

УДК 621.391.16; 681.327.8

**ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ
ПРИ ДИСКРЕТНО-КВАНТОВАННОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ**М.М. БАРАНОВСКИЙ¹, А.Г. ФИЛИППОВИЧ¹, В.К. ЖЕЛЕЗНЯК², С.В. ЛАВРОВ²¹Оперативно-аналитический центр при Президенте Республики Беларусь,
г. Минск, 220030, Республика Беларусь,²Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»,
г. Новополоцк, 211440, Республика Беларусь

Введение. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи повсеместно используются во всем современном оборудовании ввиду превосходства цифровой обработки сигналов над аналоговой. Преобразование аналоговых речевых сигналов в цифровые и их обратное преобразование из цифровой формы в исходный сигнал генерируют новые каналы утечки речевой информации. Установлено, что дискретизация по времени и квантование по уровню высокоскоростных высококачественных речевых сигналов при преобразовании их в цифровую форму являются основными источниками утечки информации [1].

Используемые в настоящее время подходы к оценке защищенности каналов утечки речевых сигналов при их преобразовании в цифровую форму сводятся к отдельной оценке аналогового речевого сигнала и речевого сигнала, представленного в цифровой форме при его передаче по линиям связи, а в качестве измерительного сигнала используют, как правило, гармонический сигнал [2, 3].

В работе [1] показано, что использование гармонического сигнала не позволяет достоверно оценить защищенность речевого сигнала при высококачественной скоростной передаче в цифровых системах информации, а при выборе измерительных (тестовых) сигналов необходимо учитывать особенности дискретно-квантованного представления речевых сигналов.

Задачей настоящей работы является повышение достоверности и точности оценки преобразованного дискретно-квантованного речевого сигнала за счет повышения точности оценки шума квантования.

1. Особенности дискретно-квантованного преобразования речевых сигналов.

Защищенность речевого сигнала дискретно-квантованным равномерным преобразованием при амплитудно-импульсной модуляции оценивают по шуму квантования, используя амплитудную характеристику квантования [4]. Амплитудная характеристика квантования является ступенчатой функцией с равномерной величиной шага квантования Δ . Величина шага квантования определяется весом младшего числового разряда.

При равномерном квантовании с числом уровней квантования $L = 2^N$ (где N – число бит цифровой передачи) величину шага квантования Δ определяют по формуле:

$$\Delta = \frac{U_{\max}}{2}, \quad (1)$$

где U_{\max} – общий динамический диапазон входного сигнала.

На рисунке 1, а приведена амплитудная характеристика квантования.

Разницу между входным аналоговым сигналом $x(t)$ и квантованным сигналом $y(t)$ называют ошибкой или шумом квантования $e(t)$:

$$e(t) = y(t) - x(t). \quad (2)$$

При этом $-\frac{\Delta}{2} \leq e(t) \leq \frac{\Delta}{2}$.

На рисунке 1, б представлена ошибка квантования для амплитудной характеристики квантования, изображенной на рисунке 1 (а). Из формулы (2) и рисунка 1 следует, что сигнал ошибки квантования зависит от амплитуды входного сигнала $x(t)$ и амплитудной характеристики квантования.

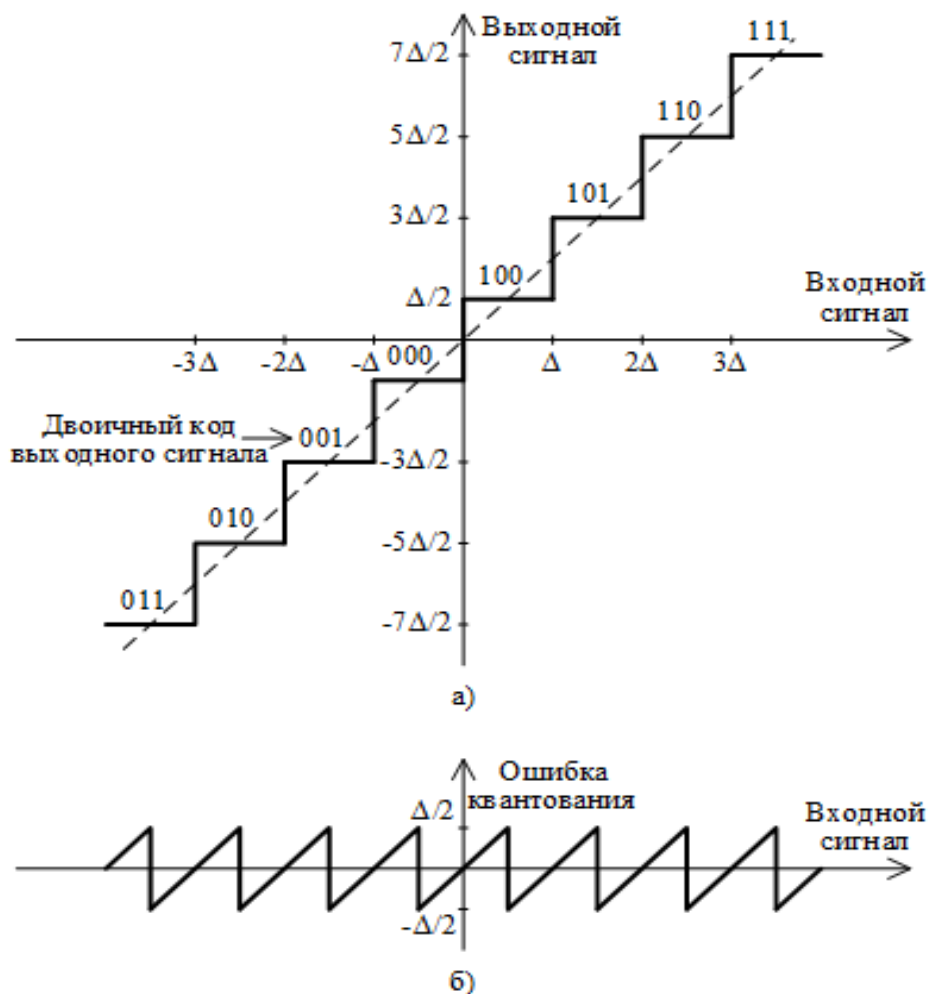


Рис. 1. Амплитудная характеристика квантования (а) и соответствующая ей ошибка квантования (б)

При одинаковых интервалах квантования среднее значение мощности ошибки квантования P_{Δ} и эффективное значение ошибки квантования ε_{Δ} зависят только от величины шага квантования [4]:

$$P_{\Delta} = \frac{\Delta^2}{12} = \frac{1}{12} \left(\frac{U_{\max}}{2^N} \right)^2, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\Delta} = \frac{\Delta}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{U_{\max}}{2^{N+1}} \right). \quad (4)$$

В рабочей полосе частот ограниченной верхней полосы f_B отношение сигнал/шум (SNR) при равномерном квантовании зависит от длины кодовых слов N (бит) и частоты дискретизации F_d следующим образом [4]:

$$SNR = 6,02N + 101g \left(\frac{F_d}{2\Delta f_B} \right) + C_s, \quad (5)$$

где C_s – постоянная, учитывающая форму входного сигнала (для гармонических сигналов $C_s = 1,7$ дБ, для звуковых сигналов $C_s = -15 \dots +2$ дБ).

Из формулы (5) видно, что при каждом удвоении частоты дискретизации F_d отношение сигнал/шум улучшается на 3 дБ. Для обеспечения заданного качества воспроизведения переданного сообщения требуется полоса 10 кГц и длина кодового слова должны быть не менее 12 бит [4].

Процесс дискретизации можно представить как умножение исходного сигнала $x(t)$ на решетчатую функцию $\delta_T^*(t)$, состоящую из периодической последовательности дельта-функций, следующих с периодом T :

$$\delta_T^*(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(t - mT). \quad (6)$$

Представление ее в виде ряда Фурье имеет следующий вид [5]:

$$\delta_T^*(t) = \frac{2\pi}{\omega_0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{jk\omega_0 t}, \quad (7)$$

где $\omega_0 = 2\pi/T$ – частота дискретизации, T – период (шаг) дискретизации;

Выходная величина $x^*(t)$ представляется модулированной последовательностью δ -функцией [5]:

$$x^*(t) = x(t) \cdot \delta_T^*(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \delta(t - mT) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(mT) \cdot \delta(t - mT), \quad (8)$$

где $x(t) = x(mT)$ – решетчатая функция (последовательность дискретных значений непрерывной функции $x(t)$ при $0 \leq mT < \infty$).

На рисунке 2 представлена полученная в соответствии с формулой (8) модулированная последовательность δ -функций $x^*(t)$.

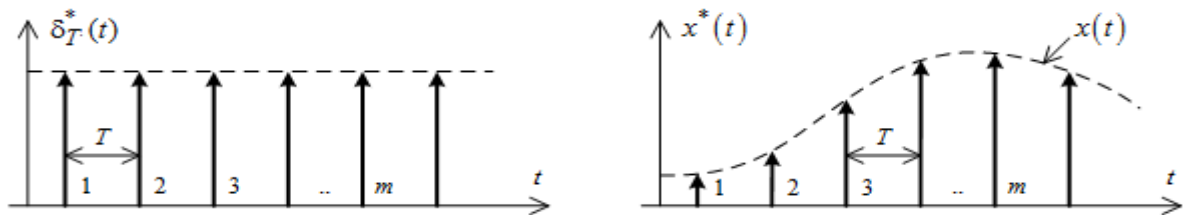


Рис. 2. Модулированная последовательность δ -функций

Формула (8) решает задачу восстановления сигнала по его значениям в точках отсчета, представленных с помощью сигнала δ -функций. Если входная непрерывная величина $x(t)$ обладает финитным свойством, т. е. спектр ограничен частотой среза ω_c , то квантование по времени с частотой $\omega_0 \geq 2\omega_c$ не приводит к потере информации. Для восстановления входного сигнала $x(t)$ необходимо на вход идеального фильтра нижних частот подать сигнал $x^*(t)$. Тогда на выходе фильтра нижних частот получим восстановленный сигнал [5]:

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(mT) \frac{\sin \omega_c (t - mT)}{\omega_c (t - mT)}. \quad (9)$$

Формула (9) обосновывает замену передачи непрерывного сигнала передачей решетчатым сигналом без потери информации.

Кроме того, необходимо отметить, что использование гармонического сигнала не позволяет достоверно оценить защищенность речевых сигналов при дискретно-квантованном преобразовании в связи с:

- высокой погрешность оценки отношения уровня дискретизированного речевого сигнала к уровню шума квантования из-за того, что и сигнал, и шум квантования – случайные процессы;
- низкой точность и достоверность оценки защищенности, обусловленной искажением сигнала шума квантования из-за высокого по сравнению с его уровнем шума в точке наблюдения;

- отсутствием нормативного значения оценки защищенности речевого сигнала, преобразованного квантованно-дискретным преобразованием для передачи в широкополосных каналах.

2. Оценка защищенности дискретно-квантованного речевого сигнала. Для оценки защищенности речевых сигналов при дискретно-квантованном преобразовании предложено использовать в качестве измерительного сигнала периодическую импульсную последовательность треугольной формы, формируемую из периодической последовательности прямоугольных импульсов путем последовательного автокорреляционного преобразования [1]. Измерительному сигналу присуща форма линейно-нарастающего и линейно-спадающего напряжения с высокоточной линейностью. Высокая точность измерительного сигнала подтверждается сравнением амплитуд основной и высшей нечетных гармоник спектра периодической функции треугольной формы разложением в ряд Фурье в тригонометрическом виде [6]:

$$f(t) = \frac{8A}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \frac{\sin k\omega t}{k^2}, \quad (10)$$

где a – амплитуда сигнала; k – номер гармоники ($k=1,3,5,\dots$); $\omega = \frac{2\pi}{T_{\Pi}}$ – угловая частота сигнала; T_{Π} – период сигнала.

Из формулы (10) видно, что для периодической импульсной последовательности треугольной формы четные гармоники отсутствуют, а амплитуды нечетных гармоник убывают пропорционально второй степени номеров гармоник, что позволяет производить оценку защищенности по первой (основной) гармонике. Возникающий при этом шум квантования имеет пилообразную форму, что повышает чувствительность его обнаружения.

Разложение импульсов пилообразной формы шума квантования в ряд Фурье имеет следующий вид [6]:

$$f(t) = \frac{A}{2} - \frac{A}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin k\omega t, \quad (11)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$

Для формирования измерительного сигнала, в качестве исходного (нормированного) сигнала используем периодическую импульсную последовательность прямоугольной формы с периодом T , равным $1/F_i$, где F_i – средняя частота полосы, равной разборчивости речевого сигнала, $i = \overline{1, n}$, $n = 20$ [1], длительность импульса $\tau = T/2$, $F_i = 250; 500; 650; 800; 950; 1125; 1300; 1500; 1700; 1875; 2050; 2250; 2425; 2725; 3100; 3500; 3850; 4550; 6150; 8600$ Гц.

Преобразуем автокорреляционной функцией периодическую импульсную последовательность прямоугольной формы в периодическую импульсную последовательность треугольной формы. В результате преобразования получим необходимый измерительный сигнал, представленный в виде периодической импульсной последовательности треугольной формы с мощностью $A^2\tau$ и длительностью импульса 2τ [1], где A – амплитуда импульса импульсной последовательности прямоугольной формы и $\tau = 1000; 769; 625; 526; 444; 385; 333; 294; 267; 243; 222; 206; 183; 161; 143; 130; 110; 81; 58$ мкс (рис. 3).

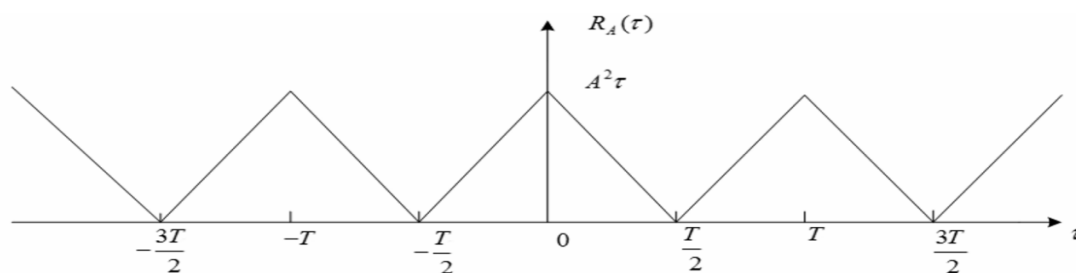


Рис. 3. Автокорреляционная функция

Полученный сигнал периодической импульсной последовательности треугольной формы без его искажения вводят в канал передачи речевого сигнала. На выходе канала передачи получают преобразованный сигнал в виде выборки и ошибки квантования, которые обрабатывают в каждой из полос равной разборчивости. Из периодической импульсной последовательности треугольной формы выделяют спектральные составляющие методом преобразования Фурье с получением основной гармоники гармонического сигнала. Для увеличения отношения сигнал/шум применяют накопление, при котором основная и высшие гармоники сигнала накапливаются по линейному закону, а шум – по среднеквадратичному. Оценку защищенности речевого сигнала выполняют сравнением полученного отношения сигнал/шум с нормированным [1].

Заключение. Для оценки защищенности канала утечки речевых сигналов при дискретно-квантованном преобразовании предложено использование измерительного сигнала треугольной формы. Предложен способ синтеза измерительного композитного сигнала, представленного в виде периодической импульсной последовательности треугольной формы, формируемой из периодической последовательности прямоугольных импульсов путем последовательного автокорреляционного преобразования. Использование предложенного измерительного композитного сигнала позволяет установить его численную зависимость с численным значением сигнала, принятого в качестве нормированного и сравнить для принятия решения о защищенности речевого сигнала. Полученные результаты позволяют проводить дальнейшие исследования защищенности речевых сигналов при их обратном преобразовании из цифровой формы в исходный сигнал.

Список литературы

1. Железняк, В. К. Синтез измерительного композитного сигнала для оценки защищенности речевых сигналов при дискретно-квантованном преобразовании / В. К. Железняк [и др.] // Доклады БГУИР. – 2020. – № 18 (6). – С. 81–87.
2. Бузов, Г. А. Защита информации ограниченного доступа от утечки по техническим каналам / Г. А. Бузов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2017. – 586 с.
3. Железняк, В. К. Защита информации от утечки по техническим каналам : учеб. пособие / В. К. Железняк. – СПб.: ГУАП, 2006. – 188 с.
4. Шкритек, П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике / П. Шкритек. – М. : Мир, 1991 – 446 с.
5. Цыпкин, Я. З. Основы теории автоматических систем / Я. З. Цыпкин. – М. : Наука, 1977. – 560 с.
6. Скляр, Б. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр [и др.] ; пер. с англ.. – 2-е изд. – М. [и др.] : Вильямс, 2016. — 1099 с.