



ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.415.24

ОБ ОДНОЗНАЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИДЕНТИФИКАЦИОННО-ЗНАЧИМОЙ ЧАСТОТНОЙ ПОЛОСЫ В ЗВУКАХ РУССКОЙ РЕЧИ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ВЛИЯНИЮ ШУМА

ON THE UNIQUENESS OF CERTAIN IDENTIFYING SIGNIFICANT FREQUENCY BANDS IN THE SOUND RUSSIAN SPEECH EXPOSED TO NOISE

Е. Г. Жиляков, П.Г. Лихолоб, А.В. Курлов, А.А. Медведева
E.G. Zhilyakov, P.G. Likholob, A.V. Kurlov, A.A. Medvedeva

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85*

Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

e-mail: Zhilyakov@bsu.edu.ru, Likholob@bsu.edu.ru, Kurlov@bsu.edu.ru, Medvedeva_aa@bsu.edu.ru

Аннотация. В работе описано применение моделей звуков русской речи для задач шумоочистки, сжатия, стеганографического кодирования с позиции субполосных представлений. Введены критерии, влияющие на определение частотной полосы, доступной для изменения. Введено понятие «частотный потенциал». Представлен способ оценки частотного потенциала отрезка речевого сигнала. В статье представлены результаты исследования влияния шума на величину частотного потенциала различных звуков русской речи.

Resume. The paper describes the use of Russian speech sounds models for noise suppression tasks, compression, steganographic encoding position subband representations. Introduced criteria that influence the determination of the frequency band available for change. The concept of frequency potential. The way of evaluating the frequency potential of the speech signal segment. The article presents the results of a study of noise impact on the value of the frequency potential of different sounds of Russian speech.

Ключевые слова: речевые данные, частотная полоса, частотный интервал, часть энергии, субполосная матрица, субполосный анализ, идентификационно-значимая частотная полоса, порог, частотный потенциал.

Key words: voice data, frequency band, the frequency interval of the energy matrix of the subband, subband analysis, identification, significant frequency band, the threshold frequency potential.

Человек для информационного обмена достаточно часто использует устную речь. Осуществляя информационный обмен на расстоянии, нередко устную речь преобразуют в речевые данные. Под речевыми данными будем понимать цифровую фиксацию в дискретные моменты времени аудио-сигнала, порождаемого устной речью на выходе микрофона. Естественно предположить, что результат воспроизведения речевых данных будет отличаться от исходного звучания устной речи. Уменьшение отличия между исходной речью и результатом ее цифрового представления является важным аспектом при решении различных задач, направленных на повышение качества звучания речи. Под качеством звучания будем понимать разборчивость, громкость и натуральность. Кроме того, важным критерием качества звучания также является комфортность. Комфортность обусловлена сохранением в речевом сигнале частотных компонент, формирующих ее тональную окраску и лингвистические признаки [1].

В процессе создания, записи, передачи и обработки речевых данных составной частью выступают шумовые компоненты. Шумовые компоненты возникают вследствие неидеальности записывающей аппаратуры, собственных шумов микрофона, электромагнитных наводок либо в результате применения информационных технологий обработки данных. При этом стоит учесть, что спектральная полоса шума зачастую перекрывает спектр речевого сигнала. Это приводит к тому, что в некоторой доле частотной полосы энергия шумовых компонент может превысить энергию компонент речевых данных, изменяя частотные свойства речи. Таким образом, появление шума оказывает влияние на качество и комфортность звучания речи при ее воспроизведении.



Зачастую ухудшение качества восприятия речи происходит вследствие сильного влияния энергии шума на частотные компоненты речевых данных, содержащие малую долю энергии. Следовательно, можно повысить качество восприятия речи, удаляя (фильтруя) малоэнергетические частотные компоненты, наиболее подверженные влиянию шума.

Частотные компоненты речевых данных с большей энергией оказывают большее влияние на качество воспроизведения. Следовательно, эту часть полосы стоит оставлять без изменения. Основной проблемой при этом является адаптивный выбор частотной полосы, энергия в которой влияет на качество и комфортность восприятия речи.

Известно, что у большинства звуков русской речи энергия частотных компонент содержится в малой доле частотной полосы. Это энергетическое свойство можно положить в основу модели восприятия речи человеком. Характеристику, оценивающую часть энергии $P_r(\bar{x})$, сосредоточенной в частотном интервале r возможно определить из соотношения [2]

$$P_r(\bar{x}) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{\nu \in \Omega_r} |X(\nu)|^2 d\nu, \quad r \in R, \tag{1}$$

где Ω_r – частотная субполоса; R – количество частотных субполос, образующих частотную полосу;

$\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$ – отрезок речевых данных; $X(\nu)$ – трансформанта Фурье:

$$X(\nu) = \sum_{n=1}^N x_n e^{-j\nu(n-1)}, \tag{2}$$

где x_n – отсчеты анализируемого отрезка речевых данных; N – длительность отрезка речевых данных; j – мнимая единица ($j^2 = -1$).

Частотные компоненты, влияющие на комфортность звучания, формируют ее тональную окраску и помогают улучшить качество звучания, определяя идентификационно-значимые свойства речевого сигнала. А частотную полосу, в которой содержится подавляющая часть энергии этих компонент, естественно назвать идентификационно-значимой.

На рисунке 1 представлен отрезок речевых данных, порожденных звуком «а», и результаты оценки трансформанты Фурье (2). На рис. 1б заштрихованная область соответствует визуально определенной идентификационно-значимой частотной полосе, которая содержит подавляющую часть энергии сигнала.

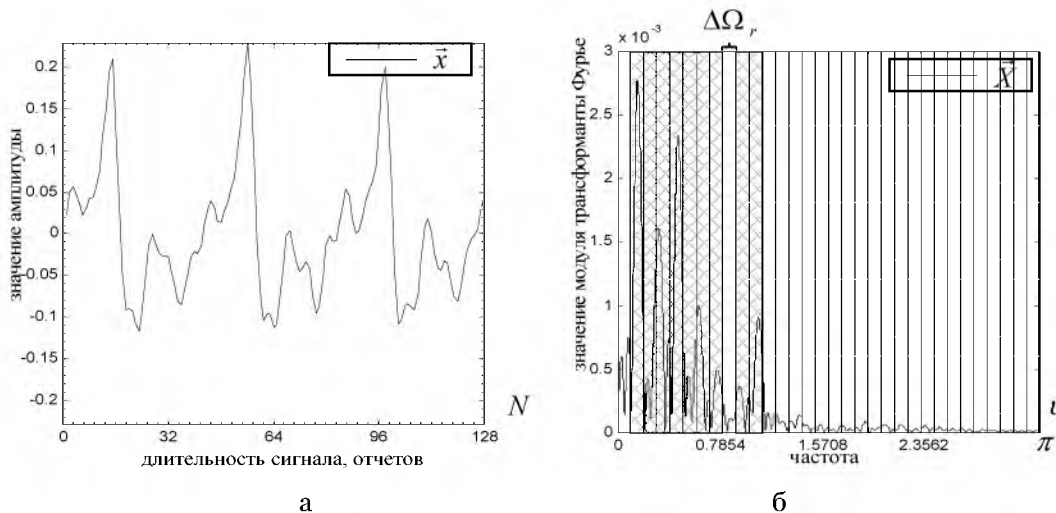


Рис. 1. Отрезок речевых данных, порожденных звуком «а» в слове «кадры»:

а) огибающая амплитуд \bar{x} ; б) огибающая нормированного амплитудного спектра \bar{X}

Fig. 1. The length of the voice data generated by the sound of "a" in the word "cadres":

а) amplitude envelope \bar{x} ; б) the envelope of the normalized amplitude spectrum \bar{X}

Для удобства анализа распределения энергии речевых данных частотную полосу предлагается разбивать на непересекающиеся частотные интервалы, обеспечивая при этом выполнение условия

$$(2(R-1)+1) \cdot \Delta\Omega_1 = \pi, \tag{3}$$

где R – количество частотных интервалов, на которые была разбита полоса частот; $\Delta\Omega_1$ – ширина первого частотного интервала.

При этом предполагается, что все интервалы, кроме первого, имеют одинаковую ширину $\Delta\Omega_r$, определяемую следующим образом:



$$\Delta\Omega_r = 2 \cdot \Delta\Omega_1, \quad r = 2, \dots, R \tag{4}$$

Использование такого разбиения обусловлено вычислительными аспектами использования субполосных матриц и наличием у отрезка речевых данных постоянной составляющей.

Также стоит отметить, что речевые данные, порожденные устной речью, – это цифровое представление нестационарного, сложно-модулированного сигнала, порождаемого работой речевого аппарата или ее отсутствием. В ходе экспериментов было выявлено, что, с течением времени, у речевых данных изменяются как временное представление, так и распределение энергии по частотным интервалам. При этом доля энергии, содержащейся в идентификационно-значимой частотной полосе, практически не изменяется. Эта закономерность выполняется в том случае, если отрезки речевых данных получены в одних и тех же условиях (для одного звука при длительности отрезков анализа до 20 мс). Таким образом, это свойство частотной концентрации энергии необходимо учитывать при анализе и обработке отрезков речевых данных, порожденных звуками устной речи. При этом необходимо определить множество идентификационно-значимых частотных интервалов (\mathbf{R}_1). Очевидно, что для их определения целесообразно осуществлять сравнение энергии каждого частотного интервала с пороговым значением. В случае, если энергия превышает заданный порог, частотный интервал целесообразно считать идентификационно-значимым. Проблема заключается в том, что изменяется не только энергия сигнала, но и распределение долей энергии по частотным интервалам. Поэтому для определения идентификационно-значимых частотных интервалов (\mathbf{R}_1) целесообразно использовать адаптивный порог, учитывающий долю энергии, содержащуюся в изменяемой от отрезка к отрезку полосе частот. Стоит отметить, что порог должен быть слабо чувствителен к наличию энергии шума.

Учитывая свойства нестационарности и концентрации энергии речевых данных, в качестве адаптивного порога предлагается использовать среднее значения энергии, приходящееся на частотную полосу.

$$h_r(\bar{x}) = \|\bar{x}\|^2 \cdot \Delta\Omega_r / \pi, \quad r=1,2,\dots,R \tag{5}$$

Исходя из выражения (1) и адаптивного порога (5), будем иметь в энергетической области неравенство (6), определяющее номера частотных интервалов, принадлежащих к идентификационно-значимым:

$$P_r(\bar{x}) \geq \frac{\|\bar{x}\|^2}{\pi} \cdot \Delta\Omega_r, \quad r \in \mathbf{R}_1 \tag{6}$$

где $\|\bar{x}\|^2$ – энергия отрезка речевых данных.

Во многих задачах обработки речевых сигналов представляет интерес анализ размера частотной полосы, которую можно подвергнуть обработке без воздействия на информационно-значимые частотные интервалы (в задачах сжатия, стеганографического кодирования, шумочистки). На рисунке 1 б – это не заштрихованная частотная область. Характеристику, оценивающую долю пригодной для изменения частотной полосы, выделенную при сравнении энергии частотной полосы с адаптивным порогом (5) определим, как частотный потенциал речевых данных:

$$D = \left(\pi - \sum_{r \in \mathbf{R}_1} \Delta\Omega_r \right) / \pi, \tag{7}$$

где $\Delta\Omega_r$ – ширина частотного интервала; \mathbf{R}_1 – множество идентификационно-значимых частотных интервалов.

Частотный потенциал (7) определяет отношение суммарной ширины частотных интервалов, не содержащих энергию идентификационно-значимых частотных компонент, к числу π .

При многократном анализе частотной полосы отрезка речевых данных, условно разбитой на равные частотные интервалы, удобно использовать математический аппарат, построенный на использовании субполосных матриц [2, 3, 4]:

$$P_r(\bar{x}) = \bar{x}^T A_r \bar{x}, \tag{8}$$

где A_r – субполосная матрица, определяемая элементами:

$$A_r = \{a_{ik}^r\}, \quad a_{ik}^r = (\sin(\nu_{2r}(i-k)) - \sin(\nu_{1r}(i-k))) / (\pi(i-k)), \tag{9}$$

$$a_{ii}^r = (\nu_{2r} - \nu_{1r}) / \pi, \quad r \in R, \quad i, k = 1, \dots, N.$$

Математический аппарат позволяет, без перехода в область частот, определять значение части энергии, сосредоточенной в частотном интервале.

Иллюстрацией работы решающего правила (6), при использовании математического аппарата (8) является рисунок 2.

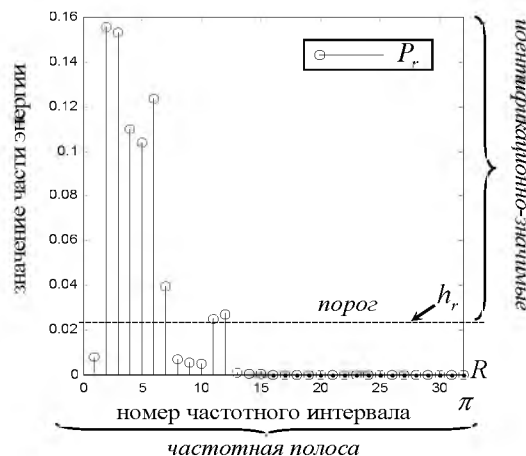


Рис. 2. Частотное распределение энергии отрезка речевого сигнала, порожденного звуком «а» слова «кадры» ($f_0=8\text{кГц}$, диктор мужчина, при длительности отрезка равной $N=128$ отсчетов)

Fig. 2. The frequency distribution of the speech signal segment of the energy generated by the sound of «a» of the word «cadres» ($f_0 = 8 \text{ kHz}$, Speaker man, with a duration equal to the length $N = 128$ samples)

На рис. 2 отображено распределение частей энергии по частотной оси для звука «а», огибающая амплитуд и спектра которого отображены на рис. 1. Отрезок речевых данных в количестве $N=128$ отсчетов был разбит на $R=32$ частотных интервала.

Для каждого частотного интервала в соответствии с (8), было найдено значение части энергии, сосредоточенной в анализируемом частотном интервале. Результатом работы решающего правила (6) стало отнесение к идентификационно-значимой полосе частотных интервалов с номерами 1–8 и 15. На рис. 2 видно, что энергия в этих интервалах превышает пороговое значение, отмеченное пунктирной линией.

Появление шума приводит к изменению распределения энергии по частотной оси, что в свою очередь оказывает влияние на определение частотных компонент, не относящихся к идентификационно-значимым. Необходимость правильного определения идентификационно-значимых частотных интервалов связана с тем, что воздействие на них приводит к ухудшению качества звучания речевых сигналов. Таким образом, необходимо исследовать чувствительность адаптивного порога к шуму, что позволит избежать следующих негативных случаев.

Случай 1. Неэффективное использование частотной полосы, вызванное некорректным определением частотного потенциала речевых данных. К данному случаю относятся ситуации, когда оценка частотного потенциала D занижена. В системах сжатия это приводит к необходимости хранения большего объема информации. В случае реализации стеганографических систем при неэффективном использовании частотной полосы будет передан меньший объем информации.

Случай 2. Ухудшение качества звучания речевого сигнала вследствие неверного определения значимости частотного интервала (идентификационно-значимый частотный интервал ошибочно отнесен к частотному потенциалу).

В качестве модели, описывающей воздействие шума на отрезок речевых данных, будем использовать соотношение

$$\bar{y} = \bar{x} + h_0 \cdot \bar{u}, \quad (10)$$

где \bar{y} – отрезок речевых данных, содержащий шумовую компоненту; \bar{u} – отрезок данных, соответствующий шуму ($\|\bar{u}\|^2 = 1$); h_0^2 – отношение шум/сигнал.

В таблице 1 представлены результаты оценки частотного потенциала D при длительности отрезков анализа 8 мс ($N=128$ отсчетов при $f_0=8\text{кГц}$). Для оценки частотного потенциала было использовано более $Z=3200$ отрезков речевых данных, записанных с частотой дискретизации $f_0=8\text{кГц}$ и разрядностью кода 16 бит.

В качестве эталона в таблице использованы оценки частотного потенциала, определенные для отрезков речевых сигналов, не подверженных зашумлению.

Как видно из таблицы 1, при увеличении отношения шум/сигнала величина частотного потенциала изменяется. Это свидетельствует о наличии ошибок определения частотного потенциала. Интерес представляет оценка устойчивости определения частотного потенциала к воздействию шумов.



Таблица 1
Table 1

**Значения частотного потенциала
The values of the frequency potential**

гласные										
звук	а	е	е	и	о	у	ы	э	ю	я
эталон	0,8049	0,8732	0,8777	0,8859	0,8331	0,8857	0,8908	0,8344	0,8735	0,8606
$h_0^2=0.01$	0,8085	0,8746	0,8823	0,8880	0,8358	0,8885	0,8921	0,8376	0,8698	0,8636
$h_0^2=0.1$	0,8086	0,8764	0,8783	0,8884	0,8355	0,8876	0,8922	0,8374	0,8673	0,8632
сопорные согласные										
звук	й		л		м		н		р	
эталон	0,8781		0,8711		0,9145		0,9204		0,8209	
$h_0^2=0.01$	0,8789		0,8731		0,9166		0,9215		0,8214	
$h_0^2=0.1$	0,8779		0,8736		0,9164		0,9206		0,8196	
звонкие согласные										
звук	б		в		г		д		ж	
эталон	0,9155		0,8735		0,8680		0,8816		0,8250	
$h_0^2=0.01$	0,9165		0,8758		0,8663		0,8832		0,8323	
$h_0^2=0.1$	0,9153		0,8763		0,8651		0,8846		0,8329	
глухие согласные										
звук	к	п	с	т	ф	х	ц	ч	ш	щ
эталон	0,7569	0,8170	0,7586	0,7259	0,7806	0,7724	0,7180	0,7334	0,7783	0,7622
$h_0^2=0.01$	0,7586	0,8115	0,7628	0,7295	0,7836	0,7783	0,7273	0,7390	0,7867	0,7660
$h_0^2=0.1$	0,7591	0,8130	0,7614	0,7228	0,7818	0,7786	0,7251	0,7303	0,7832	0,7641

Гипотеза H_0 : частотный интервал относится к частотному потенциалу.

Вероятность ошибки первого рода P_α обозначает ложное принятие решающим правилом (6) положительного решения, то есть частотный интервал, входящий в частотный потенциал речевых данных, в результате воздействия шума, будет отнесен к идентификационно-значимому:

$$P_\alpha = \tilde{R}_1 / \left(\sum_{i=1}^Z R_{oi} \right), \tag{11}$$

где \tilde{R}_1 – количество частотных интервалов, ошибочно отнесенных к идентификационно-значимым из-за воздействия шума; Z – количество проанализированных отрезков речевых данных; R_{oi} – количество частотных интервалов, относящихся к частотному потенциалу i -го отрезка анализа.

Вероятность ошибки второго рода P_β обозначает ложное принятие решающим правилом (6) отрицательного решения, то есть частотный интервал, не входящий в частотный потенциал речевых данных, в результате воздействия шума будет к нему отнесен:

$$P_\beta = \tilde{R}_0 / \left(\sum_{i=1}^Z R_{ii} \right), \tag{12}$$

где \tilde{R}_0 – количество частотных интервалов, ошибочно отнесенных к частотному потенциалу в последствии воздействия шума, Z – количество проанализированных отрезков речевых данных; R_{ii} – количество частотных интервалов, относящихся к идентификационно-значимым для i -го отрезка анализа.

В таблицах 2 и 3 и на рисунке 3 представлены результаты оценки вероятностей ошибок первого и второго рода, определенные на основе анализа свыше $Z=3200$ отрезков речевых данных, записанных с частотой дискретизации $f_0=8кГц$ и разрядностью кода 16 бит при различных отношениях сигнал/шум, h_0^2 . При этом для анализа были использованы отрезки длительностью $N=128$ отсчетов (8 мс) при разбиении частотной оси на $R=32$ непересекающихся интервала.

Таблица 2
Table 2

Значения вероятностей ошибок первого и второго рода для всех звуков русской речи
The values of the probabilities of the first and the second kind of errors for all the sounds
of Russian speech

h_0^2 звук	Вероятность ошибки первого рода, P_α				Вероятность ошибки второго рода, P_β			
	0.0001	0.001	0.1	1	0.0001	0.001	0.1	1
а	0,0008	0,0025	0,0082	0,0852	0,0007	0,0025	0,0082	0,0290
б	0,0005	0,0014	0,0039	0,0816	0,0003	0,0007	0,0020	0,0057
в	0,0003	0,0013	0,0040	0,0817	0,0004	0,0017	0,0050	0,0155
г	0,0012	0,0025	0,0057	0,0832	0,0002	0,0014	0,0055	0,0186
д	0,0004	0,0014	0,0059	0,0865	0,0008	0,0022	0,0063	0,0172
е	0,0003	0,0008	0,0033	0,0807	0,0005	0,0015	0,0047	0,0135
ё	0,0009	0,0031	0,0083	0,0890	0,0014	0,0030	0,0052	0,0115
ж	0,0008	0,0023	0,0096	0,0968	0,0013	0,0037	0,0103	0,0291
з	0,0008	0,0022	0,0076	0,0921	0,0007	0,0019	0,0057	0,0157
и	0,0002	0,0009	0,0026	0,0764	0,0002	0,0008	0,0027	0,0088
й	0,0004	0,0012	0,0037	0,0800	0,0006	0,0011	0,0025	0,0094
к	0,0018	0,0048	0,0148	0,0982	0,0018	0,0057	0,0170	0,0505
л	0,0002	0,0006	0,0023	0,0763	0,0003	0,0009	0,0031	0,0109
м	0,0004	0,0014	0,0040	0,0804	0,0003	0,0011	0,0032	0,0083
н	0,0003	0,0009	0,0035	0,0806	0,0005	0,0012	0,0030	0,0072
о	0,0005	0,0014	0,0052	0,0792	0,0006	0,0018	0,0058	0,0205
п	0,0012	0,0034	0,0106	0,0981	0,0009	0,0039	0,0120	0,0374
р	0,0012	0,0036	0,0136	0,1057	0,0011	0,0038	0,0123	0,0355
с	0,0021	0,0068	0,0236	0,1209	0,0021	0,0069	0,0205	0,0573
т	0,0028	0,0078	0,0240	0,1148	0,0022	0,0061	0,0199	0,0631
у	0,0003	0,0010	0,0038	0,0814	0,0004	0,0012	0,0038	0,0108
ф	0,0020	0,0063	0,0216	0,1215	0,0021	0,0063	0,0185	0,0520
х	0,0015	0,0044	0,0148	0,1007	0,0014	0,0045	0,0141	0,0445
ц	0,0022	0,0083	0,0275	0,1203	0,0026	0,0085	0,0265	0,0769
ч	0,0023	0,0068	0,0211	0,1125	0,0017	0,0060	0,0193	0,0592
ш	0,0018	0,0047	0,0145	0,1018	0,0011	0,0039	0,0129	0,0408
щ	0,0014	0,0047	0,0176	0,1105	0,0018	0,0058	0,0170	0,0502
ы	0,0003	0,0010	0,0037	0,0815	0,0004	0,0011	0,0029	0,0083
э	0,0005	0,0019	0,0064	0,0860	0,0009	0,0024	0,0064	0,0202
ю	0,0006	0,0020	0,0054	0,0826	0,0003	0,0006	0,0019	0,0128
я	0,0003	0,0017	0,0047	0,0819	0,0008	0,0017	0,0041	0,0144

Таблица 3
Table 3

Средние значения вероятностей ошибок первого и второго рода
The average error probability values of the first and second kind

Отношение сигнал/шум, h_0^2	0.0001	0.001	0.1	1
Ошибка первого рода, P_α	9.7032e-04	0.0030	0.0098	0.0925
Ошибка второго рода, P_β	9.8045e-04	0.0030	0.0091	0.0276



Результаты исследований показали, что в среднем вероятность ошибки первого рода составляет порядка 0.0925, а вероятность ошибки второго рода – 0.0276. Для звуков таких как «ф», «с», «ц», «т», «ч», «щ», «р», «ш», «х», «к», «п», «ж», вероятность ошибки больше, что связано с их природой. Данные звуки относятся к классам шумовых и взрывных согласных. В свою очередь, вероятность ошибочного принятия решения для гласных и сонорных звуков речи меньше.

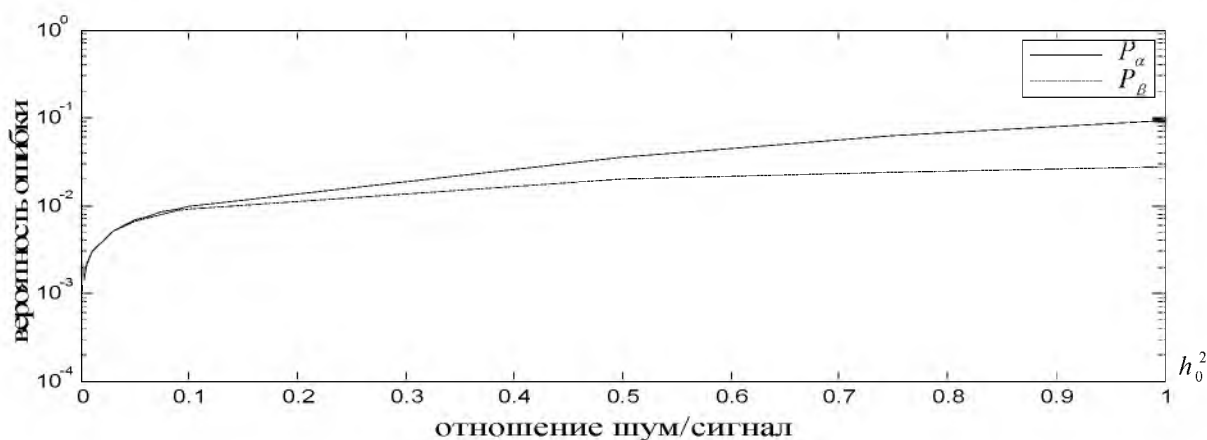


Рис. 3. Результат оценки вероятностей ошибок первого и второго рода, при воздействии флуктуационной помехи

Fig. 3. The outcome of the assessment of probabilities of errors of the first and second kind, when exposed to fluctuation interference

Выводы

Таким образом, при анализе речевых данных целесообразно оценивать частотный потенциал речевых данных, представляющий собой частотные компоненты, доля энергии которых меньше адаптивного порога. Частотный потенциал речевых данных не используется слуховой системой человека и может быть использован в задачах сжатия и кодирования речевых данных, а также в задачах скрытия информации. Вероятности ошибок первого и второго рода при воздействии аддитивных шумов с отношением сигнал/шум $h_0^2=1$ составляют порядка 0,09 и 0,03 соответственно, что свидетельствует об устойчивости определения частотного потенциала отрезков речевых сигналов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-07-01570 «Субполосная скрытная интеграция/извлечение дополнительной информации в аудио или видео контентях» и РФФИ № 15-07-01463 «Разработка методов и алгоритмов автоматического распознавания устной речи с использованием субполосного анализа речевых сигналов».

Список литературы References

1. Аграновский, А.В. Теоретические аспекты алгоритмов обработки и классификации речевых сигналов / А.В. Аграновский, Д.А. Леднов – М.: Радио и связь, 2004. – 164 с.
Agranovskij, A.V. Teoreticheskie aspekty algoritmov obrabotki i klassifikacii rechevyh signalov / A.V. Agranovskij, D.A. Lednov – М.: Radio i svyaz, 2004. – 164 s.
2. Жилияков Е.Г. О сегментации речевых сигналов на однородные отрезки / Жилияков Е.Г., Белов С.П., Белов А.С., Фирсова А.А. // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. № 7(204), вып.34/1, 2015г, с.194-199.
ZHilyakov, E.G. O segmentacii rechevyh signalov na odnorodnye otrezki / ZHilyakov E.G., Belov S.P., Belov A.S., Firsova A.A. // NauchNauchnye vedomosti BelGU. Ser. Jekonomika. Informatika. № 7 (204), vyp.34/1, 2015g, s.194-199.
3. Жилияков, Е.Г. Вариационные методы анализа и построения функций по эмпирическим данным / Е.Г. Жилияков. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2007. – 160с.
ZHilyakov, E.G. Variacionnye metody analiza i postroeniya funkcij po ehmpiricheskim dannym / E.G. ZHilyakov. – Belgorod: Izd-vo BelGU, 2007. – 160s.
4. Жилияков, Е.Г. Вариационные методы анализа сигналов на основе частотных представлений / Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, А.А. Черноморец // Вопросы радиоэлектроники, сер. ЭВТ, вып.1. – Москва: Изд-во ОАО «ЦНИИ «Электроника», 2010. – 185с.
ZHilyakov, E.G. Variacionnye metody analiza signalov na osnove chastotnyh predstavlenij / E.G. ZHilyakov, S.P. Belov, A.A. Chernomorec // Voprosy radioehlektroniki, ser. EHVT. vyp.1. – Moskva: Izd-vo OAO CNII EHlektronika, 2010. – 185s.