

УДК 621.391

## Исследование статистических характеристик оцифрованных сигналов систем телекоммуникаций аудиообмена

Кропотов Ю. А., Белов А. А.

**Постановка задачи:** исследование статистических характеристик оцифрованных сигналов систем телекоммуникаций аудиообмена актуально. Разработан метод определения вероятности превышения оцифрованных отсчетов речевых сигналов порогового уровня квантования. Для решения данной задачи применено выражение распределения плотности вероятности отсчетов амплитуд речевых сигналов с пониженной погрешностью. Исследован вопрос вычисления дисперсии речевых сигналов с нефиксированным максимальным уровнем отсчетов. При этом применено известное значение дисперсии нормированных отсчетов речевых сигналов в цифровой форме. Исследовано влияние шумов квантования на отношение сигнал/шумы квантования при оцифровке речевых сигналов. **Используемые методы:** методы статистической радиотехники, теории вероятностей, теории радиотехнических цепей и сигналов, методы локальной аппроксимации. **Результаты:** в работе представлен метод вычисления вероятности превышения порогового уровня отсчетами оцифрованных речевых сигналов. Разработано выражение вычисления дисперсии при ненормированных значениях максимальных отсчетов речевых сигналов. Представлена зависимость отношения сигнал/шумы квантования от числа разрядов в кодовых последовательностях отсчетов речевых сигналов. **Практическая значимость:** получены выражения для вычисления статистических характеристик сигналов систем телекоммуникаций аудиообмена. Вышеуказанные выражения представлены в удобной для инженерной практики форме.

**Ключевые слова:** статистические параметры, оперативно-командные системы, вероятность превышения порога, телекоммуникационные системы, шумы квантования, отношение сигнал/шум.

### Введение

Современные оперативно-командные телекоммуникационные системы проектируются на цифровой элементной базе. Имеющиеся в них входные аналоговые сигналы соответственно оцифровываются, поэтому возникают некоторые особенности вычисления статистических параметров при обработке этих сигналов и при прохождении их в трактах проектируемых систем. Информация об этих параметрах влияет на структуру проектируемой системы, на алгоритмы обработки сигналов.

### Вероятность превышения отсчетов речевых сигналов $i$ -го интервала квантования порогового уровня

При исследовании зависимости вероятности превышения некоторого уровня  $i$ -го порогового интервала квантования для оцифрованных речевых сигналов, возможно применение выражения закона распределения плотности вероятностей отсчетов амплитуд речевых сигналов в виде [1, 2]

$$P(x_i) = \sum_{k=1}^M A_k e^{-\frac{|x_i|}{B_k}}, \quad (1)$$

где значения параметров функции аппроксимации закона распределения:  $M=3$ ,  $A_1=0,237038956$ ,  $A_2=0,033715075$ ,  $A_3=0,003135969$ ,  $B_1=0,47697697$

$B_2=7,739749293$ ,  $B_3=9,647790078$  [2, 4], погрешность аппроксимации составляет  $\varepsilon \leq 5\%$ .

Тогда вероятность превышения порогового уровня определяется по выражению

$$P_{\Sigma} = \sum_{i_{nop.}}^{2^n-1} P(x_i), \quad (2)$$

где  $i_{nop.}$  – номер интервала порогового уровня.

Если ввести нормирование максимальных уровней отсчетов по правилу  $|\pm x_{max}| = 1$ , то выражение вычисления интервала квантования принимает вид

$$\Delta = \frac{2 \cdot |\pm x_{max}|}{2^n} = 2^{-(n-1)}, \quad (3)$$

где  $n$  – число разрядов в кодовой последовательности отсчетов.

При принятии значения порога на уровне среднеквадратического отклонения речевых сигналов, то значение номера порогового интервала –  $i$ , или значение кода порогового уровня определяется выражением

$$i_{nop.} = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{\Delta} = \sigma \cdot 2^{n-1}. \quad (4)$$

При значениях  $n=8$ ,  $|\pm x_{max}|=1$ ,  $\sigma^2 = 0,126$  Вт [6],  $i_{nop.}=46$  ( $i_{nop.}=0010110$ ). Тогда вероятность превышения отсчетов речевых сигналов порогового уровня равного  $\sigma$  в соответствии с (2) принимает значение  $P_{\Sigma} \leq 0,0117$ . Таким образом, превышение отсчетов речевых сигналов порогового уровня равного их среднеквадратичному отклонению происходит с вероятностью не более 1,17%.

### Математическое ожидание и дисперсия оцифрованных отсчетов дискретизированных речевых сигналов

В работах [3, 4] значения статистических характеристик речевых сигналов получены при ограничениях на стационарность и эргодичность процесса. Представленная в работе [2] аппроксимация закона распределения вероятности отсчетов амплитуд речевых сигналов  $P(x_i)$  позволяет получить статистические параметры без учета вышеуказанных ограничений.

В этом случае математическое ожидание дискретизированного и квантованного на  $2^n$  интервалах сигнала определяется выражением

$$\bar{x}_n = \sum_{i=-(2^n-1)}^{2^n-1} x_i P(x_i), \quad (5)$$

тогда вычисленное значение математического ожидания оцифрованного речевого сигнала  $\bar{x}_n \approx 0$ .

Алгоритм исследования дисперсии оцифрованных речевых сигналов на тех же интервалах квантования, при  $\bar{x}_n = 0$ , определяется выражением

$$\sigma^2 = \sum_{i=-(2^n-1)}^{2^n-1} x_i^2 P(x_i). \quad (6)$$

С учетом нормирования максимальных значений отсчетов речевого сигнала по правилу  $|\pm x_{\max}| = 1$ , вычисленное значение дисперсии и соответственно мощности речевых сигналов на сопротивлении 1 Ом, будет равным  $\sigma^2 = P_c = 0,126$  Вт [6].

Если  $|\pm x_{\max}|$  – не нормировано, то интервал квантования  $\Delta_{np.}$  в соответствии с (4) определяется по выражению

$$\Delta_{np.} = \frac{2 \cdot |\pm x_{\max}|}{2^n} = |\pm x_{\max}| \cdot 2^{-(n-1)}, \quad (7)$$

в этом случае

$$\sigma_{np.}^2 = (i_{диск.} \cdot \Delta_{np.})^2 = i_{диск.}^2 \cdot \Delta_{np.}^2 = i_{диск.}^2 \cdot \frac{2^{2n} |x_{\max}|^2}{2^{2n}} = i_{диск.}^2 \cdot 2^{-2(n-1)} x_{\max}^2, \quad (8)$$

где  $i_{диск.}$  – номер интервала среднеквадратического отклонения речевых сигналов, в соответствии с (4) определяется выражением  $i_{диск.} = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{\Delta} = 2^{n-1} \sqrt{\sigma^2}$ ,  $\sigma^2$  – значение дисперсии речевого сигнала,  $\Delta = 2^{-(n-1)}$  – значение интервала квантования, при нормировке отсчетов речевых сигналов по правилу  $|\pm x_{\max}| = 1$ .

Тогда значения дисперсии речевых сигналов при ненормированном значении максимального уровня отсчетов вида  $|\pm x_{\max}|$ , в соответствии с (8) определяется выражением

$$\sigma_{np.}^2 = x_{\max}^2 \sigma^2. \quad (9)$$

Таким образом, получено удобное для инженерной практики выражение вычисления дисперсии речевых сигналов с произвольным значением максимальных отсчетов, при известном значении  $\sigma^2$  нормированных речевых сигналов.

### Шумы квантования оцифрованных речевых сигналов в системах телекоммуникаций аудиообмена

При выполнении оцифровки речевых сигналов в каждый дискретный момент времени  $t$  имеет место ошибка квантования  $d_i$ , представляющая собой разность соответствующих значений реального  $x$  и квантованного по уровню сигналов:

$$d_i = x - y_i,$$

где  $y_i$  – ближайший интервал квантования.

Последовательность  $d_i(k)$  – шумы квантования. Изменение значений  $d_i(k)$  – случайный процесс с нормальным законом распределения плотности вероятностей, пределы изменений  $d_i(k)$  в соответствии с выражением  $|d_i(k)| \leq \Delta$ .

Мощность шума квантования  $P_{кв}$  на единичном сопротивлении будет определяться как [6]

$$P_{кв} = d_i^2 = \sum_{i=1}^{2^n} \int_{y_i - \Delta/2}^{y_i + \Delta/2} (x - y_i)^2 P(x) dx, \quad (10)$$

где  $n$  – количество разрядов в цифровом коде, представляющим уровень отсчета сигнала,

$P(x)$  – распределение плотности вероятности уровней сигнала  $x$ ,

$|\Delta| = (y_i - y_{i+1})$  – интервал квантования.

Так как сравнение дискретного отсчета сигнала  $x$  и  $i$ -того интервала квантования осуществляется только в моменты, соответствующие дискретным интервалам времени, шумы квантования представляют собой последовательность дискретных отсчетов [7-9], поэтому выражение вычисления мощности шума квантования на конечном интервале из  $N$  отсчетов имеет вид

$$P_{ш.кв.} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - x_{кв.к}(i))^2, \quad (11)$$

где  $N$  – количество отсчетов в реализации;

$x_k$  – значение аналогового сигнала, соответствующее  $k$ -му отсчету;

$x_{кв.к}(i)$  – ближайший  $i$ -ый уровень квантования, соответствующий  $k$ -му отсчету.

Максимальное отклонение ошибки квантования может быть  $|x_k - x_{кв.к}| = \Delta$ .

Усредненное значение абсолютной ошибки по  $N$  отсчетам [6]

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |x_k - x_{кв.к}(i)| = \frac{\Delta}{2\sqrt{3}}. \quad (12)$$

Тогда выражение вычисления мощности шума квантования можно записать в следующем виде

$$P_{ш.кв.} = \sum_{i=-(2^n-1)}^{2^n-1} \bar{\Delta}^2 P(x_i) = \sum_{i=-(2^n-1)}^{2^n-1} \frac{\Delta^2}{12} P(x_i), \quad P_{ш.кв.} = \frac{\Delta^2}{12}. \quad (13)$$

Отношение  $\frac{P_c}{P_{ш.кв.}}$  в соответствии с (6) и (13) имеет вид

$$\frac{P_c}{P_{ш.кв.}} = \frac{\sum_{i=-(2^n-1)}^{2^n-1} x_i^2 P(x_i)}{\sum_{i=-(2^n-1)}^{2^n-1} \frac{\Delta^2}{12} P(x_i)} = \frac{12\sigma^2}{\Delta^2}, \quad (14)$$

где  $P_c = \sigma^2$ ,  $P_{ш.кв.} = \frac{\Delta^2}{12}$ , в соответствии с (6) и (13).

Значение  $P_{ш.кв.}$  в зависимости от числа разрядов  $n$  в цифровом коде отсчетов в соответствии с (13) имеет вид

$$P_{ш.кв.} = \frac{1}{3} 2^{-2n}. \quad (15)$$

Тогда выражение (14) можно привести к виду

$$\frac{P_c}{P_{ш.кв.}} = 3 \cdot 2^{2n} \sigma^2 \quad \text{или} \quad \frac{P_c}{P_{ш.кв.}} (\text{дБ}) = 10 \log 3 \cdot 2^{2n} \sigma^2. \quad (16)$$

Функция изменения отношения  $\frac{P_c}{P_{ш.кв.}}$  в дБ, в зависимости от числа разрядов в цифровом коде отсчета, представлена на рис. 1.

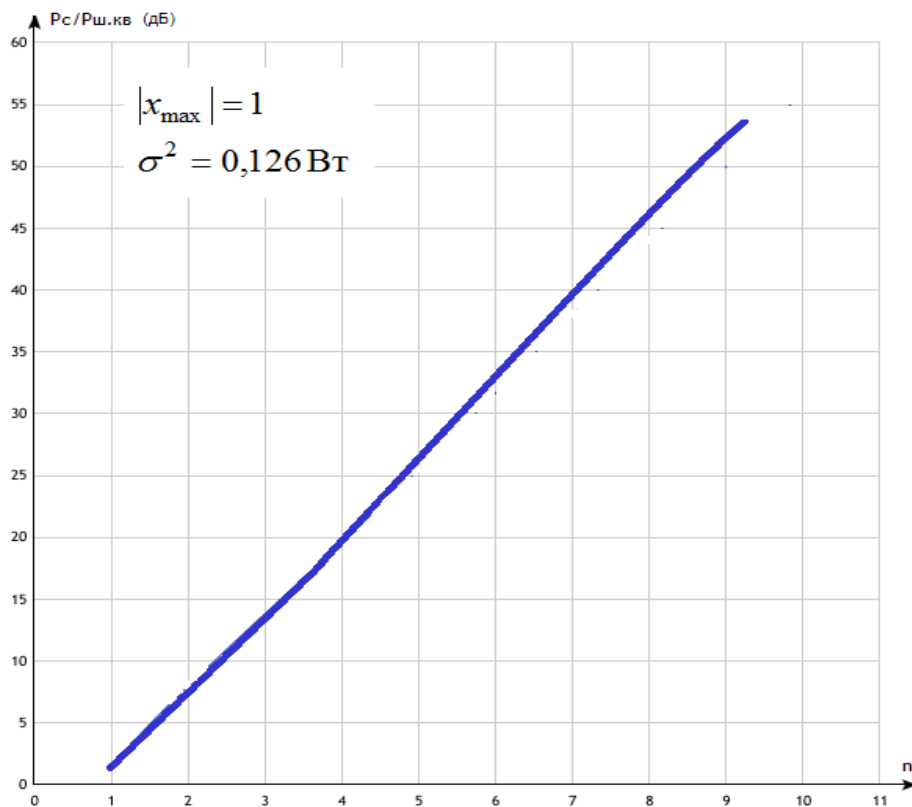


Рис. 1. Зависимость отношения сигнал/шум квантования от разрядности кодирования отсчетов сигналов

Результаты влияния шумов квантования на отношение  $\frac{P_{с.}}{P_{ш.кв.}}$ , получены при ограничениях:

- шум квантования является стационарным случайным процессом;
- шум квантования не коррелирован с отсчетами реализации  $x$ ;
- шум квантования не коррелирован в соседних интервалах.

При представлении отсчетов речевых сигналов восьмиразрядной кодовой последовательностью ( $n=8$ ) получаем отношение  $\frac{P_{с.}}{P_{ш.кв.}}=44$  дБ.

### Выводы

В результате представленных в работе исследований получены выражения вычисления вероятности превышения значений кодовых отсчетов речевых сигналов  $i$ -го интервала квантования порогового уровня, получено выражение значения дисперсии ненормированных отсчетов речевых сигналов. Получены результаты исследований влияния шумов квантования на отношение  $\frac{P_{с.}}{P_{ш.кв.}}$  в зависимости от числа разрядов в кодовых последовательностях отсчетов речевых сигналов. Представлен график зависимости  $\frac{P_{с.}}{P_{ш.кв.}}$  в децибелах от числа разрядов в кодовых последовательностях отсчетов речевых сигналов. Таким образом, получены в удобной для инженерной практики форме

вышеперечисленные выражения вычисления статистических характеристик сигналов в системах телекоммуникаций аудиообмена.

### Литература

1. Кропотов Ю. А., Кульков Я. Ю. Аппроксимация закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2006. № 11. С. 63–66.
2. Кропотов Ю.А., Быков А.А. Модель закона распределения вероятности амплитуд сигналов в базисе экспоненциальных функций системы передачи речевой информации // Проектирование и технология электронных средств. 2007. № 2. С. 30–34.
3. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Исследование математического ожидания, дисперсии и функции автокорреляции речевого сигнала // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. Рязань, 2005. – 170 с.
4. Кропотов Ю. А. Экспериментальные исследования закона распределения вероятности амплитуд сигналов системы передачи речевой информации // Проектирование и технология электронных средств. 2006. Т. 4. С. 37-42.
5. Прагер Э., Шимек Б., Дмитриев В. П. Цифровая техника в связи. – М.: Радио и связь, 1981. – 280 с.
6. Кропотов Ю. А. Статистические параметры сигналов при проектировании оперативно-командных телекоммуникационных систем // В мире научных открытий. 2010. № 6-1. С. 39–44.
7. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Алгоритм подавления акустических шумов и сосредоточенных помех с формантным распределением полос режекции // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. №1. С. 60–65.
8. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Аппроксимация закона распределения вероятности отсчетов сигналов акустических помех // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 2. С. 61–63.
9. Ермолаев В. А., Кропотов Ю. А. О корреляционном оценивании параметров моделей акустических эхо-сигналов // Вопросы радиоэлектроники. 2010. № 1. С. 46–50.

### References

- 1 Kropotov Y. A., Kulkov Y. Y. The Approximation a Regularity Distribution Probability Amplitudes of Speech Signals. *Radiotekhnika*, 2006, no. 11, pp. 63–66 (in Russia).
2. Kropotov Y. A., Bykov A.A. Model' zakona raspredeleniia veroiatnosti amplitud signalov v bazise eksponentsial'nykh funktsii sistemy peredachi rechevoi informatsii [Model of Law Probability Distribution of the Signal Amplitudes in the Basis of Exponential Functions of the Transmission Voice Information. *Proektirovanie i tehnologija jelektronnyh sredstv*, 2007, no. 2, pp. 30–34 (in Russia).
3. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Issledovanie matematicheskogo ozhidaniia, dispersii i funktsii avtokorreliatsii rechevogo signala [A Study of Mathematical



Expectation, Variance and Autocorrelation Function of the Speech Signal]. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie vychislitel'nyh sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.* Ryazan: Ryazan State Radio Engineering University Publ., 2005, 170 p. (in Russia).

4. Kropotov Y. A. Experimental Study of the Law of Probability Distribution of the Signal Amplitudes of the Transmission of Voice Information. *Proektirovanie i tehnologija jelektronnyh sredstv*, 2006. Vol. 4, pp. 37–42 (In Russia).

5. Prager I., Simek B., Dmitriev V.P. *Tsifrovaia tekhnika v sviazi* [Digital technology in communication]. Moscow, Radio i svjaz Publ., 1981, 280 p. (in Russia).

6. Kropotov Y. A. Statistical Parameters of Signals at Designing Operatively-Command Telecommunication Systems. *In the World of Scientific Discoveries*, 2010, no. 6-1, pp. 39–44 (in Russia).

7. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Algorithm of suppression of acoustic noise and the concentrated hindrances with formant band distribution rejection *Voprosy radiojelektroniki*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 60–65 (In Russia).

8. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Approximation of the Distribution Law of Probability of Countings of Signals of Acoustic Noise Interferences. *Radio and telecommunication systems*, 2011, no. 2, pp. 61–63 (In Russia).

9. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. On the Correlation Estimation of Parameters of Models of Acoustic Echo-Signals. *Voprosy radiojelektroniki, serija OT*, 2010, no. 1, pp. 46–50 (In Russia).

Статья поступила 8 ноября 2015 г.

### Информация об авторах

*Кропотов Юрий Анатольевич* – доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) «Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные информационно-управляющие системы. Тел.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

*Белов Алексей Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) «Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные системы мониторинга и прогнозирования, обработка информации. Тел.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Адрес: Россия, 602264, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

## Research of the Statistical Characteristics of Digitized Signals in Telecommunications Audio Exchange Systems

Y. A. Kropotov, A. A. Belov

**Purpose.** Research of the statistical characteristics of digitized signals of radio telecommunication systems is overdue. A method for determining the probability of exceeding the digitized samples of speech signals threshold quantization. To solve this problem we apply the expression of probability density distribution of the amplitudes of samples of speech signals with reduced accuracy. The question of calculating the dispersion of speech signals the maximum level of non-fixed samples. Thus using known dispersion value normalized samples of speech signals in digital form. The effect of quantization noise on the signal / quantization noise when digitizing speech signals. **Methods.** Methods of statistical radio engineering, probability theory, theory of radio circuits and signals, the local approximation. **Results.** This paper presents a method for calculating the probability of exceeding the threshold of digitized samples of speech signals. Developed by the variance in the expression of non-normalized value of the maximum sample speech signals. The dependence of the signal / noise quantization of the number of digits in the code sequence of samples of speech signals. **Practical significance.** Obtained the expression for the calculation of the statistical characteristics of the signals of telecommunication systems audio exchange. The above expressions are presented in a convenient form for engineering practice.

*Key words:* statistical parameters, operational and command systems, the probability of exceeding the threshold, telecommunications systems, quantization noise, signal/noise ratio.

### Information about Authors

*Yurij Anatolievich Kropotov* – Dr. habil. of Technical Sciences, Professor. Head of Chair «Electronics and Computer Science». Murom institute (branch) of the «Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs». Field of research: telecommunication information and control systems. Ph.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

*Alexey Anatolievich Belov* – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Associate Professor at the Department of «Electronics and Computer Science». Murom institute (branch) of the «Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs». Field of research: telecommunications monitoring and forecasting system, information processing. Ph.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Address: Russia, 602264, Murom, st. Orlovskaya, h. 23.