

9. Wang W., Swamy M.N., Ahmad M.O. RNS application for digital image processing. *4th IEEE international workshop on system-on-chip for real-time applications*, 2004. pp. 77–80. doi: 10.1109/IWSOC.2004.1319854
10. Taleshmekaeil D.K., Mohamamdzadeh H., Mousavi A. Using residue number system for edge detection in digital images processing. *IEEE 3rd international conference on communication software and networks*, 2011. pp. 249–253. doi: 10.1109/ICCSN.2011.6014044
11. Molahosseini A.S., Sorouri S., Zarandi A.A. Research Challenges in Next-Generation Residue Number System Architectures. *The 7th International Conference on Computer Science & Education*, 2012. pp. 1658–1661. doi: 10.1109/ICCSE.2012.6295382
12. Younes D., Steffan P. A comparative study on different moduli sets in residue number system. *IEEE international conference on computer systems and industrial informatics*, 2012. pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCSII.2012.6454344
13. Wang W., Swamy M. N., Ahmad M. O., Wang Y. A high-speed residue-to-binary converter for three-modul $(2^k, 2^k - 1, 2^{k-1} - 1)$ RNS and a scheme for its VLSI implementation. *IEEE Trans. on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing*, 2000, no. 12. pp. 1576–1581. doi: 10.1109/82.899659
14. Taleshmekaeil D. K., Mousavi A. The use of residue number system for improving the digital image processing. *IEEE 10th International Conference on Signal Processing*, 2010. pp. 775–780.
15. Younes D., Steffan P. Efficient image processing application using Residue Number System. *20th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, 2013. pp. 20 – 22.
16. Parhami B. *Computer Arithmetic: Algorithms and Hardware Designs*. New York, Oxford University Press, 2010. 641 p.
17. Meyer-Baese U. *Digital Signal Processing with Field Programmable Gate Arrays*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001. 422 p.
18. Salomon D. *Data Compression*. Springer-Verlag London, 2007. 1092 p.
19. Huynh-Thu Q., Ghanbari M. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment. *Electronics Letters*, 2008, no. 13. pp 800–801. doi: 10.1049/el:20080522
20. Wang Z. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions image processing*, 2004, no. 4. pp. 600–612. doi: 10.1109/TIP.2003.819861

Received 22.04.2016

УДК 621.39

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕШАЮЩЕЙ ФУНКЦИИ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ЧАСТОТНЫХ ИНТЕРВАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ

Жиляков Е.Г., Белов С.П., Медведева А.А., Курлов А.В., Лихолоб П.Г.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, РФ

E-mail: zhilyakov@bsu.edu.ru

В статье представлены результаты исследования метода определения информационных частотных интервалов на основе сравнения с адаптивно определяемым пороговым значением. Определена зависимость вероятности ошибочного определения информационных частотных интервалов от уровня энергии накладываемого шума. Результаты сравнения предлагаемого подхода с методом, основанным на задании доли энергии, свидетельствуют о целесообразности использования адаптивного порога для определения информационных частотных интервалов в задачах анализа речевых сигналов.

Ключевые слова: речевой сигнал, субполосный анализ, частотное распределение, информационные частотные интервалы, сосредоточенность.

Речевые сообщения являются одной из наиболее часто используемых форм информационного обмена. Кроме непосредственного обмена речевыми сообщениями, в настоящее время существенное значение приобрели технологии, обеспечивающие речевой информационный об-

мен на расстоянии, включая создание хранилищ речевых данных различного назначения, а также голосовое управление, преобразование речевых сообщений в текст и др. При реализации различных систем обработки речи речевой сигнал подвергается анализу с целью выделения определен-

ных признаков, необходимых для дальнейших преобразований.

В настоящее время анализ речевых сигналов, как правило, осуществляется за счет перехода в частотную область и использования дискретного преобразования Фурье. Однако следует иметь в виду, что дискретное преобразование Фурье является вариантом разложения сигналов по ортонормированному базису специального вида и не позволяет в полной мере описать распределение энергий отрезков РС по частотным интервалам.

Адекватным подходом к анализу отрезков речевых сигналов является субполосный анализ, суть которого заключается в соотношении свойств отрезков речевых сигналов с разбиением оси частот на интервалы конечной ширины [1]. Одной из субполосных характеристик отрезков речевых сигналов $\vec{x}_N = (x_1, \dots, x_N)^T$ в субполосном анализе является значение энергии, сосредоточенной в заданном r -ом частотном диапазоне, которая может быть вычислена, не переходя в частотную область, с использованием выражения [2]:

$$P_r(\vec{x}_N) = \vec{x}_N^T A_r \vec{x}_N. \quad (1)$$

Здесь $A_r = \{a_{ik}^r\}, i, k = 1, \dots, N$ – субполосная матрица для r -го частотного диапазона, элементы которой определяются по формуле:

$$\begin{aligned} a_{ik}^r &= (\sin(V_{2r}(i-k)) - \sin(V_{1r}(i-k)))/(\pi(i-k)); \\ a_{ii}^r &= (V_{2r} - V_{1r})/\pi. \end{aligned} \quad (2)$$

Вычисление значения энергии в частотном интервале можно ускорить, если использовать представление вида:

$$P_r(\vec{x}_N) = \sum_{k=1}^J \lambda_k^r \alpha_{kr}^2(\vec{x}_N), \quad (3)$$

где λ_k^r – собственные числа субполосной матрицы A_r ; $\alpha_{kr}(\vec{x}_N)$ – скалярные произведения (проекции)

$$\alpha_{kr}(\vec{x}_N) = (\vec{x}_N, \vec{q}_k^r) = \sum_{i=1}^N x_i q_{ik}^r, \quad (4)$$

q_{ik}^r – значения собственных векторов субполосной матрицы A_r .

Используя свойства собственных векторов и чисел субполосных матриц, соотношения (4) можно преобразовать к виду

$$\alpha_{2k-1,r}(\vec{x}_N) = \sum_{i=1}^N z_{ki} \cos(\omega_r(i-1)),$$

$$\alpha_{2k,r}(\vec{x}_N) = \sum_{i=1}^N z_{ki} \sin(\omega_r(i-1)), \quad k = 1 \dots J/2, \quad (5)$$

где

$$z_{ki} = x_i q_{ik}^0, \quad k = 1, \dots, J/2; i = 1, \dots, N, \quad (6)$$

а q_{ik}^0 – значения собственных векторов субполосной матрицы с элементами вида:

$$\begin{aligned} a_{ik}^0 &= \sin(V_{20}(i-k))/\pi(i-k), \\ a_{ik}^r &= 2a_{ik}^0 \cos(\omega_r(i-k)), \\ \omega_r &= 4r\pi/N, \quad r = 1 \dots R. \end{aligned} \quad (7)$$

При этом предполагается использовать следующее разбиение частотной оси:

$$\begin{aligned} V_{10} &= 0; \quad V_{20} = 2\pi/N; \\ V_{1r} &= V_{2,r-1}; \quad V_{2r} = V_{1r} + 4\pi/N, \quad r = 1 \dots R; \\ R &= N/4, \end{aligned} \quad (8)$$

где R – число интервалов, на которые разбивается ось частот; N – длительность отрезка анализа (отсчетов). Описанная конфигурация частотных интервалов представлена на рис. 1.

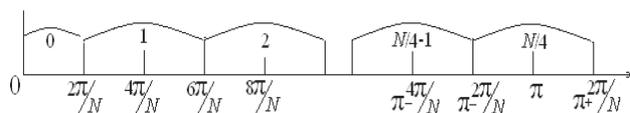


Рис. 1. Конфигурация частотных интервалов «без перекрытия»

Для ускорения вычисления скалярных произведений (5) может быть использован алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ).

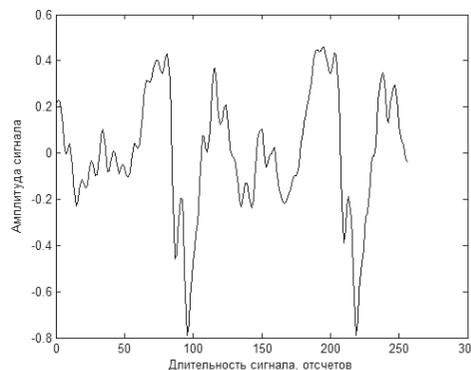


Рис. 2. Фрагмент речевого сигнала, порожденного звуком «а» ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$)

Исследование особенностей распределения энергии по частотным интервалам для различных звуков русской речи показало, что разные звуки

русской речи имеют различное распределение. На рис. 2-7 представлены фрагменты речевых сигналов, соответствующих различным звукам русской речи, записанным при частоте дискретизации $f_d = 16$ кГц и разрядности кода 16 бит, а также распределение энергии по частотным интервалам для этих фрагментов.

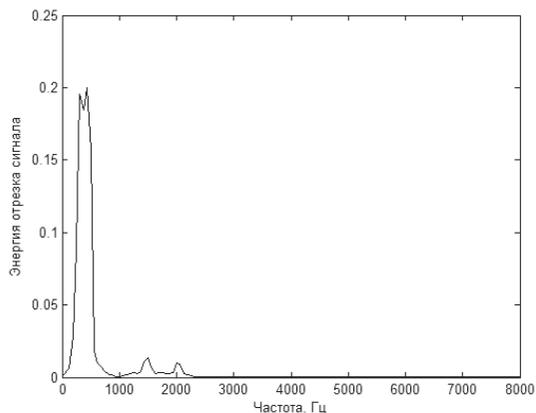


Рис. 3. Распределение энергии фрагмента речевого сигнала, порожденного звуком «а» ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$, $R = 128$)

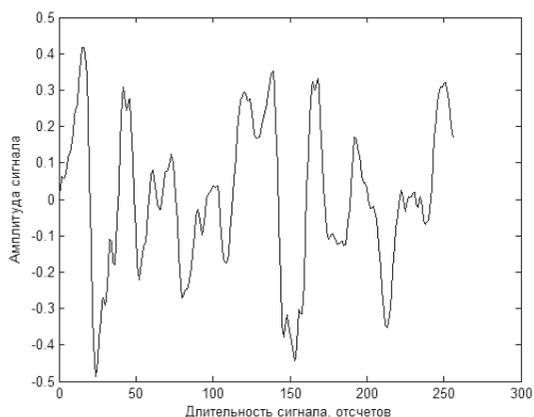


Рис. 4. Фрагмент речевого сигнала, порожденного звуком «р» ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$)

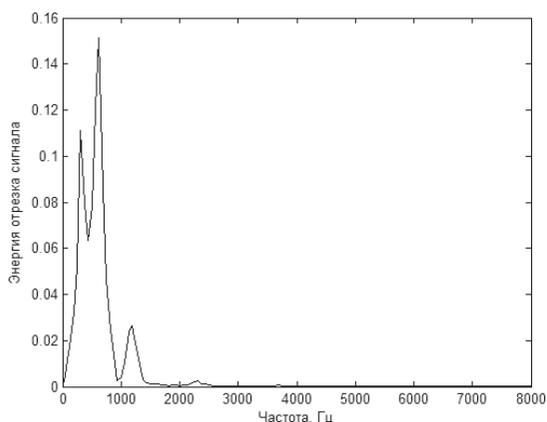


Рис. 5. Распределение энергии фрагмента речевого сигнала, порожденного звуком «р» ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$, $R = 128$)

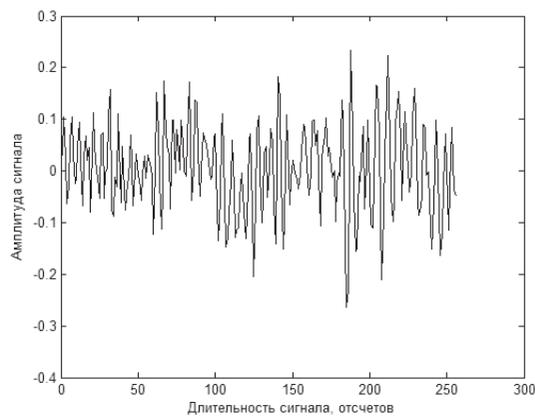


Рис. 6. Фрагмент речевого сигнала, порожденного звуком «ч» ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$)

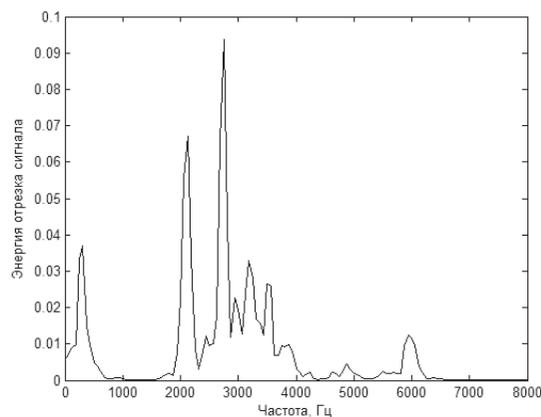


Рис. 7. Распределение энергии фрагмента речевого сигнала, порожденного звуком «ч» ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$, $R = 128$)

Из приведенных рисунков видно, что основная энергия одних звуков речи сосредоточена в низкочастотной области, у других – основная энергия сосредоточена в области средних частот. Кроме того, отличается количество интервалов, в которых содержится основная энергия речевого сигнала. Очевидно, что те интервалы, в которых сосредоточена большая доля энергии, и влияют на звучание отрезка сигнала. Такие интервалы логично называть информационными. Ранее к информационным частотным интервалам предлагалось относить такие частотные интервалы с наибольшей долей энергии, для которых выполнялось неравенство [3]:

$$f_{NR}^m = \min d_{NR}^m. \quad (9)$$

Здесь выполняется неравенство:

$$\sum_{k=1}^{d_{NR}^m} P(k, N) \geq m \|\bar{x}_N\|^2 = m \sum_{i=1}^N x_i^2, \quad (10)$$

где \bar{x}_N – анализируемый отрезок сигнала, m – заданное значение доли энергии сигнала, $P_{(k),N}$ – упорядоченные по убыванию значения энергии сигнала, попадающих в заданные частотные интервалы, то есть

$$P_{(k),N} \in \{P_{rN}, r = 1, \dots, R\};$$

$$P_{(k+1),N} \leq P_{(k),N}, k = 1 \dots R,$$
(11)

где P_{rN} – значения энергии сигнала, попадающей в заданные частотные интервалы, определяемые с помощью (3). При использовании данного подхода необходимо выбрать требуемую задаваемую долю энергии m , значение которой зависит от решаемой задачи.

Экспериментальные исследования показали, что данный параметр целесообразно выбирать из интервала 0,8 ... 0,99. Однако от выбора значения доли энергии будет зависеть, сколько и какие интервалы будут отнесены к информационным, а какие – к неинформационным. В рамках данной работы в качестве информационных частотных интервалов предлагается выбирать те частотные интервалы, энергия которых превышает среднее значение энергии, приходящееся на интервал заданной ширины анализируемого отрезка сигнала.

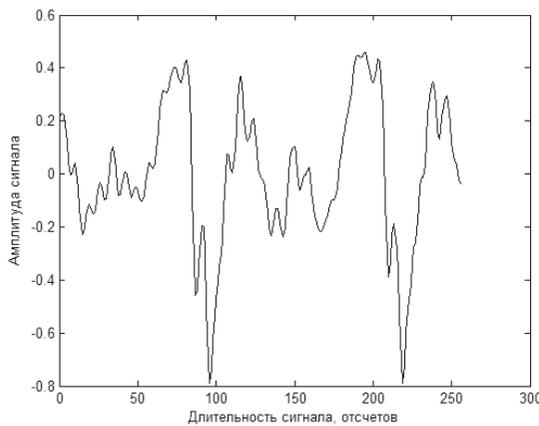


Рис. 8. Фрагмент речевого сигнала, порожденного звуком «а» ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$)

Пусть нулевая гипотеза H_0 – частотный интервал анализируемого отрезка сигнала не является информационным. Тогда конкурирующая гипотеза H_1 – частотный интервал анализируемого отрезка сигнала является информационным. В качестве решающего правила предлагается использовать неравенство:

$$P_r(\bar{x}_N) > \|\bar{x}_N\|^2 \cdot (V_{2r} - V_{1r}) / \pi.$$
(12)

Если условие (12) выполняется, то гипотеза H_0 отвергается и анализируемый частотный интер-

вал целесообразно обрабатывать как информационный. В противном случае гипотеза H_0 принимается и анализируемый частотный интервал принимается как неинформационный.

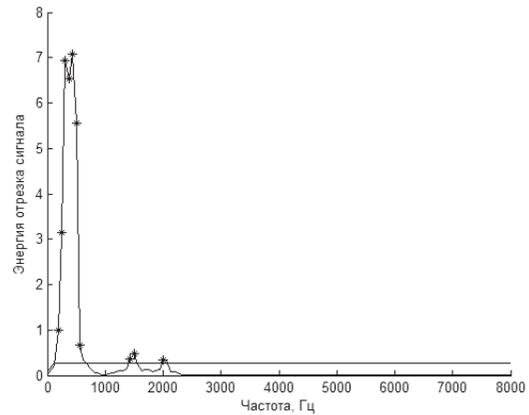


Рис. 9. Распределение энергии фрагмента речевого сигнала, порожденного звуком «а» ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$, $R = 128$)

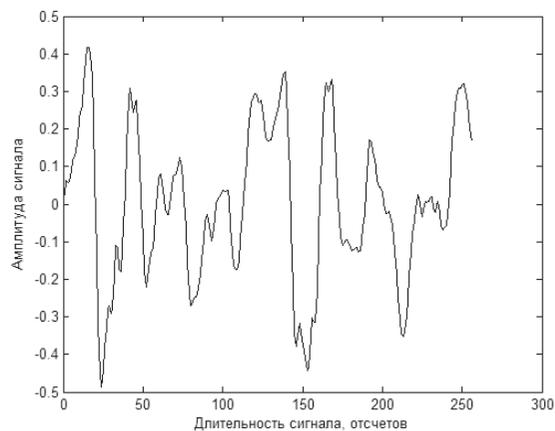


Рис. 10. Фрагмент речевого сигнала, порожденного звуком «р» ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$)

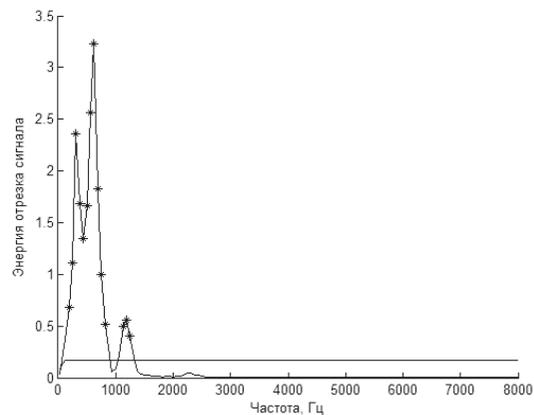


Рис. 11. Распределение энергии фрагмента речевого сигнала, порожденного звуком «р» ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$, $R = 128$)

На рис. 8-13 представлены фрагменты речевых сигналов, соответствующих различным зву-

кам русской речи, а также распределение энергии по частотным интервалам.

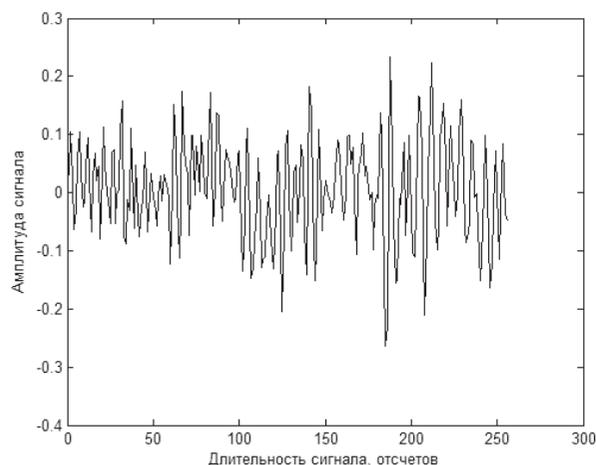


Рис. 12. Фрагмент речевого сигнала, порожденного звуком «ч» ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$)

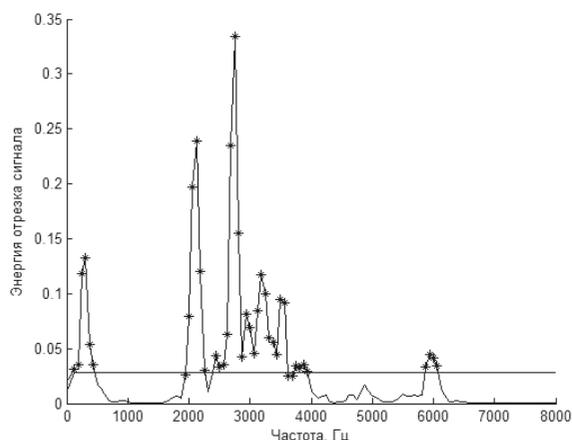


Рис. 13. Распределение энергии фрагмента речевого сигнала, порожденного звуком «ч» ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$, $R = 128$)

Как видно, из рис. 8-13, частотные интервалы, определенные как информационные в соответствии с выражением (9)-(10) (на рисунках отмечены звездочкой), практически все совпадают с информационными частотными интервалами, определенными на основе соотношения (12) (на рисунках интервалы, энергия которых превышает порог, представленный прямой линией).

Однако воздействие шума на анализируемые фрагменты сигналов может привести к неверному определению информационных частотных интервалов. На рис. 14-17 представлены фрагменты речевых сигналов и распределение энергии по частотным интервалам с указанием информационных, до и после воздействия шума.

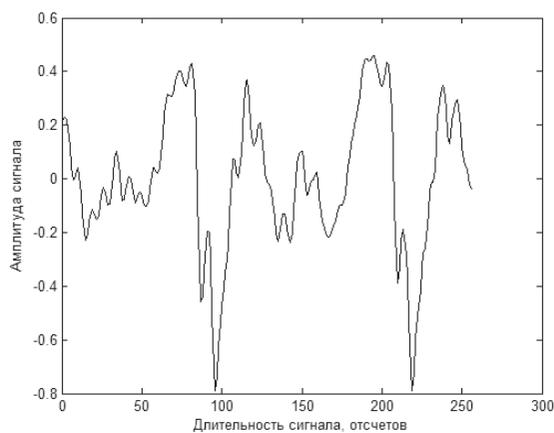


Рис. 14. Фрагмент речевого сигнала, порожденного звуком «а» без шума ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$)

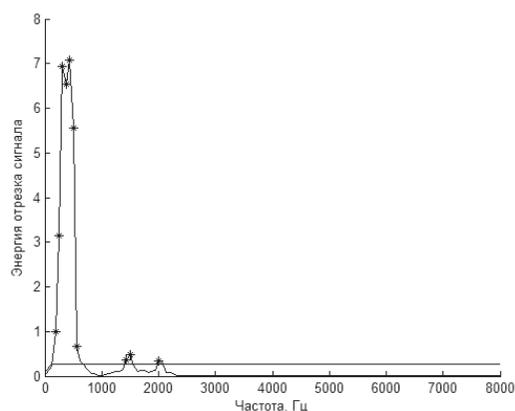


Рис. 15. Распределение энергии фрагмента речевого сигнала, порожденного звуком «а» без шума ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$, $R = 128$)

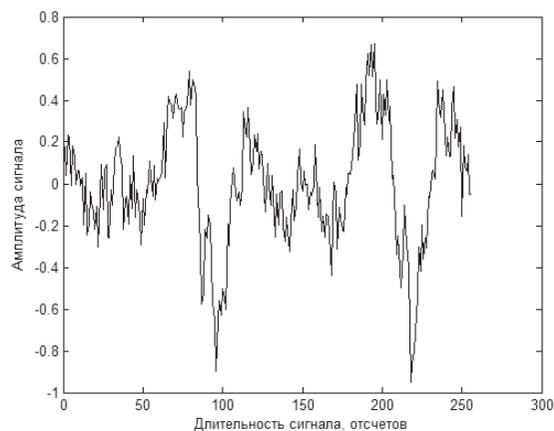


Рис. 16. Фрагмент речевого сигнала, порожденного звуком «а» с добавлением шума ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$)

Сравнение результатов, представленных на рис. 15 и 17, показывает, что в случае добавления шума вид распределения энергии по частотным интервалам меняется незначительно, но при этом использование метода, основанного на задании

основной доли энергии, приводит к тому, что частотные интервалы, определенные ранее как неинформационные, теперь относятся к информационным. В свою очередь, при использовании предлагаемого подхода, основанного на сравнении с адаптивным пороговым значением, информационные интервалы определяются таким же образом, как и при отсутствии шума.

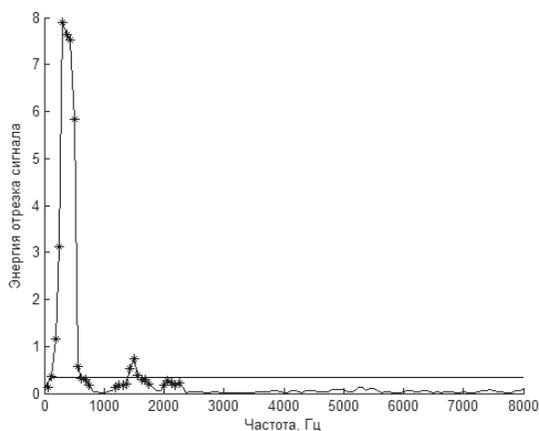


Рис. 17. Распределение энергии фрагмента речевого сигнала, порожденного звуком «а» с добавлением шума ($f_d = 16$ кГц, $N = 256$, $R = 128$)

Для выявления чувствительности определения информационных частотных интервалов к воздействию аддитивного шума были оценены вероятности ошибочного определения информационных частотных интервалов для различных звуков русской речи при разных отношениях «шум/сигнал». При этом оценивались две вероятности: вероятность ошибок первого и второго рода:

$$P_{ou1} = \tilde{N}_{инф} / N_{все_неинф}; \quad (13)$$

$$P_{ou2} = 1 - N_{инф} / N_{все_инф}, \quad (14)$$

где $\tilde{N}_{инф}$ – число частотных интервалов, ошибочно отнесенных к информационным; $N_{все_неинф}$ – число неинформационных частотных интервалов, использованных для исследования; $N_{инф}$ – число частотных интервалов, верно отнесенных к информационным; $N_{все_инф}$ – число информационных частотных интервалов, использованных для исследования. Информационные и неинформационные частотные интервалы, используемые для исследования, определялись при отсутствии шумов.

В таблицах 1 и 2 представлены результаты оценки вероятностей первого и второго рода при использовании разных подходов к определению

информационных частотных интервалов для различных длительностей отрезков анализа.

Таблица 1. Значения вероятностей ошибочного принятия решения при различных значениях отношения «шум/сигнал» ($N = 128$)

Отношение «шум/сигнал»	P_{ou1}		P_{ou2}	
	метод 1 $m = 0,9$	метод 2	метод 1 $m = 0,9$	метод 2
0,1	0,1300	0,0132	0,0079	0,0026
0,2	0,1282	0,0287	0,0294	0,0052
0,3	0,1253	0,0424	0,0804	0,0083
0,4	0,1253	0,0559	0,1900	0,0119
0,5	0,1282	0,0689	0,3055	0,0164
0,6	0,1329	0,0815	0,3942	0,0235
0,7	0,1385	0,0939	0,4599	0,0362
0,8	0,1445	0,1061	0,5091	0,0553
0,9	0,1507	0,1182	0,5467	0,0794
1,0	0,1568	0,1299	0,5757	0,1060

Таблица 2. Значения вероятностей ошибочного принятия решения при различных значениях отношения «шум/сигнал» ($N = 256$)

Отношение «шум/сигнал»	P_{ou1}		P_{ou2}	
	метод 1 $m = 0,9$	метод 2	метод 1 $m = 0,9$	метод 2
0,1	0,0774	0,0142	0,0081	0,0028
0,2	0,0771	0,0289	0,0296	0,0058
0,3	0,0762	0,0447	0,0825	0,0088
0,4	0,0773	0,0605	0,1987	0,0124
0,5	0,0809	0,0762	0,3146	0,0170
0,6	0,0862	0,0916	0,4017	0,0242
0,7	0,0923	0,1065	0,4658	0,0367
0,8	0,0991	0,1210	0,5136	0,0555
0,9	0,1059	0,1349	0,5498	0,0791
1,0	0,1127	0,1485	0,5779	0,1053

В таблицах 1 и 2 под методом 1 понимается метод, основанный на (9)-(10), а под методом 2 – метод, основанный на использовании (12). Из результатов, представленных в таблицах, видно, что метод 2, основанный на адаптивном определении порогового значения, более устойчив к воздействию на отрезок сигнала аддитивными помехами. Использование данного метода позво-

лит обеспечить определение информационных частотных интервалов с вероятностью ошибочного принятия решения не более 0,15. Наиболее опасными являются ошибки второго рода, когда информационные частотные интервалы ошибочно относятся к неинформационным. Как видно, из результатов, представленных в таблицах 1 и 2, при любых параметрах отношения «шум/сигнал» и длительности отрезка анализа вероятность ошибки второго рода меньше у метода, основанного на использовании адаптивного порогового значения. Кроме того, результаты исследования показывают, что изменение длительности отрезка анализа не оказывает существенного влияния на устойчивость предлагаемого метода к появлению аддитивных шумов.

Таким образом, целесообразно использовать предлагаемый подход к определению информационных частотных интервалов при решении задач анализа и обработки речевых сигналов. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-07-01463 «Разработка методов и алгоритмов автоматического распознавания устной речи

с использованием субполосного анализа речевых сигналов».

Литература

1. Жиляков Е.Г., Белов С.П., Черноморец А.А. Вариационные методы анализа сигналов на основе частотных представлений // Вопросы радиоэлектроники. Т.4. – Вып.1, 2010. – С. 10-25.
2. Жиляков Е.Г., Белов С.П., Белов А.С., Фирсова А.А. О сегментации речевых сигналов на однородные отрезки // Научные ведомости БелГУ. Серия Экономика. Информатика. Т.34 – №7-1. – 2015. – С. 194-199.
3. Жиляков Е.Г., Белов С.П., Белов А.С., Фирсова А.А., Глушак А.В. Об эффективности различных подходов к сегментации речевых сигналов на основе обнаружения пауз // Научные ведомости БелГУ. Серия Информатика. Т.7. – № 14-1-1, 2010. – С. 187-193.

Получено 20.02.2016

Жиляков Евгений Георгиевич, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой информационно-телекоммуникационных систем и технологий (ИТСТ) Белгородского государственного национального исследовательского университета (БелГУ). Тел. (8-472) 230-13-92. E-mail: zhilyakov@bsu.edu.ru

Белов Сергей Павлович, д.т.н., профессор Кафедры ИТСТ БелГУ. Тел. 8-980-323-61-04. E-mail: belov@bsu.edu.ru.

Медведева Александра Александровна, к.т.н., старший преподаватель Кафедры ИТСТ БелГУ. Тел. 8-960-637-55-23. E-mail: medvedeva_aa@bsu.edu.ru

Курлов Александр Васильевич, старший преподаватель Кафедры ИТСТ БелГУ. Тел. (8-472) 230-13-00 (21 74). E-mail: kurlov@bsu.edu.ru

Лихолоб Петр Георгиевич, старший преподаватель Кафедры ИТСТ БелГУ. Тел. (8-472) 230-13-00 (21-74). E-mail: likholob@bsu.edu.ru

RESEARCH OF DECISION FUNCTION SENSITIVITY DURING FREQUENCY BAND DETECTION UNDER NOISE INFLUENCE

*Zhilyakov E.G., Belov S.P., Medvedeva A.A., Kurlov A.V., Likholob P.G.
Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation,
E-mail: zhilyakov@bsu.edu.ru*

Voice signal analysis and processing techniques are main directions in the field of voice technologies. Here the frequency analysis is widely used for voice signal processing. Various voice sounds differ by distribution of energy along a frequency axis. At the same time, there is a good reason to consider only frequency bands that possess the main energy of signal division that is so-called information frequency band. We propose to apply method for information frequency band detection based on comparison with adaptively defined threshold. It is clear that additive noise will change energy distribution over frequency domain. This work presents results of researches of information frequency band wrong detection probability value dependence on signal-to-noise ratio. In addition, we present results of comparison between proposed method and method based on energy part setting. Those obtained research results demonstrate the method based on using of adaptive threshold is resistant to additive noise.

Keywords: speech signal, subband analysis, frequency distribution, information frequency intervals, concentration

DOI: 10.18469/ikt.2016.14.2.02

Zhilyakov Evgeny Georgiyevich, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation; the Head of Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel.: +74722301392. E-mail: zhilyakov@bsu.edu.ru.

Belov Sergey Pavlovich, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation; Professor of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel.: +79803236104. E-mail: belov@bsu.edu.ru.

Medvedeva Aleksandra Aleksandrovna, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation; Senior Teacher of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, PhD in Technical Sciences. Tel.: +79606375523. E-mail: medvedeva_aa@bsu.edu.ru.

Kurlov Aleksandr Vasilievich, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation; Senior Teacher of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies. Tel.: +74722301300(2174). E-mail: kurlov@bsu.edu.ru.

Likholob Petr Georgiyevich, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation; Senior Teacher of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies. Tel.: +74722301300(2174). E-mail: likholob@bsu.edu.ru.

References

1. Zhilyakov E.G., Belov S.P., Chernomorets A.A. Variacionnye metody analiza signalov na osnove chastotnyh predstavlenij [Variational methods of signal analysis on basis of frequency representation]. *Voprosy radioelektroniki*, 2010, vol. 4, no. 1, pp. 10-25.
2. Zhilyakov E.G., Belov S.P., Belov A.S., Firsova A.A. O segmentacii rechevyh signalov na odnorodnye otrezki [About segmentation of voice signals into uniform segments]. *Nauchnye vedomosti BelGU. Seriya Jekonomika. Informatika*, 2015, vol. 34, no. 7-1, pp. 194-199.
3. Zhilyakov E.G., Belov S.P., Belov A.S., Firsova A.A., Glushak A.V. Ob jeffektivnosti razlichnyh podhodov k segmentacii rechevyh signalov na osnove obnaruzhenija pauz [Effectiveness of different approaches to segmentation of speech signals based on the pauses detection]. *Nauchnye vedomosti BelGU. Seriya Jekonomika. Informatika*, 2015, vol. 7, no. 14-1-1, pp 187-193.

Received 20.02.2016

ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 535.31; 681.7; 53.082.5

РЕЗУЛЬТАТЫ ЗАПИСИ ВОЛОКОННЫХ БРЕГГОВСКИХ РЕШЕТОК НА КВАРЦЕВЫХ ГРАДИЕНТНЫХ МНОГОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ РАЗНЫХ ПОКОЛЕНИЙ

*Бурдин А.В.¹, Василец А.А.², Бурдин В.А.¹, Морозов О.Г.², Кузнецов А.А.², Нуреев И.И.²,
Фасхутдинов Л.И.², Кафарова А.М.¹, Минаева А.Ю.¹, Севрук Н.Л.¹*

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, РФ
E-mail: bourdine@yandex.ru

Работа посвящена сравнительному анализу результатов записи волоконных решеток Брэгга (ВРБ) на кварцевых телекоммуникационных многомодовых оптических волокнах 50/125 разного поколения. Представлен выбор и обоснование технологии записи ВРБ на многомодовых волоконных световодах, отличающихся, в том числе, градиентным профилем показателя преломления и увеличенным, по сравнению со стандартными одномодовыми волокнами, диаметром сердцевины. Анализ полученных результатов позволил разработать практические рекомендации по записи ВРБ на волокнах указанного типа, которые также представлены в данной публикации.