

УДК 621.396; 534.41

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК РЕЧЕВОГО СИГНАЛА,
ПРЕДСТАВЛЕННОГО ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ
ИМПУЛЬСОВ ДИСКРЕТИЗАЦИИ**

*д-р техн. наук, проф. В. К. ЖЕЛЕЗНЯК, канд. техн. наук И. Б. БУРАЧЕНОК, С. В. ЛАВРОВ
(Полоцкий государственный университет);
А. Г. ФИЛИППОВИЧ, М. М. БАРАНОВСКИЙ
(Оперативно-аналитический центр при Президенте Республики Беларусь)*

Приведены результаты исследования параметров и характеристик речевого сигнала, представленного периодической последовательностью импульсов дискретизации. Показан процесс возникновения дополнительных спектральных составляющих, обусловленных дискретным преобразованием аналоговых речевых сигналов, и их зависимость от параметров аналогово-цифрового преобразования. Исследована тонкая структура сигнала на предмет обнаружения гармоник шума квантования в каналах утечки. Исследованы методы повышения точности оценки параметров передаваемого речевого сигнала в диапазоне от 100 до 10 кГц с интервалом дискретизации 5,2 мкс.

Ключевые слова: речевой сигнал, дискретное преобразование, шум квантования, каналы утечки информации.

Введение. Рост объемов информации и последние достижения в области ее передачи по широкополосным каналам связи позволяют непрерывное сообщение заменять цифровым путем квантования исходного сигнала по уровню и времени, обеспечивая тем самым высокое качество и верность ее передачи на большие расстояния. Актуальными для решения являются вопросы оптимизации технической защиты информации при сохранении высокой эффективности основных параметров передачи исходя из того, что сигналы подвергаются помеховым возмущениям в каналах утечки информации, а погрешность их восстановления зависит от ряда параметров: вида исходной функции сигнала; разрядности аналогово-цифрового (АЦП) и цифроаналогового (ЦАП) преобразователей; процесса квантования, связанного с округлением значений непрерывного сигнала; интервала квантования и алгоритма восстановления [1]. При этом наибольший интерес у специалистов вызывают дискретные методы анализа: так как дискретизация сигналов приводит к определенной потере информации о поведении сигналов в промежутках между отсчетами из-за возникновения дополнительных спектральных составляющих, возникает необходимость в дополнительном исследовании тонкой структуры сигнала, представленного периодической последовательностью импульсов дискретизации.

Целью работы является анализ тонкой структуры спектральных составляющих, обусловленных дискретным преобразованием при разложении произвольной функции на элементарные δ -импульсы и анализ информации о совокупном значении численных величин параметров шума квантования при дискретно-квантованном представлении аналоговых речевых сигналов в каналах утечки информации.

Основная задача – исследование методов повышения точности оценки параметров сигналов, которые позволяют при надлежащем выборе формы сигнала найти основные динамические характеристики исследуемой системы.

Исходя из того, что в соответствии с методами линейной теории любую сложную функцию можно аппроксимировать суммой более простых функций, обладающих ортогональностью, каждая из которых несет только свою долю информации, содержащейся в кривой [2], исследуем процесс дискретизации аналогового речевого сигнала при разложении его по системе δ -функций.

Итак, дискретный сигнал по своим значениям в процессе анализа может быть разложен только по системам дискретных базисных функций, у которых отсчеты времени совпадают с отсчетами сигнала, т.е. по сути, он является непрерывной функцией, но определенной только по дискретным значениям аргумента [3]. По множеству своих значений он является конечным и описывается дискретной последовательностью отсчетов $y(n\Delta t)$, где $y_1 \leq y \leq y_2$, Δt – интервал между отсчетами, т.е. дискретный сигнал представляет собой последовательность отсчетов, значения которых в точности равны значениям исходного сигнала по координатам $n\Delta t$. При этом частота дискретизации $f = \frac{1}{\Delta t}$, Δt – является величиной, обратной шагом дискретизации.

Если же рассматривать цифровой сигнал, то он квантован по своим значениям и дискретен по аргументу. Такой сигнал описывается квантованной решетчатой функцией [3] $y_n = Q_k[(n\Delta t)](n\Delta t)$, где Q_k – функция квантования с числом уровней квантования k , при этом интервалы квантования могут быть как

с равномерным распределением, так и с неравномерным. Ранее в работе [4] обоснован выбор равномерного шага квантования.

По сути, цифровой сигнал по своим отсчетам является формализованной разновидностью дискретного сигнала. Процесс преобразования бесконечных по значениям аналоговых отсчетов в конечное число цифровых значений называется квантованием по уровню [5]. Возникающие при квантовании ошибки округления до определенного количества цифр отсчетов и есть шумы, или ошибки квантования, которые зависят в том числе и от частоты дискретизации, порождающей дополнительные спектральные составляющие. В системах цифровой обработки данных и в ЭВМ сигнал всегда представлен с точностью до определенного количества разрядов, а следовательно, всегда является цифровым [6]. С учетом этих факторов при описании цифровых сигналов функция квантования обычно опускается (подразумевается равномерной по умолчанию), а для описания сигналов используются правила описания дискретных сигналов. Причем при дискретизации сетка отсчетов по аргументу может быть произвольной или задаваться по определенному закону.

На современном этапе для аналогово-цифрового преобразования широко применяются методы равномерной дискретизации, так как при их использовании алгоритмы дискретизации и восстановления сигналов и соответствующая аппаратура просты в реализации. Поэтому дальнейшие исследования проведем с применением равномерной дискретизации по времени (с постоянным шагом по аргументу), при $s(t) \Rightarrow s(n\Delta t)$, где значения $s(n\Delta t)$ представляют собой отсчеты функции $s(t)$ в моменты времени $t = n\Delta t$, $n = 0, 1, 2 \dots N$. Примером дискретного сигнала с квантованием по времени является модулированная по амплитуде последовательность идеальных импульсов равной длительности Δ , представленная в виде ступенчатой функции $x_\Delta(t)$, имеющей в каждом интервале постоянное значение, равное значению функции $x(t)$ в середине этого интервала, как показано на рисунке 1.

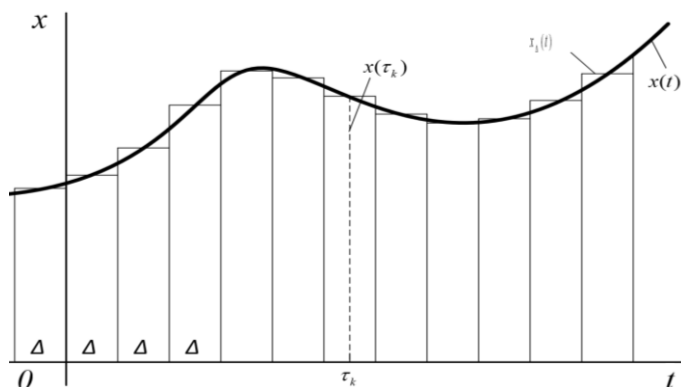


Рисунок 1. – Ступенчатая функция

Середину k -го интервала обозначим через τ_k ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Значение функции $x(t)$ в точке τ_k , равно $x(\tau_k)$ (см. рисунок 1).

Далее рассмотрим построенный на k -м интервале ступенчатой функции отдельно взятый прямоугольный импульс высотой $x(\tau_k)$ и длительностью Δ (рисунок 2).

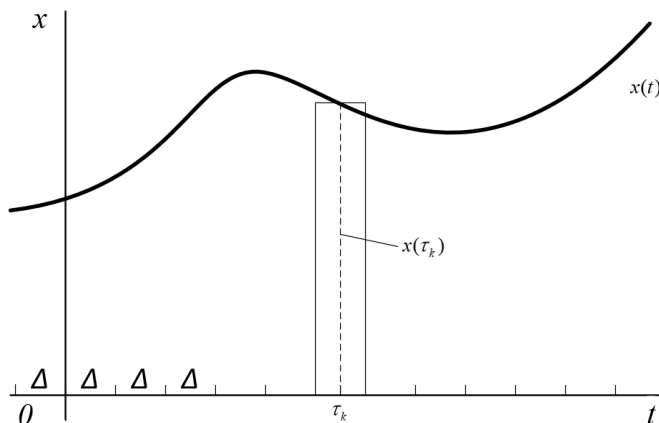


Рисунок 2. – Прямоугольный импульс длительностью Δ , построенный на k -м интервале ступенчатой функции

Если единичный импульс конечной длительности Δ (высота этого импульса равна $\frac{1}{\Delta}$) представить выражением [7]

$$\delta_{\Delta}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta} & \text{при } |t| < \frac{\Delta}{2}; \\ 0 & \text{при } |t| > \frac{\Delta}{2}, \end{cases}$$

то отдельный прямоугольный импульс, действующий в промежутке времени $\left(\tau_k - \frac{\Delta}{2}, \tau_k + \frac{\Delta}{2}\right)$, можно представить в виде функции $\delta_{\Delta}(t - \tau_k)$.

Чтобы получить импульс высотой $x(\tau_k)$, необходимо функцию $\delta_{\Delta}(t - \tau_k)$ умножить на $x(\tau_k)$ и разделить на $\frac{1}{\Delta}$, в результате получим $\delta_{\Delta}(t - \tau_k)x(\tau_k)\Delta$. Сумма таких импульсов по всем интервалам, на которые разбили ось t , представляет ступенчатую функцию, имеющую в каждом интервале постоянное значение, равное значению функции $x(t)$ в середине этого интервала:

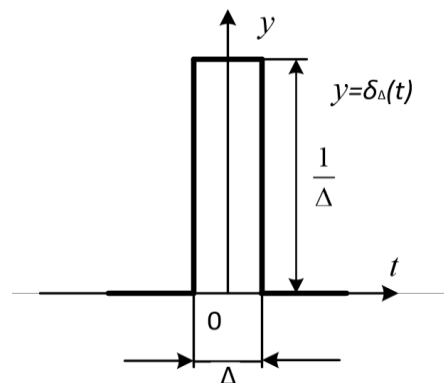
$$x_{\Delta}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta_{\Delta}(t - \tau_k)x(\tau_k)\Delta. \tag{1}$$

Из полученного выражения (1) однозначно следует, что на точность передачи аналогового сигнала значительно влияет длительность импульса дискретизации.

Рассмотрим подробнее идеальный единичный δ -импульс, представленный сигналом в виде так называемой δ -функции [5]. Впервые импульсная δ -функция была введена в науку П. Дираком. Импульсной δ -функцией называется функция, равная нулю всюду, кроме начала координат, принимающая бесконечное значение в начале координат ($\delta(t) = 0$ при $t \neq 0$, $\delta(0) = \infty$), и при том так, что интеграл от нее по любому интервалу, содержащему начало координат, равен единице ($\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} \delta(t)dt = 1$ при любом $\varepsilon > 0$).

Данная функция – это функция времени, обладающая следующими свойствами: 1) она имеет бесконечно большое значение в течение определенного бесконечно малого промежутка; 2) она равна нулю вне этого промежутка времени. Интеграл от такой функции конечен и равен мгновенному изменению скорости тела. Функцию, обладающую такими свойствами, можно получить, например, как предел положительного прямоугольного импульса, имеющего единичную площадь, когда длительность этого импульса стремится к нулю. График такой функции можно представить, как показано на рисунке 3.

Рисунок 3. – Положительный прямоугольный импульс единичной площади



Чем уже полоска между левой и правой частью, тем выше она должна быть, для того чтобы ее площадь (т. е. интеграл) сохраняла свое заданное значение, равное 1. При сужении полоски приближаемся к выполнению условия $\delta(t) = 0$ при $t \neq 0$.

Еще удобнее определить δ -функцию как предел при $h \rightarrow \infty$ функции

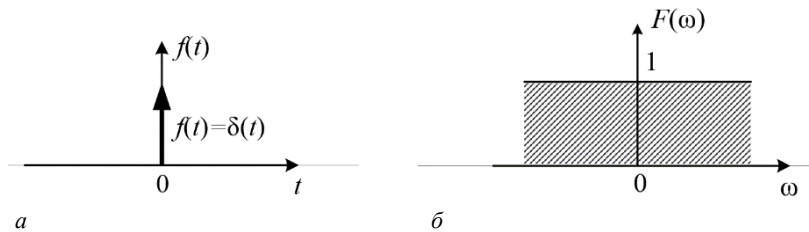
$$\delta_h(t) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 t^2}.$$

Очевидно, что при любом $t \neq 0$ функция $\delta_h(t)$ стремится к нулю при $h \rightarrow \infty$. При $t=0$ эта функция неограниченно возрастает при $h \rightarrow \infty$. Наконец, при любом $\varepsilon > 0$ имеем выражение

$$\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} \delta_h(t) dt = \frac{h}{\sqrt{\pi}} \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} e^{-h^2 t^2} dt = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-h\varepsilon}^{h\varepsilon} e^{-u^2} du.$$

При $h \rightarrow \infty$ – это выражение стремится к единице. Важно также, чтобы δ -функция была четной.

Преобразование Фурье единичного импульса имеет вид $F[\delta(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) e^{-i\omega t} dt$ и равно единице: $F[\delta(t)] = 1$ [7], как показано на рисунке 4.



a – единичный импульс; **b** – спектр единичного импульса

Рисунок 4. – Преобразование Фурье, включающее единичный импульс

Из рисунка 4 видно, что единичный импульс имеет равномерную спектральную плотность во всей бесконечной области частот, т. е. единичный импульс содержит составляющие всех возможных частот ω с одинаковыми относительными амплитудами. Преобразование Фурье δ -функции показало, что ее площадь не убывает с ростом частоты и остается неизменной, т. е. равной единице.

Следующим этапом рассмотрим периодическую последовательность единичных импульсов. Если задать время повторения импульсов $T_{сек}$, то такую последовательность можно представить следующим выражением [7]:

$$\begin{aligned} \delta_T(t) &= \delta(t) + \delta(t-T) + \delta(t-2T) + \dots + \delta(t-nT) + \dots \\ &+ \delta(t+T) + \delta(t+2T) + \dots + \delta(t+nT) + \dots = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT). \end{aligned}$$

Осуществим преобразование Фурье от периодической последовательности единичных импульсов и получим $\delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{in\omega_0 t}$, где $F_n = \int_{-T/2}^{T/2} \delta_T(t) e^{-in\omega_0 t} dt$. На интервале $\left(-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right)$ функция $\delta_T(t)$ есть единичный импульс $\delta(t)$. Следовательно,

$$F_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \delta(t) e^{-in\omega_0 t} dt.$$

В силу фильтрующего свойства единичного импульса [7] полученное соотношение оказывается равным $F_n = \frac{1}{T}$, т.е. постоянной величине. Это означает, что периодическая последовательность единичных импульсов с периодом T содержит составляющие с частотами $\omega=0, \pm\omega_0, \pm2\omega_0, \dots, \pm n\omega_0, \dots$ ($\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$) и одинаковой амплитудой $\delta_T(t) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in\omega_0 t}$.

Далее осуществим преобразование Фурье периодической функции из единичных импульсов $\delta_T(t)$, расположенных на частотах гармоник сигнала, с интенсивностями в 2π раз больше соответствующих коэффициентов экспоненциального ряда Фурье $F[f(t)] = 2\pi \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n \delta(\omega - n\omega_0)$. Так как в нашем случае $F_n = \frac{1}{T}$, то имеем

$$F[\delta_T(t)] = 2\pi \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{T} \delta(\omega - n\omega_0) = \frac{2\pi}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_0) = \omega_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_0) = \omega_0 \delta_{\omega_0}(\omega). \quad (2)$$

Полученное соотношение (2) устанавливает, что преобразование Фурье периодической последовательности единичных импульсов с периодом T есть последовательность единичных импульсов с одинаковыми амплитудами, разделенными интервалами ω_0 , рад $\left(\omega_0 = \frac{2\pi}{T}\right)$.

Полученные периодические последовательности единичных импульсов с периодами и их соответствующие преобразования Фурье показаны на рисунке 5.

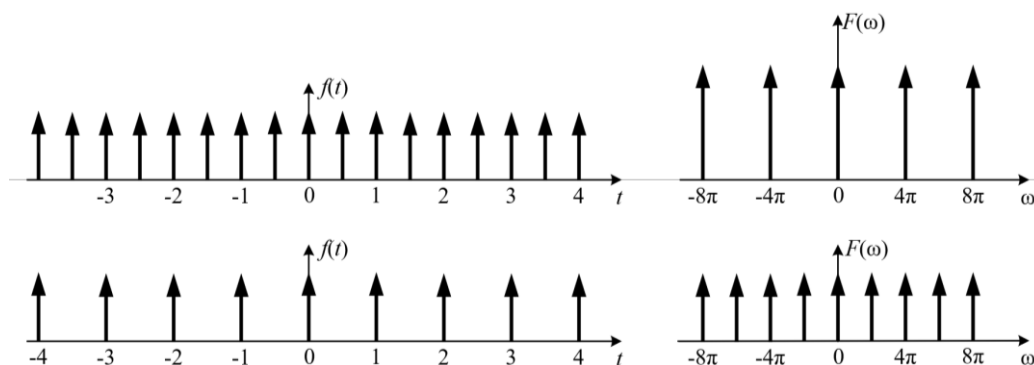


Рисунок 5. – Периодические последовательности единичных функций и их преобразование Фурье

Очевидно, что при увеличении периода частотный спектр становится плотнее, увеличивается частота дискретизации и снижаются ошибки квантования.

Таким образом, анализ тонкой структуры спектральных составляющих, обусловленных дискретным преобразованием аналоговых речевых сигналов показывает возникновение дополнительных каналов утечки информации, а также пути повышения точности оценки параметров сигналов при передаче.

Погрешность дискретизации можно оценить следующим образом:

$$\varepsilon(t) = x(t) - V(t), \tag{3}$$

где $x(t)$ – истинное значение сигнала;

$V(t)$ – полученное после восстановления.

Для оценки отклонений воспроизводимой функции $V(t)$ от сигнала $x(t)$ на интервале дискретизации чаще других используются следующие критерии [8]:

1) критерий наибольшего отклонения

$$\varepsilon_m = \max_{t \in \Delta T_i} |\varepsilon(t)| = \max_{t \in \Delta T_i} |x(t) - V(t)|,$$

где $\varepsilon(t)$ – текущая погрешность, определяемая выражением (3);

2) среднеквадратический критерий, определяемый выражением

$$\bar{\varepsilon}^2 = \sqrt{\frac{1}{\Delta T_i} \int_{\Delta T_i} \varepsilon^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T_i} \int_{\Delta T_i} |x(t) - V(t)|^2 dt},$$

3) интегральный критерий как мера отклонения $x(t)$ от $V(t)$, определяемый выражением

$$\bar{\varepsilon} = \int_{\Delta T_i} \varepsilon(t) dt.$$

4) вероятностный критерий, определяемый соотношением

$$p = \{ \varepsilon(t) < \varepsilon_0 \} = p_0,$$

где ε_0 – допустимое значение погрешности;

p_0 – допустимая вероятность того, что погрешность не превысит значения ε_0 .

В приведенных определениях критериев отклонений не приводится весовая функция. Введение весовой функции позволяет заменить истинную погрешность взвешенной. Для множества реализаций

критерий наибольшего отклонения может быть записан в виде $E_m = \sup\{\varepsilon_m\}$, где верхняя грань отыскивается по всем реализациям $x(t)$ и $V(t)$.

Заключение. Показано, что при преобразовании аналогового сигнала в цифровой и обратно операции АЦП и ЦАП не являются взаимно обратными с абсолютной точностью. Ошибки, обусловленные дискретным преобразованием аналоговых речевых сигналов, имеют собственное спектральное распределение, которое зависит от параметров АЦП, частоты и формы исходного сигнала.

Исследование тонкой структуры спектральных составляющих, обусловленных дискретным преобразованием аналоговых речевых сигналов, позволяет обнаруживать гармоники шума квантования в каналах утечки информации и судить о характеристиках передаваемого речевого сигнала. Наиболее значимые результаты получены с использованием разложения непрерывной функции на δ -функции.

Показано, что ограничение ошибок квантования требует повышения частоты дискретизации. При выборе равномерной частоты дискретизации большую роль играет выбор частоты отсчетов (шага дискретизации). В нашем случае при оценке каналов утечки информации в диапазоне речевого сигнала от 100 до 10 кГц для снижения погрешности квантования принято решение использовать частоту дискретизации 192 кГц (интервал дискретизации 5,2 мкс), что значительно повышает точность оценки параметров сложных сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение точности оценки параметров сложных сигналов при высокой частоте дискретизации. / В. К. Железняк [и др.] // Комплексная защита информации : материалы XXVI науч.-практ. конф., 25–27 мая 2021 г. – Минск. – 2021. – С. 89–93.
2. Достоверность оценки параметров сложных сигналов при дискретном преобразовании. / В. К. Железняк [и др.] // Комплексная защита информации : материалы XXVI науч.-практ. конф., 25–27 мая 2021 г. – Минск. – 2021. – С. 48–52.
3. Бессонов, Л. А. Линейные электрические цепи : учеб. пособие / Л. А. Бессонов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1974. – 320 с.
4. Некоторые проблемы оценки защищенности шума квантования / В.К. Железняк [и др.] // ВГАС «Проблемы инфокоммуникаций». – Минск. – 2020. – № 2(12). – С. 60–65.
5. Солодов, А. В. Теория информации и ее применение к задачам автоматического управления и контроля. / А. В. Солодов. – М. : Наука, 1967. – 432 с.
6. Давыдов, А. В. Сигналы и линейные системы. Тематические лекции / А. В. Давыдов – Екатеринбург : УГГУ : ИГиГ, 2005. – 262 с.
7. Основы автоматического управления / Под ред. В. С. Пугачева. – М. : Наука, 1974. – 720 с.
8. Темников, Ф. Е. Теоретические основы информационной техники : учеб. пособие для вузов / Ф. Е. Темников, В. А. Афомин, В. И. Дмитриев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1979. – 512 с.
9. Лахтин, Б. П. Системы передачи информации : пер. с англ. / Б. П. Лахтин ; под общ. ред. Б. И. Кувшинова. – М. : Связь, 1971. – 324 с.
10. Анцыферов, С. С. Общая теория измерений : учеб. пособие / С. С. Анцыферов, Б. И. Голубь Э; под ред. акад. РАН Н. Н. Евтихиева. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 176 с.
11. Цыпкин, Я. З. Основы теории автоматических систем : учеб. пособие. / Я. З. Цыпкин. – М. : Наука, 1977. – 560 с.

Поступила 16.11.2021

EVALUATION OF THE PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF THE SPEECH SIGNAL REPRESENTED BY A PERIODIC SEQUENCE OF DISCRETISATION PULSES

I. BURACHONAK, V. ZHELEZNYAK, S. LAVROV, A. FILIPOVICH, M. BARANOUSKI

The results of the research on the parameters and characteristics of a speech signal represented by a periodic sequence of discretisation pulses are presented. Shows how additional spectral components arise due to the discrete transformation of analogue speech signals and their dependence on analogue-to-digital conversion parameters. The fine structure of the signal is investigated for the detection of quantisation noise harmonics in the leakage channels. Methods to improve the evaluation quality of the transmitted speech signal parameters in the 100 to 10 kHz range with a sampling interval of 5.2 μ s are investigated.

Keywords: *speech signal, discrete conversion, quantisation noise, information leakage channels.*