

# МОДЕЛЬ ПРОЯВЛЕНИЯ И ВЫЯВЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ НЕМОНОТОННОСТИ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАНТОВАТЕЛЯ УРОВНЯ В ВЫХОДНОМ СИГНАЛЕ СИСТЕМЫ АНАЛОГО-ЦИФРО- АНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

О.В. Рыбальский, В.И. Соловьев

Национальная академия внутренних дел,  
пл. Соломенская, 1, Киев, 03035, Украина; e-mail: rybalsky\_ol@mail.ru

Предложена модель описания проявления технологических погрешностей квантователя уровня аналогового сигнала на выходе системы аналого-цифро-аналогового преобразования. Показано, что такие проявления могут быть выявлены применением вейвлет-анализа при использовании вейвлета Морле. Показано, что эти проявления носят фрактальный характер. Предложено выявлять их статистические характеристики путем применения известных методов математической статистики.

Ключевые слова: аналого-цифровое преобразование, квантование по уровню, статическая характеристика квантования, немонотонность, нелинейность статической характеристики.

## Введение

Широкое использование цифровой аппаратуры звукозаписи привело к началу первых попыток создания инструментария для проведения экспертиз цифровой аппаратуры и материалов видеозвукозаписи. Была создана теория, ставшая основой разработки такого инструментария, и разработаны первые программы и методики, предназначенные для проведения такой экспертизы. Впервые реализация этого инструментария была осуществлена с применением вейвлет-анализа сигналов, что позволило экспертам исследовать паразитные параметры цифровой аппаратуры звукозаписи (ЦАЗЗ) [1–3]. Однако они не удовлетворяли все требования экспертов, что привело к дальнейшей разработке созданного направления использования паразитных параметров ЦАЗЗ. Это потребовало развития теоретической базы, положенной в основу разработки экспертного инструментария. Одной из задач развития теории применения паразитных параметров ЦАЗЗ для экспертных целей была теоретическое осознание процессов проявления и выявления влияния немонотонности статической характеристики квантователя уровня в выходном сигнале системы аналого-цифро-аналогового преобразования. Решению этой задачи и посвящена данная работа.

## Основная часть

Известно, что для записи аналогового сигнала (АС) в цифровой форме его необходимо подвергнуть двум операциям – дискретизации во времени и квантованию по уровню [4]. Представим АС на входе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) как

$s_1(t) = A_{m1} \cos \omega_0 t$ . Этот сигнал на выходе цифро-аналогового преобразователя записывается как

$$s_2(t) = \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t-n_1T_1}{T_1}\right) A_{m1} \cos \omega_0(n_1T_1), \quad (1)$$

где  $n_1$  – номер отсчета (выборки) сигнала на выходе системы аналого-цифро-аналогового преобразования (САЦАП),

$T_1$  – шаг дискретизации АС в САЦАП,

$A_{m1}$  – амплитуда входного АС [1, 2].

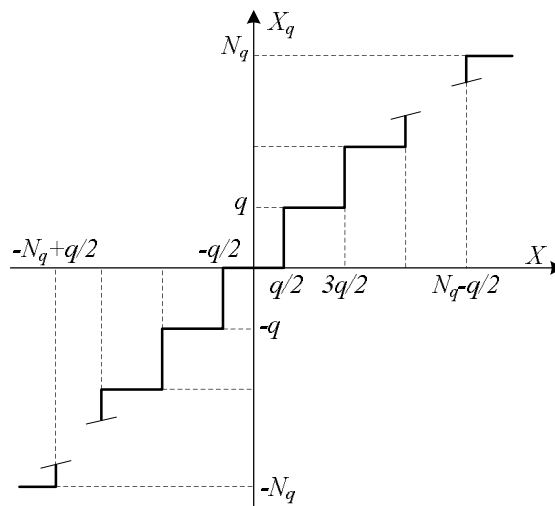
Соотношение (1) описывает сигнал на выходе идеальной САЦАП в виде выборок

АС. Спектр сигнала  $S_3(j\omega) = \frac{A_{m1}\omega_{Д1}}{\omega} \sin \omega \frac{T_1}{2} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} [\delta(\omega - \omega_0 - k_1\omega_{Д1}) + \delta(\omega + \omega_0 - k_1\omega_{Д1})]$ , где

$\omega_{Д1}$  – ЧД в САЦАП,  $\omega_{Д1} = \frac{2\pi}{T_1}$  [1, 2].

Также известно, что в общем виде сигнал выборки на выходе квантователя уровня (КУ) записывается как  $U = \sum_{i=0}^{2N-1} a_i 2^i U_{0no}$ , где  $a_i$  – весовые коэффициенты, определяемые соответствующими разрядами двоичного кода, в который преобразован уровень выборки входного АС,  $i$  – номер разряда двоичного кода,  $U_{0no}$  – уровень младшего разряда преобразования,  $2N$  – количество уровней квантования преобразователя [4].

Статическая характеристика (СХ) преобразования АС, соответствующая соотношению (1), показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Статическая характеристика идеального двуполярного квантователя по уровню

Но, как показано в [2, 3], СХ КУ обладает нелинейностью, определяемой несоответствием направления приращения уровня сигнала на определенном такте квантования. В [3] показано, что обычно величина образующегося при этом выброса не превышает значения удвоенной величины уровня младшего разряда, а вероятность совпадения таких мест для двух независимых АЦП определяется как  $P = \frac{1}{2^{2i}}$ .

Таким образом, для двух 16-разрядных АЦП вероятность совпадения двух мест с немонотонностью СХ (НСХ) преобразования составит  $P = 2^{-32}$ .

Если входной АС подавался на вход КУ с имеющейся в нем НСХ (а АЦП без НСХ не бывает [5]), то он может рассматриваться с точки зрения принципа «суперпозиции» для безинерционной нелинейной системы, а сигнал на выходе КУ можно записать в виде

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) = \sum_{i=0}^l a_i 2^i U_{0on} + \sum_{i=l+1}^{2N-1} a_i 2^i U_{0on} = a_{l+1} 2^{l+1} U_{0on} + \sum_{i=0}^l a_i 2^i U_{0on} + \sum_{i=l+2}^{2N-1} a_i 2^i U_{0on}, \quad (2)$$

где  $y_1(t)$  – отклик системы на воздействие, действующее на участке шкалы, в пределах которого в СХ КУ отсутствует НСХ,

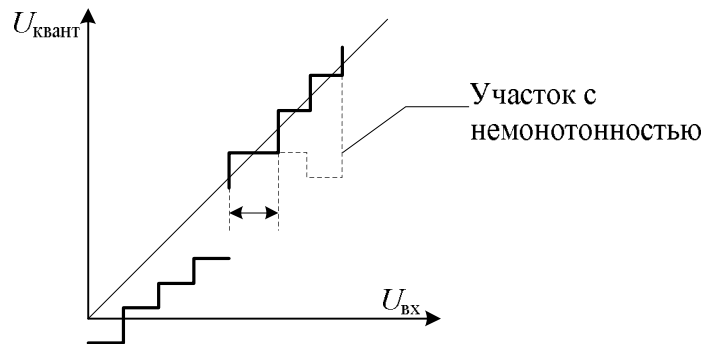
$y_2(t)$  – отклик системы на воздействие, действующее на участке шкалы, в пределах которого в СХ КУ имеется НСХ,

$l$  – номер интервала квантования, до которого НСХ в СХ КУ отсутствует,

$l+1$  – последующий за  $l$  номер интервала квантования, на котором в СХ КУ имеется НСХ,

$l+2$  – последующий за  $l+1$  номер интервала квантования, на котором отсутствует НСХ в СХ КУ [3].

Соотношение (2) можно проиллюстрировать рис. 2.



**Рис. 2.** Фрагмент статической характеристики квантователя уровня, содержащий немонотонность и дифференциальную нелинейность

Для рассмотрения влияния НСХ на выходной сигнал САЦАП вместо значения величины амплитуды сигнала  $A_{m1}$  в соотношении (1) подставим соотношение (2). В результате проведенной подстановки получим

$$\begin{aligned} s_2(t) &= \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t-n_1T_1}{T_1}\right) \left( \sum_{i=0}^l a_i 2^i U_{0on} + \sum_{i=l+1}^{2N-1} a_i 2^i U_{0on} \right) \cos \omega_0(n_1T_1) = \\ &= \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t-n_1T_1}{T_1}\right) \left( a_{l+1} 2^{l+1} U_{0on} + \sum_{i=0}^l a_i 2^i U_{0on} + \sum_{i=l+2}^{2N-1} a_i 2^i U_{0on} \right) \cos \omega_0(n_1T_1). \end{aligned} \quad (3)$$

Соответственно, спектр этого сигнала запишется как

$$S_2(j\omega) = \frac{\sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t-n_1T_1}{T_1}\right)\omega_{Д1}}{\omega} \left( a_{l+1}2^{l+1}U_{0on} + \sum_{i=0}^l a_i2^iU_{0on} + \sum_{i=l+2}^{2N-1} a_i2^iU_{0on} \right) \times \quad (4)$$

$$\times \sin \omega \frac{T_1}{2} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} [\delta(\omega - \omega_0 - k_1\omega_{Д1}) + \delta(\omega + \omega_0 - k_1\omega_{Д1})].$$

Как видно из соотношения (4) в спектре сигнала, прошедшего САЦАП, КУ которой на некоторых уровнях содержит НСХ, проявляются отклонения от идеальной системы, соответствующие величине отклонений на этих уровнях.

Для выявления этих отклонений нами в ряде работ предложено применить вейвлет-анализ, используя для этого вейвлет Морле [6, 7]. Тогда сигнал во временной области, представленный соотношением (3), при проведении такого анализа, является сверткой с вейвлетом Морле, и запишется как

$$s_3(t) = \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t-n_1T_1}{T_1}\right) \left( a_{l+1}2^{l+1}U_{0on} + \sum_{i=0}^l a_i2^iU_{0on} + \sum_{i=l+2}^{2N-1} a_i2^iU_{0on} \right) \cos \omega_0(n_1T_1) \otimes \quad (5)$$

$$\otimes \pi^{-\frac{1}{4}} \left( e^{j\omega_c t} - e^{-\frac{\omega_c^2}{2}} \right) e^{-\frac{t^2}{2}},$$

где  $\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}$ ,  $\omega_c$  – частота (носитель) гетеродинамирования гауссиана, входящего в вейвлет Морле.

С учетом того, что свертка во временной области эквивалентна их произведению в частотной области представления сигналов, спектр сигнала, представленного соотношением (5) запишется как

$$S_3(j\omega) = \frac{\sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t-n_1T_1}{T_1}\right)\omega_{Д1}}{\omega} \left( a_{l+1}2^{l+1}U_{0on} + \sum_{i=0}^l a_i2^iU_{0on} + \sum_{i=l+2}^{2N-1} a_i2^iU_{0on} \right) \times \quad (6)$$

$$\times \sin \omega \frac{T_1}{2} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} [\delta(\omega - \omega_0 - k_1\omega_{Д1}) + \delta(\omega + \omega_0 - k_1\omega_{Д1})] \sqrt{2\pi}^{\frac{1}{4}} \left( e^{-\frac{(\omega-\omega_c)^2}{2}} - e^{-\frac{\omega^2}{2}} \cdot e^{-\frac{\omega_c^2}{2}} \right).$$

С учетом свойств вейвлет преобразования, можно заключить, что из соотношений (5) и (6) следует возможность выделения локальных максимумов в сигнале, образующихся за счет НСХ КУ. Но такие максимумы фактически всегда будут повторяться в сигнале, прошедшем через САЦАП. При этом они всегда будут повторяться в местах нарушения монотонности СХ преобразования КУ, имеющих строго индивидуальный характер для каждой конкретной системы.

## Выводы

1. Исходя из полученных соотношений, можно заключить, что нарушения монотонности СХ преобразования КУ носят фрактальный характер и выделяются из преобразованных сигналов при использовании вейвлета Морле.

2. Для последующей оценки характера выделенных нарушений можно применить методы математической статистики.

## Список литературы

1. Рыбальский, О.В. Современные методы проверки аутентичности магнитных фонограмм в судебно-акустической экспертизе / О.В. Рыбальский, Ю.Ф. Жариков. – К.: НАВСУ, 2003. – 300 с.
2. Рибальський, О.В. Застосування вейвлет-аналізу для виявлення слідів цифрової обробки аналогових і цифрових фонограм у судово-акустичній експертизі / О.В. Рибальський. – К.: НАВСУ, 2004. – 167 с.
3. Рыбальский, О.В. Основные положения теории выявления следов цифровой обработки фонограмм и особенности ее программной и методической реализации в экспертизе материалов и средств видеозвукозаписи. Ч. 1. / О.В. Рыбальский // Захист інформації. – 2006. – № 1. – С. 71-76.
4. Баранов, Л.А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления / Л.А. Баранов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.
5. Федорков, Б.Г. Микроэлектронные цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи / Б.Г. Федорков, В.А. Телец, В.П. Дегтяренко. – М.: Радио и связь, 1984. – 120 с.
6. Соловьев, В.И. Идентификация аппаратуры аудиозаписи по статистическим характеристикам аудиофайлов / В.И. Соловьев // Реєстрація та обробка інформації. – 2013. – Т. 14, № 1. – С. 59-70.
7. Рыбальский, О.В. Применение вейвлета Морле при создании методов и аппаратуры для проведения экспертиз материалов цифровой видеозвукозаписи / О.В. Рыбальский, В.И. Соловьев, В.К. Железняк // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С: Фундаментальные науки. – 2014. – № 3. – С. 3-9.

**МОДЕЛЬ ПРОЯВУ ТА ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ НЕМОНОТОННОСТІ СТАТИСТИЧНОЇ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАНТУВАЧА РІВНЯ У ВИХІДНОМУ СИГНАЛІ СИСТЕМИ АНАЛОГО-  
ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ**

О.В. Рибальський, В.І. Соловйов

Національна академія внутрішніх справ,  
пл. Солом'янська, 1, Київ, 03035, Україна; e-mail: rybalsky\_ol@mail.ru

Запропонована модель опису прояву технологічних погрішностей квантувача за рівнем аналогового сигналу на виході системи аналого-цифро-аналогового перетворення. Показано, що такі прояви можуть бути виявлені застосуванням вейвлет-аналізу при використанні вейвлета Морле. Показано, що ці прояви носять фрактальний характер. Запропоновано їх статистичні характеристики виявляти шляхом застосування відомих методів математичної статистики.

**Ключові слова:** аналого-цифрове перетворення, квантування за рівнем, статична характеристика квантування, немонотонність, нелінійність статичної характеристики.

**MODEL TO MANIFEST AND DETECT THE INFLUENCE OF MONOTONICITY OF STATIC  
CHARACTERISTIC OF AMPLITUDE QUANTIZER IN OUTPUT SIGNAL OF ANALOG TO  
DIGITAL TO ANALOG CONVERSION SYSTEM**

O.V. Rybalsky, V.I. Solovyev

National Academy of Internal Affairs,  
1, Solomenskaya sq., Kiev, 03035, Ukraine; e-mail: rybalsky\_ol@mail.ru

A model is proposed to define manifestations of instrument inaccuracies of an analog signal amplitude quantizer at the output of analog to digital to analog conversion system. It was shown that these manifestations can be detected by wavelet analysis using Morlet wavelet. Additionally, it was shown that these manifestations are of fractal character. It is proposed to determine their static characteristics using customary methods of mathematical statistics.

**Keywords:** analog to digital to analog conversion, amplitude quantization, static quantization characteristic, static characteristic nonlinearity.