 22,28 | 395,11% |
| | | | 5,00 | 95,00 | 10 | 1541 | 5,54 | 7,49 | 35,20% | | | 24,59 | 343,86% | 44,23 | 698,38% |
| | Whitney Houston | 46 356 505 | 0,50 | 99,50 | 100 | 240 | 531,79 | 532,78 | 0,19% | 833,33 | 56,70% | 1235,04 | 132,24% | 2162,15 | 306,58% |
| | | | 5,00 | 95,00 | 100 | 128 | 698,93 | 683,81 | -2,16% | | | 2037,83 | 191,56% | 3596,37 | 414,55% |
| | | | 0,50 | 99,50 | 10 | 2390 | 5,36 | 5,50 | 2,61% | | | 12,81 | 138,99% | 22,46 | 319,03% |
| | | | 5,00 | 95,00 | 10 | 1274 | 7,09 | 6,74 | -4,94% | | | 19,62 | 176,73% | 35,29 | 397,74% |
| Средние значения = | | | | | | | 3,58% | | 68,86% | | 191,92% | | 416,24% | | |

По данным, представленным в таблице 2, можно сделать следующим выводы:

1. Применение оптимальной шкалы с законом компандирования (1) дает в среднем приблизительно 70 % уменьшение дисперсии ошибки по сравнению с простейшей равномерной шкалой.

2. Использование A и μ -законов компандирования наоборот приводит к увеличению дисперсии ошибки приблизительно в 2–4 раза.

3. Изменение уровней отсекания редких больших и малых отсчетов, размера и количества шагов квантования, а также типа аудиофайла незначительно сказываются на дисперсии ошибки квантования.

4. Можно предположить, что целью введения A и μ -законов компандирования в практику передачи телефонного трафика была не максимальная точность (в смысле минимума дисперсии ошибки воспроизведения исходного сигнала) воспроизведения исходного сигнала, а максимальное сжатие аудиоданных с широким диапазоном параметров при сохранении удовлетворительной разборчивости передаваемой речи.

Примечания:

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. Кн. 1. 312 с., илл.

2. Кудряшов Б.Д. Теория информации: уч. для вузов. СПб.: Питер, 2009. 320 с.

3. Мацканюк А.А. Оптимизация квантования непрерывных сигналов по уровню. Годичные научные чтения РГСУ. Материалы научной конференции 29 января 2011. Сочи: изд-во СТЕРХ, 2011. 253 с., С. 197-204.

4. Компандирование [Электронный ресурс] ru.wikipedia.org/wiki/Компандирование (дата обращения 08.03.12)

5. G.711 [Электронный ресурс] ru.wikipedia.org/wiki/G.711 (дата обращения 08.03.12)

УДК 651:681.322

**Сравнительный анализ законов компандирования
для оптимизации квантования аудиосигналов**

Алексей Алексеевич Мацканюк

Сочинский государственный университет, Россия
354000, г. Сочи, ул. Советская, 26а
кандидат технических наук, доцент
E-mail: alexmatsk@gmail.com

Аннотация. В статье описываются результаты исследования эффективности применения оптимальной в смысле минимума дисперсии ошибки воспроизведения шкалы квантования аудиосигналов (алгоритм Ллойда-Макса), а также шкал на основе А и Мю-законов компандирования.

Ключевые слова: квантование по уровню аудио-сигналов; оптимальное квантование; закон компандирования; А и Мю-закон.