

Повышение отношения сигнал/акустическая помеха в телекоммуникациях аудиообмена методами адаптивной фильтрации

Ю.А. Кропотов¹, А.А. Белов¹, А.Ю. Проскуряков¹

¹Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Орловская 23, Муром, Россия, 602264

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы повышения отношения сигнал/шум в телекоммуникационных системах аудиообмена. Проведено исследование характеристик речевых сигналов и акустических шумов, таких как математическое ожидание, дисперсия, относительная интенсивность акустических речевых сигналов и различных видов акустических шумов и помех. Показано, что при проектировании систем телекоммуникаций, в частности систем громкоговорящей связи, работающих в условиях воздействия внешних акустических шумовых помех высокой степени интенсивности необходимо решать задачу разработки алгоритмов эффективного подавления вышеуказанных помех для обеспечения необходимого отношения сигнал/шум в системах связи. С применением интерполяционного многочлена Лагранжа 10 порядка получена математическая модель автокорреляционной функции речевого сигнала, Рассмотрены вопросы создания адаптивных алгоритмов подавления акустических помех методами линейной фильтрации. При этом подавление акустических шумов и помех возможно за счет управляемого изменения области режекции в интервале от 0 Гц до 300-1000 Гц, в зависимости от помеховой обстановки.

1. Введение

Вопросы повышения отношения сигнал/акустическая помеха в телекоммуникациях аудиообмена актуальны и широко освещены в отечественной [1-4] и зарубежной литературе [5-8]. В качестве основных критериев эффективности систем телекоммуникаций, для обеспечения надежного обмена информацией между абонентами системы, можно привести отношение сигнал/акустических шум и слоговую разборчивость [1].

Надежный обмен аудиоинформацией в системах связи и телекоммуникаций возможен при обеспечении отношения сигнал/внешний акустический шум $P_c/P_{ш.} \geq 20$ дБ, что соответственно обеспечит необходимую слоговую разборчивость $S \geq 93\%$ для эффективного, полного обмена аудиоданными и оперативно-командной информацией в системах громкоговорящей связи на многофункциональных объектах различного назначения. По этой причине актуально продолжение исследований, направленных на разработку новых подходов и алгоритмов повышения отношения сигнал/акустическая помеха методами адаптивной фильтрации с применением управляемого изменения области режекции.

2. Исследование характеристик речевых сигналов и акустических шумов

Известная математическая модель функции плотности вероятности $P(x_i)$ речевых сигналов, разработанная в [9], позволяет получить значения математического ожидания \bar{x}_i и дисперсии σ^2 речевых сигналов в соответствии с выражениями.

$$\bar{x}_i = \sum_{i=-2^n+1}^{2^n-1} x_i \cdot P(x_i), \quad \sigma^2 = \sum_{i=-(2^n-1)}^{2^n-1} x_i^2 P(x_i), \tag{1}$$

где x_i – отсчеты речевых сигналов, квантованные на 2^n интервалах и нормированные относительно максимальных значений в виде $|\pm x_{max}| = 1$ В, тогда получаем значения $\bar{x}_i \approx 0$ и $\sigma^2 = 0,126$ Вт/Ом.

Соответственно уровень интенсивности звукового давления I относительно нулевого уровня интенсивности $I_0=10^{-12}$ Вт/м² определяется как

$$\frac{I}{I_0} \text{ (дБ)} = 10 \lg \frac{k\sigma^2}{S} \cdot 10^{12}, \tag{2}$$

где k – коэффициент направленности громкоговорящего устройства, при излучении в одном направлении принимается $k = 2$; $S = 4\pi R^2$ – площадь сферы, R – радиус сферы в метрах.

Тогда относительная интенсивность акустического речевого сигнала I_p , вычисляемое с помощью выражения (2) имеет следующее значение

$$\frac{I_p}{I_0} \text{ (дБ)} = 103 \text{ дБ},$$

при $\sigma^2 = 0,126$ Вт, $k = 2$, $R=1$ м.

Так же вычисляются относительные интенсивности для различных акустических шумов и акустических помех, используя значения математического ожидания и дисперсий различных видов акустических помех, определенные по формулам (1), в которых применена математическая модель функции плотности вероятности акустических помех [10]. Значения относительных интенсивностей для различных акустических сигналов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Относительные интенсивности для различных акустических сигналов.

Вид сигнала	P (Вт)	$\frac{I}{I_0}$ (дБ)	$\frac{P_c}{P_{ш}}$ (дБ)
Речевой сигнал	0,126	103	–
Шум квантования	$0,5 \cdot 10^{-5}$	59	44
Акустические помехи (ОСТ В4 Г0.005.004)	$3,5 \cdot 10^{-4}$	85	18
Шум моря	0,0687	90,4	12,6
Шум ветра	0,0953	91,8	11,2
Шум в машинном отделении	0,111	92,5	10,5

Из таблицы 1 видно, что при наличии акустических помех таких как шум моря, шум ветра, шум в машинном отделении, $P_c/P_{ак.пом}$ находится в пределах 10,5÷18 дБ. При таких отношениях сигнал/помеха слоговая разборчивость может понижаться до 65% для случая передачи русской речи. Достоверный прием абонентом переданной речевой информации в таких условиях существенно затрудняется.

Согласно исследованиям в [10] для корректного приема передаваемого речевого сообщения по зашумленному каналу, требуется обеспечить отношение $P_c/P_{ак.пом}$ не менее 20 дБ. Поэтому при проектировании систем телекоммуникаций, в частности систем ГТС, работающих в условиях воздействия внешних акустических шумовых помех, ставится задача создания алгоритмов

эффективного подавления вышеуказанных помех для обеспечения необходимого отношения $P_c/P_{ак.пом} \geq 20$ дБ.

Исследования спектральных функций речевых сигналов и внешних шумовых помех в [9] показали, что спектр наиболее распространенных помех – внешних акустических шумов смещен относительно спектра речевых сигналов в низкочастотную область, что позволяет предполагать, что для повышения отношения $P_c/P_{ак.пом}$ можно применить методы линейной фильтрации. Другой фактор, позволяющий применить линейную фильтрацию для подавления акустических шумов, это возможность увеличения области режекции в диапазоне от $F=0$ Гц, до $F_n=300-1000$ Гц, в соответствии с исследованиями в [10]. Из этих исследований видно, что при увеличении нижней границы воспроизводимых частот до $F=1000$ Гц величина S практически не изменяется, принимает значение не менее 94%, что является допустимым. Таким образом, вышеперечисленные факторы позволяют рассмотреть возможность проектирования адаптивных алгоритмов обработки речевых сигналов и подавления акустических помех за счет управляемого изменения области режекции в интервале от 0 Гц до (300÷1000) Гц, в зависимости от помеховой обстановки.

3. Разработка алгоритма адаптивной фильтрации с управлением областью режекции

Рассмотрим в качестве модели адаптивной фильтрации полосовой фильтр прямоугольной формы с плавающим низкочастотным срезом F_n в АЧХ канала. Изменяя F_n в пределах $0 \leq F_n \leq F_6$, где F_6 – фиксированный высокочастотный срез АЧХ фильтра. АЧХ полосового фильтра $K(f)$ задается в виде

$$K(f) = \begin{cases} 1, & \text{при } F_n \leq f \leq F_6, \\ 0, & \text{при других } f; \end{cases}$$

где $0 \leq F_n \leq F_6$, $F_6=6000$ Гц.

При известной спектральной функции речевого сигнала $G(f)$, P_c на выходе полосового фильтра определяется как

$$P_c = \int_{F_n}^{F_6} K^2(f)G(f)df = \int_{F_n}^{F_6} G(f)df,$$

где вторая часть выражения вычисления P_c переписана в соответствии с $K^2(f)=1$ в пределах интегрирования от F_n до F_6 .

Соответственно изменяя F_n в пределах $0 \leq F_n \leq F_6$, получаем зависимость P_c от значения частоты низкочастотного среза F_n АЧХ канала. Запишем спектральную функцию энергетического спектра речевого сигнала в виде

$$G(\Delta f \cdot l) = \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{k-1} R(kT)e^{-j2\pi\Delta f \cdot l \cdot kT},$$

где $\Delta f = \frac{F\delta}{N}$ – интервал дискретизации спектральной функции по частоте, N – число отсчетов речевого сигнала на конечном интервале, l – номер частотной дискретной составляющей отсчета спектральной функции, находится в пределах $0 \leq l \leq N-1$, $R(kT)$ – АКФ речевого сигнала представляется сеточной функцией в таблице 2 для одной из реализаций речевого сигнала.

Таблица 2. Сеточная функция АКФ речевого сигнала.

k_l, k_l	$k_0=0$	$k_1=7$	$k_2=25$	$k_3=54$	$k_4=93$	$k_5=130$
$R(k_h)$	$R(k_0)=0,126$	$R(k_1)=0,115$	$R(k_2)=0,037$	$R(k_3)=-0,048$	$R(k_4)=-0,016$	$R(k_5)=-0,025$
k_l, k_l	$k_6=182$	$k_7=182$	$k_8=228$	$k_9=245$	$k_{10}=253$	
$R(k_h)$	$R(k_6)=0,026$	$R(k_7)=0,008$	$R(k_8)=-0,003$	$R(k_9)=-0,001$	$R(k_{10})=0$	

Математическая модель АКФ речевого сигнала представляется аппроксимацией интерполяционным многочленом Лагранжа десятого порядка в виде

$$R(k) = \sum_{k=0}^{H=10} R(k_h) \prod_{\substack{l=0 \\ l \neq h}}^{H=10} \frac{k - k_l}{k_h - k_l},$$

где k – текущая задержка кратная периоду дискретизации T , k_h – задержка в узле с номером h , l – текущие задержки остальных узлов при $l \neq h$.

Аналогично вычисляется мощность акустических помех $P_{ак.пом.}$ в виде

$$P_{ак.пом.} = \int_{F_n}^{F_c} G_{ш}(f) df.$$

Спектральная функция $G_{ш}(\Delta f \cdot l)$ акустического шума имеет вид

$$G_{ш}(\Delta f \cdot l) = \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{K=0}^{K-1} R_{ш}(kT) l^{-j2\pi\Delta f \cdot l \cdot kT},$$

где $R_{ш}(kT)$ – АКФ помехи представляется также ее аппроксимацией интерполяционным многочленом Лагранжа.

Процесс фильтрации спектральных функций речевого сигнала $G(f)$ и помехи $G_{ш}(f)$ и, соответственно, изменения отношения $P_c/P_{ак.пом.}$ в зависимости от изменения F_n в пределах $300 \text{ Гц} \leq F_n \leq 1000 \text{ Гц}$ экспериментально исследован моделированием и результаты проиллюстрированы на рисунке 1. На рисунке 1 хорошо видно, что площадь подынтегральной функции $G_{ш}(f)$ соответствующая $P_{ак.пом.}$ уменьшается быстрее при изменении F_n от 300 Гц до 1000 Гц, чем площадь подынтегральной функции $G(f)$. Также рисунок 1 демонстрирует то, что основная энергия спектральной функции $G(f)$ остается в пределах от 0 Гц до F_n , то есть вне полосы пропускания фильтра прямоугольной формы.

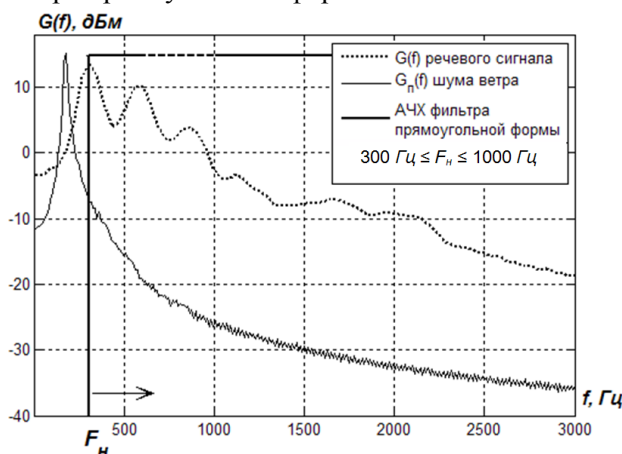


Рисунок 1. Иллюстрация модели фильтрации спектральных функций речевого сигнала $G(f)$ и помехи $G_{ш}(f)$ в зависимости от изменения значения F_n .

Таким образом, отношение значений P_c и $P_{ак.пом.}$ на выходе фильтра прямоугольной формы показывает зависимость степени подавления акустических шумов относительно речевых сигналов от величины области режекции от 0 Гц до F_n в АЧХ тракта. В дискретном случае представления спектральных функций получим отношение $P_c/P_{ак.пом.}$ в виде

$$\frac{P_c}{P_{ак.пом.}} = \frac{\sum_{l_n}^{l_n} G(l \cdot \Delta f)}{\sum_{l_n}^{l_n} G_{ш}(l \cdot \Delta f)},$$

где при длительности интервала анализа $\tau_{сегм}$, число отсчетов в интервале анализа $N = \frac{\tau_{сегм}}{T}$, $\Delta f = \frac{F\partial}{N}$ интервал дискретизации спектральной функции по частоте, $l_H = \frac{F_H}{\Delta f}$ - номер частотного интервала, для низкочастотного среза АЧХ F_H .

Таким образом, изменяя l_H в выражении отношения $P_c/P_{ак.пом}$ будет получена функция изменения этого отношения на выходе фильтра прямоугольной формы в зависимости от ширины области подавления, которая находится в пределах от 0 до $F_n = l_H \cdot \Delta f$.

Полученные результаты исследований влияния изменения F_n на $P_c/P_{ак.пом}$ при фиксированной $F_g=6000$ Гц представлены на рисунке 2. В исследованиях рассмотрены случаи для трех различных реализаций речевых сигналов относительно различных внешних шумовых помех.

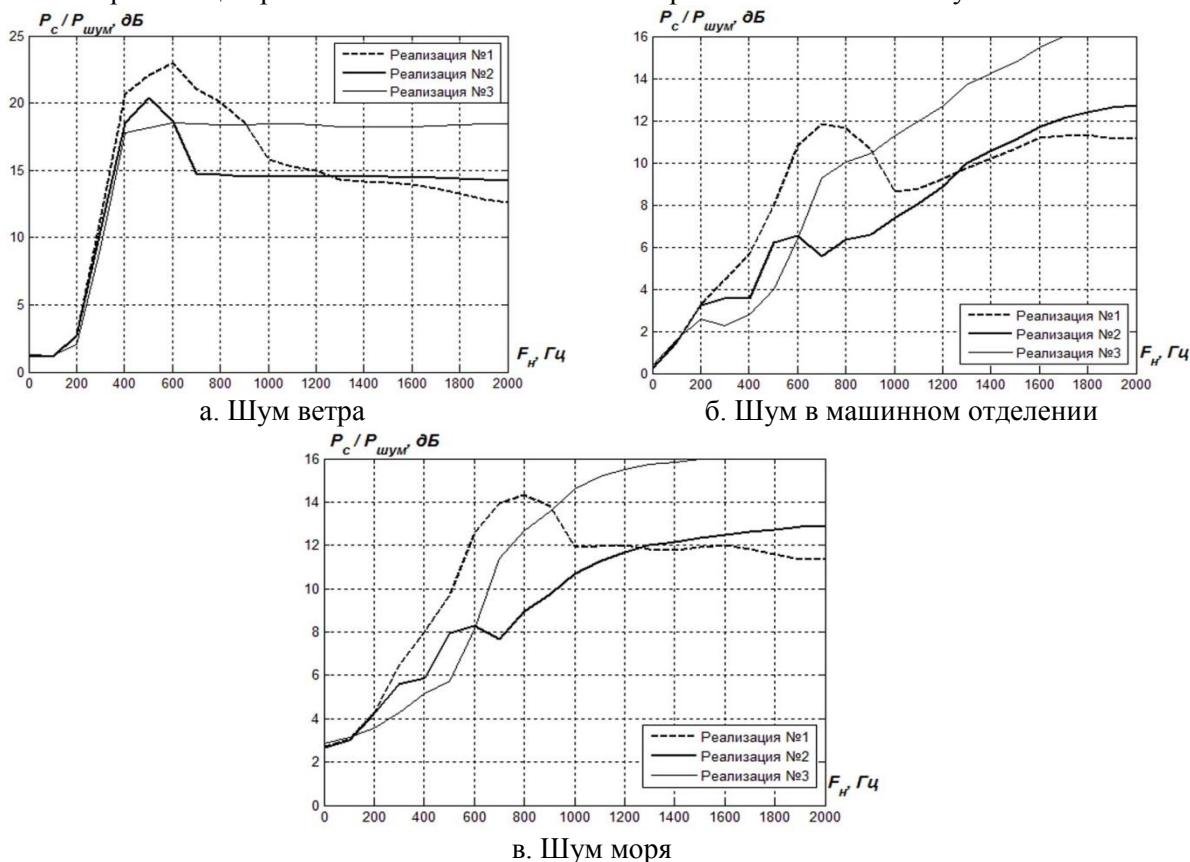


Рисунок 2. Зависимость отношения $P_c/P_{ак.пом}$ на выходе фильтра прямоугольной формы от значения F_n , при фиксированном значении $F_g=6000$ Гц.

4. Выводы

Из графиков на рисунке 2 видно, что внешние акустические помехи вида «шум ветра», если установить $F_n=500$ Гц, подавляются на $-(17\div 23)$ дБ. При воздействии акустической помехи вида «шум в машинном отделении» и при $F_n=700\div 1000$ Гц, такой акустический шум подавляется до -12 дБ. При воздействии акустической помехи вида «шум моря» при $F_n = 800\div 1000$ Гц, данная помеха подавляется на $(11\div 15)$ дБ [10]. Полученные результаты исследований подавления акустических шумов показывают, что методом линейной фильтрации можно обеспечить в системе телекоммуникаций обмена речевой информацией необходимое отношение $P_c/P_{ак.пом} \geq 20$ дБ и соответственно необходимую слоговую разборчивость $S \geq 93\%$.

5. Литература

- [1] Железняк, В.К. Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации / В.К. Железняк, Ю.К. Макаров, А.А. Хорев // Специальная техника. – 2000. – № 4. – С. 39-45.
- [2] Сапожков, М.А. Речевой сигнал в кибернетике и связи.– М.: Связьиздат, 1962. – 452 с.
- [3] ГОСТ Р 50840-95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости.
- [4] Рябенький, В.С. Математическая модель устройств подавления внешнего шума в подобласти пространства // Математическое моделирование. – 2012. – Т. 24, № 8. – С. 3-31.
- [5] McAulay, R. Speech enhancement using a soft-decision noise suppression filter /R. McAulay, M. Malpass // IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1980. – Vol. 28(2). – P. 137-145.
- [6] Cohen, I. Speech processing in modern communication / I. Cohen, J. Benesty, S. Gannot. – Berlin Heidelberg: Springer, 2010. – 342 p.
- [7] Hansler, E. Topics in acoustic echo and noise control: Selected methods for the cancelation of acoustic echoes, the reduction of background noise, and speech processing / E. Hansler, G. Schmidt. – Berlin, Heidelberg, Springer, 2006. – 642 p.
- [8] Kahrs, M. Applications of digital signal processing to audio and acoustics / M. Kahrs, K. Brandenburg. – New York, Kluwer Academic Publisher, 2002. – 572 p.
- [9] Кропотов, Ю.А. Алгоритм подавления акустических шумов и сосредоточенных помех с формантным распределением полос режекции / Ю.А. Кропотов, А.А. Быков // Вопросы радиоэлектроники. – 2010. – Т.1, № 1. – С. 60-65.
- [10] Кропотов, Ю.А. Алгоритм вычисления сигнала управления каналом режекции многоканальной системы передачи акустических сигналов // Вопросы радиоэлектроники. – 2010. – Т.1, № 1. – С. 57-60.

Increasing the signal / acoustic interference ratio in telecommunications of audio exchange by adaptive filtering methods

Yu.A. Kropotov¹, A.A. Belov¹, A.Yu. Proskuryakov¹

¹Murom Institute of Vladimir State University named after Alexander and Nicholay Stoletovs, Orlovskaya street 23, Murom, Russia, 602264

Abstract. The paper deals with the increase in the signal-to-noise ratio in telecommunication audio exchange systems. The characteristics of speech signals and acoustic noise, such as expectation, dispersion, relative intensity of acoustic speech signals and various types of acoustic noise and interference, have been studied. It is shown that when designing telecommunication systems, in particular, loud-speaking communication systems operating under conditions of exposure to external acoustic noise of a high degree of intensity, it is necessary to solve the problem of developing algorithms for effectively suppressing the above-mentioned interference to ensure the required signal-to-noise ratio in communication systems. Using the 10-order Lagrange interpolation polynomial, a mathematical model of the autocorrelation function of a speech signal is obtained. The problems of creating adaptive algorithms for suppressing acoustic noise by linear filtering methods are considered. In this case, the suppression of acoustic noise and interference is possible due to a controlled change in the rejection region in the interval from 0 Hz to 300-1000 Hz, depending on the interference situation.