

УДК 621.391

Методы проектирования телекоммуникационных информационно-управляющих систем аудиообмена в сложной помеховой обстановке

Кропотов Ю. А., Белов А. А., Проскураков А. Ю., Колпаков А. А.

Постановка задачи: передача информации речевыми сообщениями является эффективным средством обеспечения оперативного управления, обеспечения надежного функционирования сложных объектов, что повышает требования к характеристикам информационно-управляющих систем аудиообмена, функционирующих в условиях сложной помеховой обстановки. **Используемые методы:** в исследованиях применялись методы параметрической оптимизации, локальной аппроксимации, идентификации и адаптивной компенсации. **Результат:** в работе проведено исследование и разработка методов и теоретических подходов к созданию алгоритмов обработки речевых сигналов, повышающих эффективность функционирования информационно-управляющих телекоммуникационных систем аудиообмена при воздействии внешних акустических помех высокой интенсивности.

Разработан алгоритм гистограммного оценивания экспериментальной функции плотности вероятности оцифрованного речевого сигнала. Показана зависимость точности оценивания функции плотности вероятности от времени анализа. Так, для вычисления по этому алгоритму функции плотности вероятности с погрешностью менее 5 % требуется время анализа 0,3 с, для вычислений с погрешностью менее 1 % требуется время анализа 4,5 с.

По сравнению с известными способами восстановления плотности вероятности речевого сигнала, имеющими значительную погрешность восстановления, рассмотренные алгоритмы имеют большую точность. Наиболее предпочтительным по критериям максимальной точности и минимальной вычислительной сложности является алгоритм, основанный на аппроксимации гистограммы многочленом по системе экспоненциальных функций.

Разработанный алгоритм гистограммной оценки экспериментальной функции одномерного закона распределения плотности вероятности речевых сигналов и рекуррентный алгоритм определения параметров многочлена аппроксимации по системе экспоненциальных функций обеспечивает погрешность восстановления вышеуказанной функции распределения плотности вероятности менее 5%, при использовании в аппроксимирующей функции многочлена третьего порядка.

Математическая модель функции распределения плотности вероятности сигналов внешних акустических шумовых помех, полученная с помощью алгоритма гистограммной оценки и рекуррентного алгоритма вычисления параметров, представляется рядом гауссовых кривых третьего порядка. Погрешность восстановления одномерной функции распределения плотности вероятности внешних акустических шумов достигается менее 4,8 %.

Исследования различных аппроксимаций спектральной плотности мощности речевого сигнала и акустических шумовых помех показали, что аппроксимации интерполяционным многочленом Лагранжа или кубическим сплайном имеют практически одну и ту же погрешность, при аппроксимации спектральной функции полиномом Лагранжа 11-го порядка получают погрешность 3,39%...4,82%.

Сравнительные исследования спектральных характеристик речевых сигналов и акустических помех показали, что спектр акустических помех относительно спектра речевых сигналов смещен в низкочастотную часть звукового диапазона и находится в пределах 0...1000 Гц. Так, спектр шума моря сосредоточен в области от 0 до 500 Гц, спектр шума ветра сосредоточен в пределах от 0 до 300 Гц и спектр шума в машинном отделении или спектр шума в кабине пилота самолета сосредоточен в пределах от 0 до 1200 Гц.

Проведенные исследования позволили обосновать создание более эффективных диспетчерско-технологических систем телекоммуникаций, систем громкоговорящей связи обмена речевыми сообщениями в условиях сложной помеховой обстановки. Разработаны методы построения моделей сигналов и моделей алгоритмов обработки, разработаны методы определения параметров систем передачи и обмена речевыми сообщениями, разработаны более эффективные алгоритмы подавления внешних акустических шумов и помех, разработаны более

быстродействующие алгоритмы компенсации эхо-сигналов. Решены вопросы повышения эффективности передачи информации речевыми сообщениями в распределенных оперативно-командных телекоммуникационных системах на многофункциональных объектах, работающих в условиях воздействия помех интенсивностью до 90 дБ. Представлены разработанные структуры устройств подавления внешних акустических помех и устройств адаптивных эхокомпенсаторов, позволяющие получить на выходе системы аудио обмена отношение сигнал/помеха более 20 дБ и, соответственно, обеспечить слоговую разборчивость речевых сообщений более 93%.

Ключевые слова: алгоритмы обработки, информационно-управляющая телекоммуникационная система аудиообмена, адаптивная компенсация, локальная аппроксимация.

Введение

Современный этап развития диспетчерско-технологических оперативно-командных систем телекоммуникаций характеризуется существенной интеграцией и повышением их функциональной насыщенности, характеризуется переходом на новые информационные технологии. Современные диспетчерско-технологические системы телекоммуникаций, в том числе оперативно-командные системы громкоговорящей связи (ГГС) получили все более широкое применение на многофункциональных объектах, в системах массового обслуживания. Современные системы телекоммуникаций имеют сетевую распределенную структуру в виде многоканальной системы передачи цифровой информации с увеличенной пропускной способностью сетей с применением высокоскоростных технологий Ethernet или ISDN, вследствие требований на значительное число абонентских постов обмена.

В настоящее время такие системы представляют собой объект активных теоретических исследований. Исследователи, используя новый технологический уровень, обратились к созданию моделей алгоритмов высоких порядков, которые в условиях развития микроэлектроники стали практически реализуемыми. Вопросам разработки теоретических основ создания систем телекоммуникаций передачи речевой информации посвящено достаточно много трудов известных авторов: Сапожков М.А. [1], Фланаган Дж. Л. [2], Рабинер Л.Р., Гоулд Б. [3], Назаров М.В., Прохоров Ю.Н. [4]

Решение многих из приведенных вопросов основано на методах оптимизации, рассмотренных в работах Граничина О.Н., Поляка Б.Т. [5], Нестерова Ю.Е. [6] и др.

С их помощью решаются задачи параметрического анализа, синтеза и интеграции систем. Развитые в работах Катковника В.Я. [7] теории позволяют решать задачи локальной аппроксимации и сглаживания сигналов. Предложенные ими методы делают возможным получение решений при самых общих функциональных ограничениях, налагаемых на сигналы и помехи.

Информационно - управляющие телекоммуникационные системы аудиообмена

Структурная схема цифрового абонентского устройства современной оперативно-командной телекоммуникационной системы обмена аудиокомандной, телеметрической и другой информацией имеет вид, представленный на рис. 1.

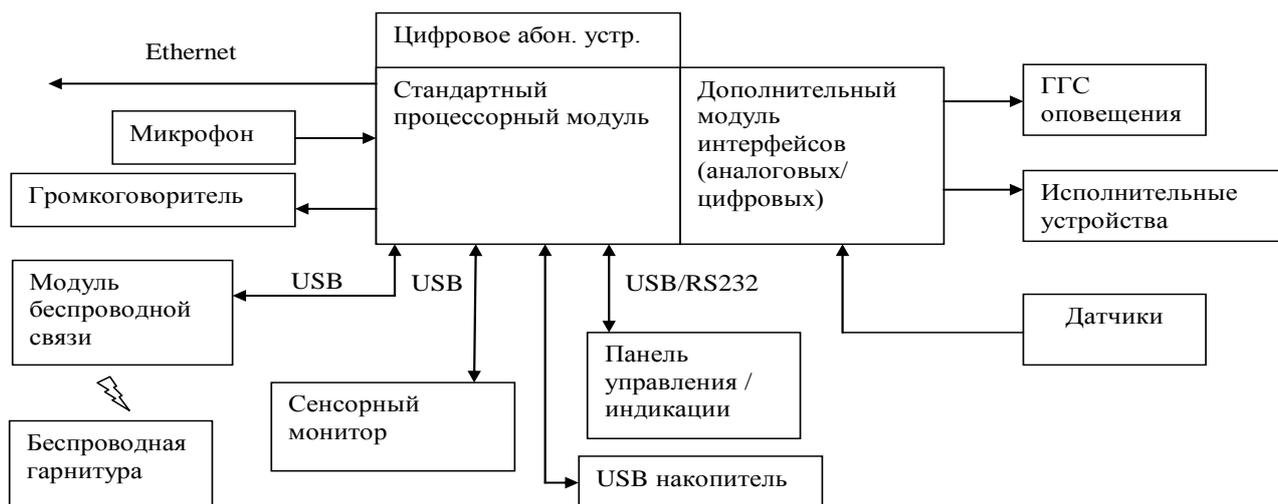


Рис. 1. Структурная схема цифрового абонентского устройства современной оперативно-командной системы телекоммуникаций

В процессорном модуле абонентского устройства может применяться встраиваемый одноплатный компьютер. Периферийные устройства могут подключаться по скоростным каналам и шинам расширения. Каналы Gigabit Ethernet позволяют использовать данное абонентское устройство через микропроцессорный стык абонентского доступа в развитой сетевой инфраструктуре системы телекоммуникаций. Каждое абонентское устройство с микрофонным входом должно быть оборудовано системами обработки сигналов [8].

В работе рассмотрены новые модели речевых сигналов и помех, с учетом ограничений в оперативно-командной связи, в распределенных телекоммуникационных системах на многофункциональных объектах (например, на военных кораблях), исследуются одномерные плотности вероятности, корреляционные и спектральные характеристики [9, 10, 11, 12].

Показано, что одной из адекватных характеристик речевого сигнала является функция плотности вероятности, которая может оцениваться путем построения гистограммы по большому числу данных. Представлен разработанный алгоритм построения гистограммы функции плотности вероятности по конечному числу n -разрядных оцифрованных отсчетов в следующем виде [13, 14, 15]:

$$P(x_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=-2^n+1}^{2^n-1} \sum_{i=1}^N \delta_{x_{ij}}, \quad (1)$$

где $P(x_i)$ – оценка вероятности выборки x_i ,

x_i – i -я выборка, представленная номером уровня квантования,

$x_i \in [-2^n + 1, 2^n - 1]$, $|x_{i,\max}| = 2^n - 1$,

i – номер выборки в анализируемом интервале ($i = 1, 2, \dots, N$),

j – номер интервала гистограммы для анализа числа попаданий в него

x_i - тых выборок, $j \in [-2^n + 1, 2^n - 1]$,

δ_{ij} – символ Кронекера, имеющий вид

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i = j, \\ 0, & \text{если } x_i \neq j. \end{cases}$$

Рассмотрено восстановление плотности вероятности речевого сигнала по эмпирическим данным. Исследуются различные аппроксимации функции плотности вероятности. В случае алгебраических и тригонометрических многочленов, описываемых выражениями:

$$\rho(x) = \sum_{k=0}^M a_k x^{M-k}, \quad (2)$$

$$\rho(x) = \sum_{k=0}^M (a_k \cos(k\alpha x) + b_k \sin(k\alpha x)), \quad (3)$$

задача аппроксимации заключается в нахождении их коэффициентов [14]. Если параметр α является известным, то задача нахождения коэффициентов многочленов (2) и (3) относится к задаче линейной регрессии точечного метода наименьших квадратов (МНК), которая решается посредством минимизации квадратичной функции потерь, представляющей невязку эмпирических данных и полученной на их основе оценки.

В общем случае функцию невязки можно записать в виде

$$Q(\theta) = \sum_{k=0}^M (\bar{f}(x_k, \theta) - P(x_k))^2,$$

где $\bar{f}(x_k, \theta)$ – усредненная на k -ом интервале гистограммы оценка функции плотности вероятности $f(x, \theta)$, а θ – вектор параметров, по которым осуществляется минимизация невязки, точнее, вектор коэффициентов p_k , a_k и b_k , от которых многочлены зависят линейно.

Аналогичный вид невязки имеют и при аппроксимации гистограмм многочленами по системам гауссовых и экспоненциальных функций. При этом указанные многочлены описываются выражениями

$$\rho(x) = \sum_{k=1}^M A_k e^{-\frac{(x)^2}{B_k}}, \quad (4)$$

$$\rho(x) = \sum_{k=1}^M A_k e^{-\frac{|x|}{B_k}}. \quad (5)$$

В этом случае задача минимизации невязки относится к задачам нелинейной регрессии, к задаче идентификации параметров A_k и B_k методом точечного МНК [16].

Негладкую функцию плотности вероятности можно с помощью метода локальной аппроксимации представить последовательностью многочленов вида (4)–(5), определенных на различных интервалах изменения аргумента. В точках сопряжения на них можно наложить дополнительные ограничения типа равенства. При этом на каждом из таких интервалов коэффициенты многочлена находятся посредством минимизации взвешенной функции невязки вида [10, 17]

$$Q_l(\theta) = \sum_{k=0}^M w(x_k - v_l) (\bar{f}(x_k, \theta) - P(x_k))^2$$

где $w(x)$ – весовая функция, определяющая окно используемых данных, и v_l – величина сдвига окна данных для l -интервала аппроксимации, $l=1, \dots, L$. Полученная таким способом последовательность параметров $\theta_l = \arg \min_{\theta} Q_l(\theta)$ решает задачу аппроксимации.

Зависимости погрешности аппроксимации гистограммы речевого сигнала от порядка многочленов (2)–(5) приведены на рис. 2. Зависимости вычислительных затрат на аппроксимацию гистограммы речевого сигнала от порядка многочленов для рассмотренных выше случаев приведены на рис. 3.

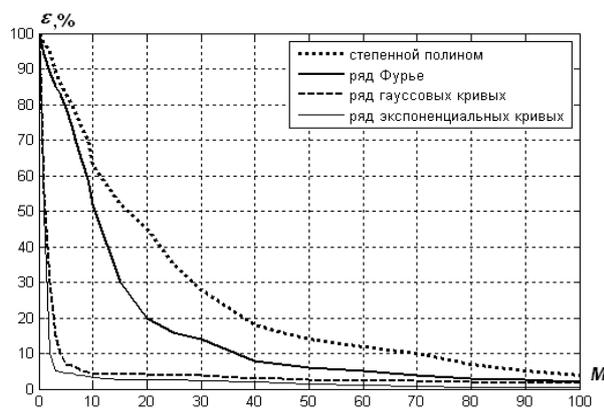


Рис. 2. Зависимости погрешности аппроксимации от порядка M

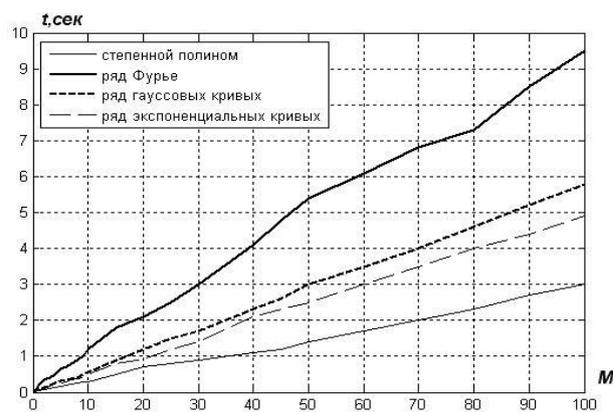


Рис. 3. Вычислительные затраты аппроксимации гистограммы речи

Таким образом, с учетом вышесказанного, для заданной погрешности аппроксимации $\varepsilon \leq 5\%$ и при выполнении условия минимизации вычислительных затрат можно отдать предпочтение аппроксимации функции плотности вероятности речевых сигналов многочленом третьего порядка по системе экспоненциальных функций. Предложен рекуррентный алгоритм вычисления параметров экспонент A_k, B_k для вышеуказанной аппроксимации функции плотности вероятности [18].

По такому же алгоритму (1) исследуется функция плотности вероятности сигналов акустических помех. Показано, что аппроксимация этой функции многочленом третьего порядка по системе функций гауссовых кривых дает погрешность $\varepsilon \leq 4,8\%$ [19].

Исследования спектральных функций речевых сигналов и акустических помех проводились с помощью трех различных алгоритмов с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ) на конечных интервалах. В частности, показано, что информацию о форме спектра речевых сигналов можно получить с помощью следующих алгоритмов [20]:

1) Построение формы спектральной плотности по максимальным значениям модулей спектральных составляющих множества кратковременных ДПФ в соответствии с выражением

$$S_{\max}(l \cdot \Delta f_l) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=1}^M |s_m(l \cdot \Delta f_l)| \cdot k_{lm},$$

где $\Delta f_l = \frac{F_0}{L}$, k_{lm} – единичная функция для l -ой дискретной частотной составляющей m -ой кратковременной спектральной плотности, k_{lm} подчиняется условиям

$$k_{lm} = \begin{cases} 1, & |s_m(l \cdot \Delta f_l)| > |s_{m \pm i}(l \cdot \Delta f_l)|, \\ 0, & |s_{m \pm i}(l \cdot \Delta f_l)| \geq |s_m(l \cdot \Delta f_l)|, \end{cases}$$

M – число интегрированных кратковременных ДПФ, $i = 1, 2, \dots, M$.

2) Построение формы спектральной плотности по средним значениям модулей спектральных составляющих кратковременных ДПФ

$$S_{cp}(l \cdot f_l) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{l=0}^{L-1} |s_m(l \cdot \Delta f_l)|.$$

3) Спектральную функцию распределения плотности мощности по частоте получаем применением ДПФ от интегрированной автокорреляционной функции (АКФ) $R_M(kT)$ на конечном интервале из N отсчетов в виде дискретных отсчетов на частоте $\omega_l = 2\pi \frac{F_0}{N} \cdot l$.

Выражение спектральной функции имеет вид

$$G(\omega_l) = \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{K-1} R_M(kT) e^{-j\omega_l kT}.$$

Исследования спектральных характеристик различных акустических помех осуществлялись так же преобразованием кратковременного ДПФ от АКФ акустических шумов, то есть по выражению $G_{II}(l \cdot f_l) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K-1} R_{II}(kT) e^{-j2\pi l f_l kT}$, где $R_{II}(kT)$ – АКФ акустической помехи на конечном интервале.

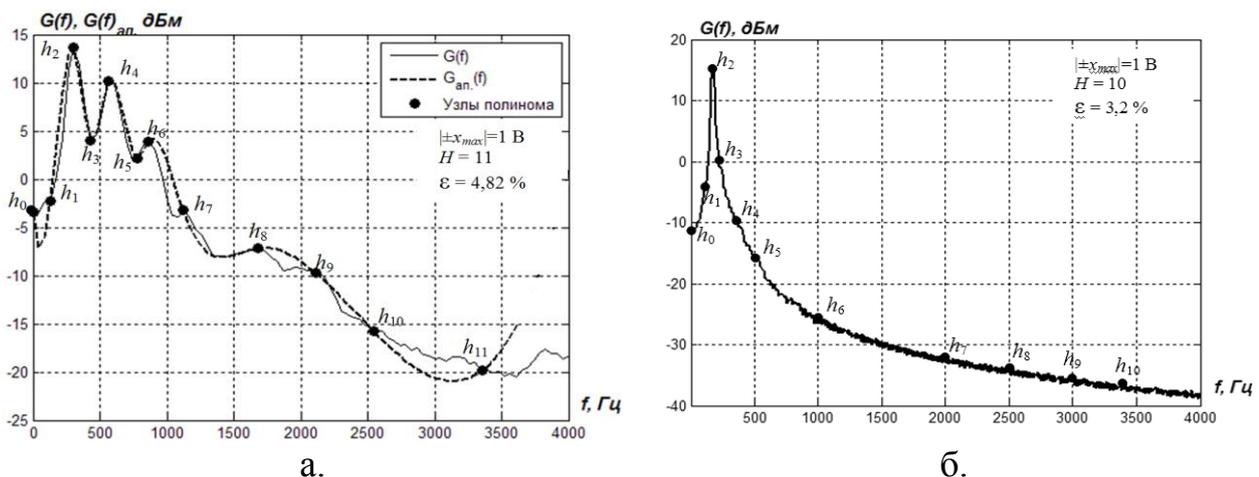


Рис. 4. Аппроксимация спектральной плотности интерполяционным многочленом Лагранжа и спектральные функции плотности мощности акустического шума

На рис. 4 видно, что при значениях порядка многочлена $H=10\div 11$ достигается погрешность аппроксимации $\varepsilon < 4,9\%$.

В работе исследуются параметры систем аудиообмена, влияющих на эффективность передачи информации речевыми сигналами. В частности, исследуется влияние отношения сигнал/помеха на слоговую разборчивость с помощью инструментально-расчетного метода. Результаты исследований зависимости слоговой разборчивости от отношения сигнал/шум представлены на рис. 5. Из рис. 5 видно, что слоговая разборчивость будет удовлетворять требованию $S \geq 93\%$ при отношении сигнал/помеха $P_c/P_{ак. пом.} \geq 20$ дБ.

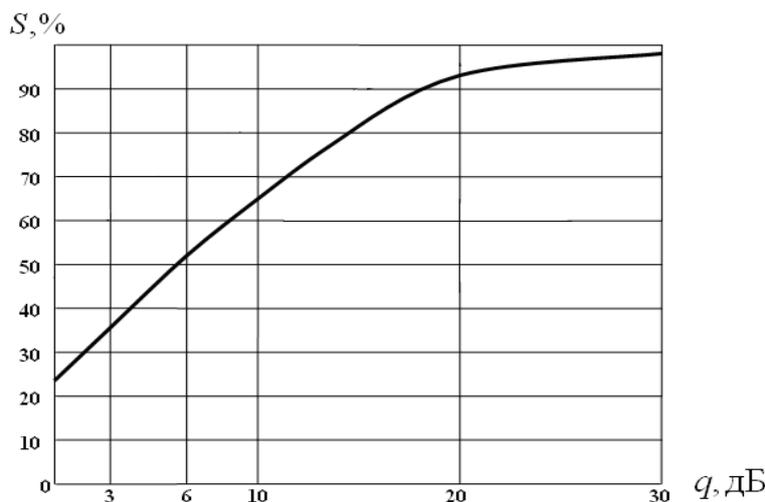


Рис. 5. График зависимости значения слоговой разборчивости от отношения сигнал/ак. пом. – q

Также проведены исследования относительных интенсивностей для различных сигналов и акустических помех по методике вычисления отношения интенсивностей звукового давления I относительно нулевого уровня интенсивности $I_0=10^{-12}$ Вт/м² по значениям дисперсий сигналов и помех. Относительные значения звукового давления определяются по выражению $\frac{I}{I_0}$ (дБ) = $10 \lg \frac{k\sigma^2}{S_{сф} \cdot I_0}$, где $S_{сф} = 4\pi R^2$ – площадь сферы, для случая речевого сигнала $k=2$, $R=1$ м; для случая акустической помехи $k=1$, $R=5$ м.

Полученные значения относительных интенсивностей и соответствующие отношения сигнал/шум для различных акустических сигналов представлены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что при наличии таких акустических помех как шум моря, шум ветра, шум в машинном отделении, $P_c/P_{ак. пом.}$ находится в пределах $10,5\div 12,6$ дБ. При таких отношениях сигнал/помеха слоговая разборчивость составляет $S \approx 65\%$ (см. рис. 5). В этом случае передача информации речевыми сигналами системой телекоммуникаций без обработки по повышению отношения сигнал/шум будет существенно затруднена и сообщения абонентом будут восприниматься с затруднениями [21].

Таблица 1 – Относительные интенсивности и отношения сигнал/шум

Вид сигнала	σ^2 (Вт)	$\frac{I}{I_0}$ (дБ)	$\frac{P_c}{P_{ак.пом.}}$ (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

На рис. 7 представлены результаты моделирования фильтра с амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) прямоугольной формы при воздействии на него различных акустических шумовых помех. На рис. 7 проиллюстрировано влияние частоты среза фильтра F_n на отношение $P_c / P_{ак.пом.}$, соответственно на значение величины подавления акустических шумовых помех так как увеличение отношения $P_c / P_{ак.пом.} = \frac{1}{K}$, где $K = \frac{P_{ак.пом.}}{P_{ак.пом.вх.}}$.

Из графиков на рис. 7 видно, что акустические помехи вида «шум ветра», если установить $F_n = 500$ Гц, подавляются на $-(17 \div 23)$ дБ, что увеличивает отношение сигнал/помеха в соответствии с табл. 6.1 до $28,2 \div 34,2$ дБ. Из этих же графиков видно, что при воздействии акустической помехи вида «шум в машинном отделении» и при $F_n = 700-1000$ Гц, такая акустическая помеха подавляется на 12 дБ, что увеличивает результирующее отношение сигнал/помеха до 22,5 дБ. При воздействии акустической помехи вида «шум моря» при $F_n = 800-1000$ Гц данная помеха подавляется на $(11 \div 15)$ дБ, что увеличивает результирующее отношение сигнал/шум до $23,6 \div 27,6$ дБ.

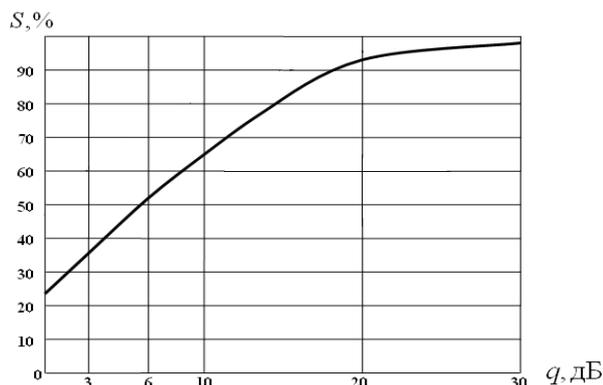


Рис. 6. График зависимости значения слоговой разборчивости от отношения сигнал/ак. пом. – q

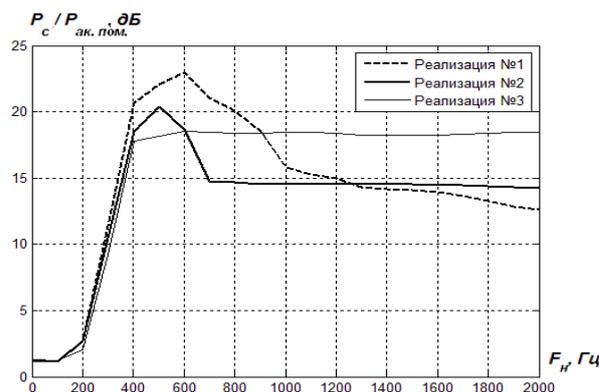


Рис. 7. Зависимость отношения $P_c / P_{ак.пом.}$ на выходе фильтра прямоугольной формы от значения F_n , при фиксированном значении $F_с = 6000$ Гц

На основании исследования, представленного на рис. 7, разработаны рекомендации по созданию многоканального адаптивного алгоритма

подавления акустических шумов и сосредоточенных помех (рис. 8), с применением гребенки узкополосных фильтров с формантным распределением полос режекции [22, 23].

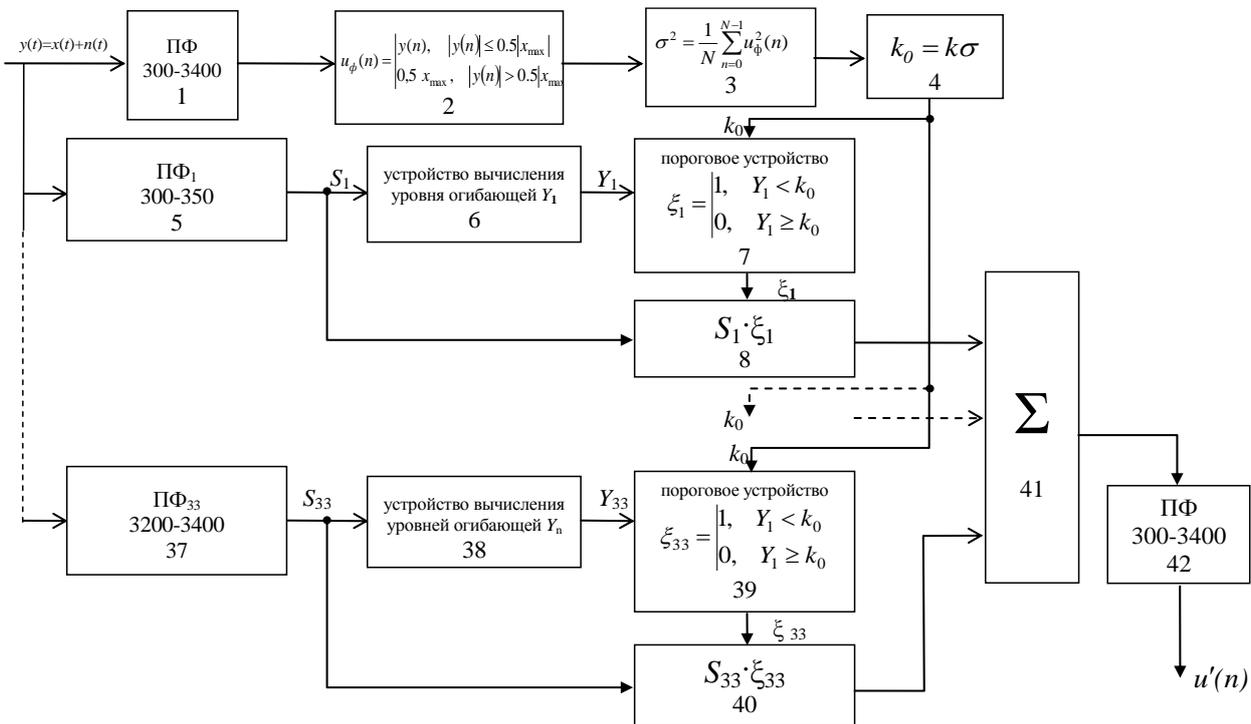


Рис. 8. Устройство адаптивного подавления акустических помех

При этом применен метод выбора числа каналов и значений полос пропускания каналов Δf в зависимости от заданной совместной вероятности сосредоточенных помех и формантных составляющих (рис. 9).

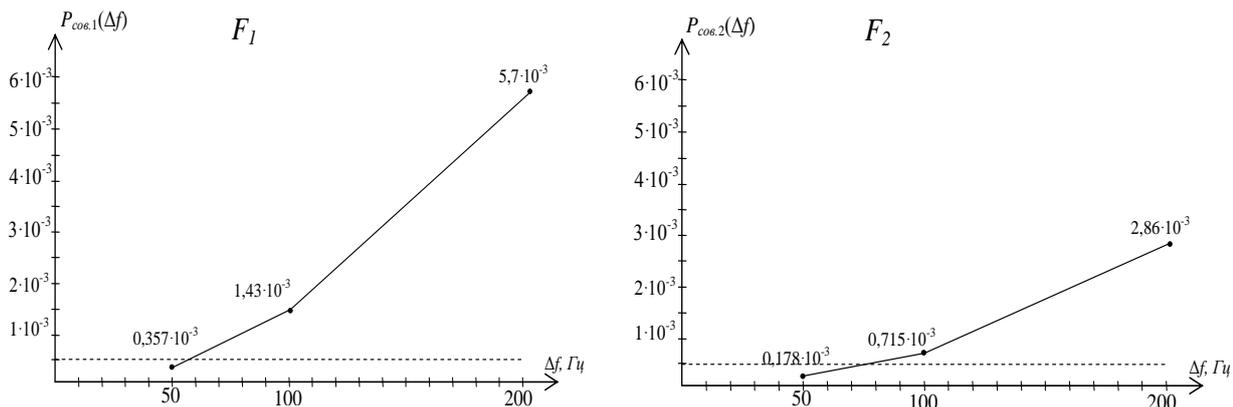
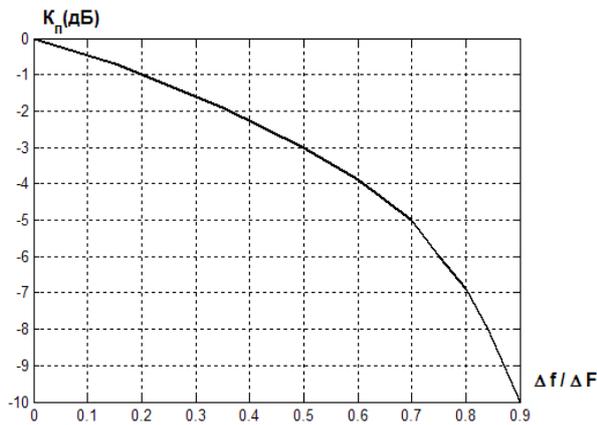
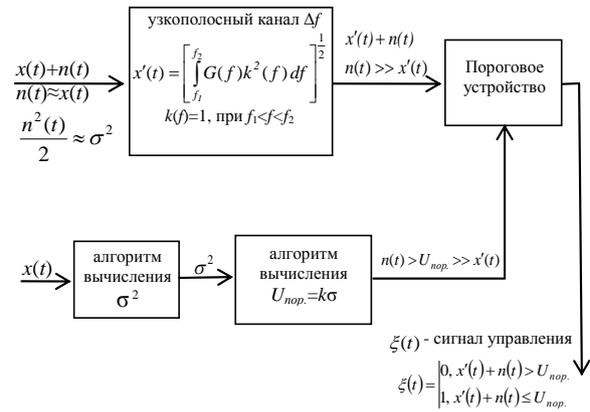


Рис. 9. Зависимость совместной вероятности формантных составляющих и сосредоточенных помех от Δf : F_1 – первая форманта, F_2 – вторая форманта

Однако, появление областей режекции Δf в АЧХ канала полосой ΔF приводит к потерям энергии полезного сигнала на величину ΔP . В работе исследован вопрос о зависимости потерь от полосы области режекции Δf , результаты представлены на рис. 10а.



а) график потерь энергии полезного сигнала в зависимости от ширины области режекции Δf



б) структурная схема формирования сигнала управления

Рис. 10. Зависимости потерь от полосы области режекции

Из графика на рис. 10а видно, что энергетические потери полезного сигнала составляют доли децибела при выполнении условия $\Delta f \ll \Delta F$.

Разработан алгоритм формирования сигналов адаптивного управления каналами (см. рис. 10б), с помощью которого формируются области режекции в многоканальных алгоритмах подавления помех. В частности, данный алгоритм управления реализован в устройстве адаптивного подавления акустических помех (см. рис. 8)

На рис. 11 представлен разработанный алгоритм многоканальной адаптивной фильтрации речевых сигналов и подавления помех методами кратковременного ДПФ [24].

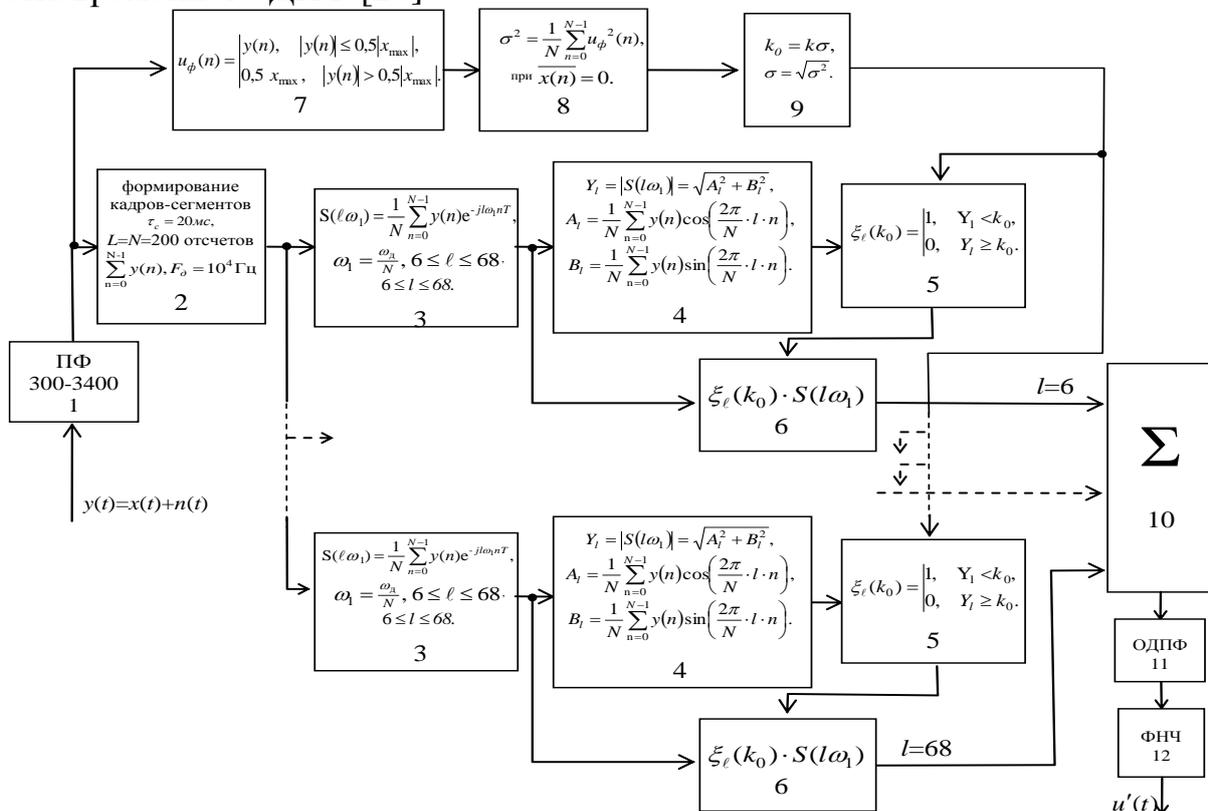


Рис. 11. Устройство многоканальной линейной фильтрации методами ДПФ

С помощью данного алгоритма по числу отсчетов N в кадре τ_c аддитивной суммы сигнала и помехи вычисляются спектральные составляющие с помощью ДПФ на конечном интервале. Получается спектральная функция в дискретном виде, с отсчетами спектральных составляющих через $f_1 = F_\delta / N$, на частотах lf_1 , где l в общем случае в пределах $0 \leq l \leq N-1$. Для реализации тракта с полосой от $F_n = 300$ Гц до $F_\delta = 3400$ Гц, $l_{\min} = F_n / f_1$ и $l_{\max} = F_\delta / f_1$. Вычисляется модуль каждой спектральной составляющей и, если выполняется условие $|s(l \cdot f_1)| > k_0$, то канал считается пораженным помехой и данная составляющая выключается.

Сумма составляющих, у которых их модули не превысили порог k_0 , поступают на сумматор. Выходной суммарный сигнал преобразуется с помощью обратного ДПФ, на выходе получают аналоговый речевой сигнал, очищенный от помех.

Полученные результаты исследований моделированием показывают, что с помощью алгоритма на рис. 11 можно получить подавление помех до 15 дБ. Исследования проводились при следующих параметрах модели: длительность окна $\tau_c = 20 \cdot 10^{-3}$ с, $F_\delta = 104$ Гц, $N = 200$, $f_1 = 50$ Гц, $l_{\min} = 6$, $l_{\max} = 68$.

В работе рассмотрены вопросы компенсации внешних акустических помех-эхосигналов. Для построения более эффективных алгоритмов эхокомпенсаторов, разработана новая модель эхосигналов, построенная на оценке долговременных параметров эха, позволяет уменьшить число отводов адаптивных фильтров и, соответственно, увеличить скорость их настройки [25]. Поэтому проблема высоких порядков адаптивных фильтров в эхокомпенсаторе упрощается, если обеспечивать компенсацию в локальном диапазоне задержек. В этом случае число отводов адаптивных фильтров уменьшается, число локализованных задержек уменьшается до $1 \div 3$. Таким образом, по суммарному числу отводов в схеме эхокомпенсатора имеет место заметный выигрыш. Структурная схема адаптивного фильтра принимает вид как на рис. 12.

Сигнал на выходе адаптивного фильтра может быть представлен в виде

$$\hat{y}(n) = \sum_{l=0}^L u(n+l)h_l(n) = \mathbf{u}^T(n)\mathbf{h}(n),$$

где $\mathbf{h}(n) = \begin{pmatrix} h_0(n) \\ h_1(n) \\ \vdots \\ h_L(n) \end{pmatrix}$ и $\mathbf{u}(n) = \begin{pmatrix} u(n) \\ u(n-1) \\ \vdots \\ u(n-L) \end{pmatrix}$ – векторы коэффициентов адаптивного

фильтра и выборки опорного сигнала $u(n)$, соответственно.

Структура алгоритма многоканальной адаптивной компенсации, разработанного с применением новой модели эхо-сигналов приведена на рис. 13.

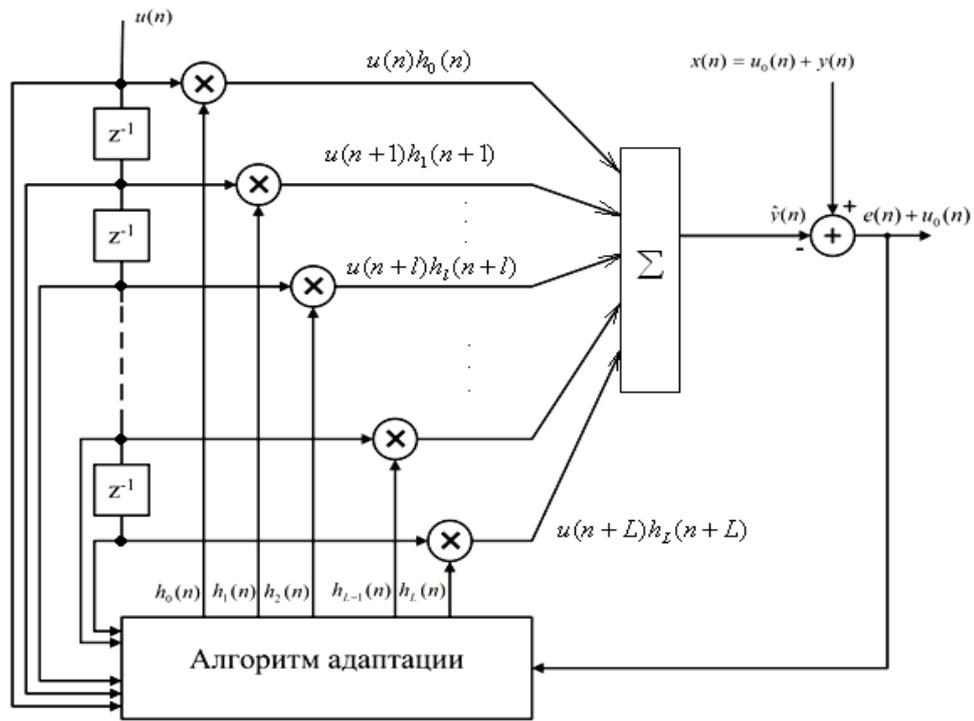


Рис. 12. Структурная схема адаптивного фильтра компенсации эхо-сигнала

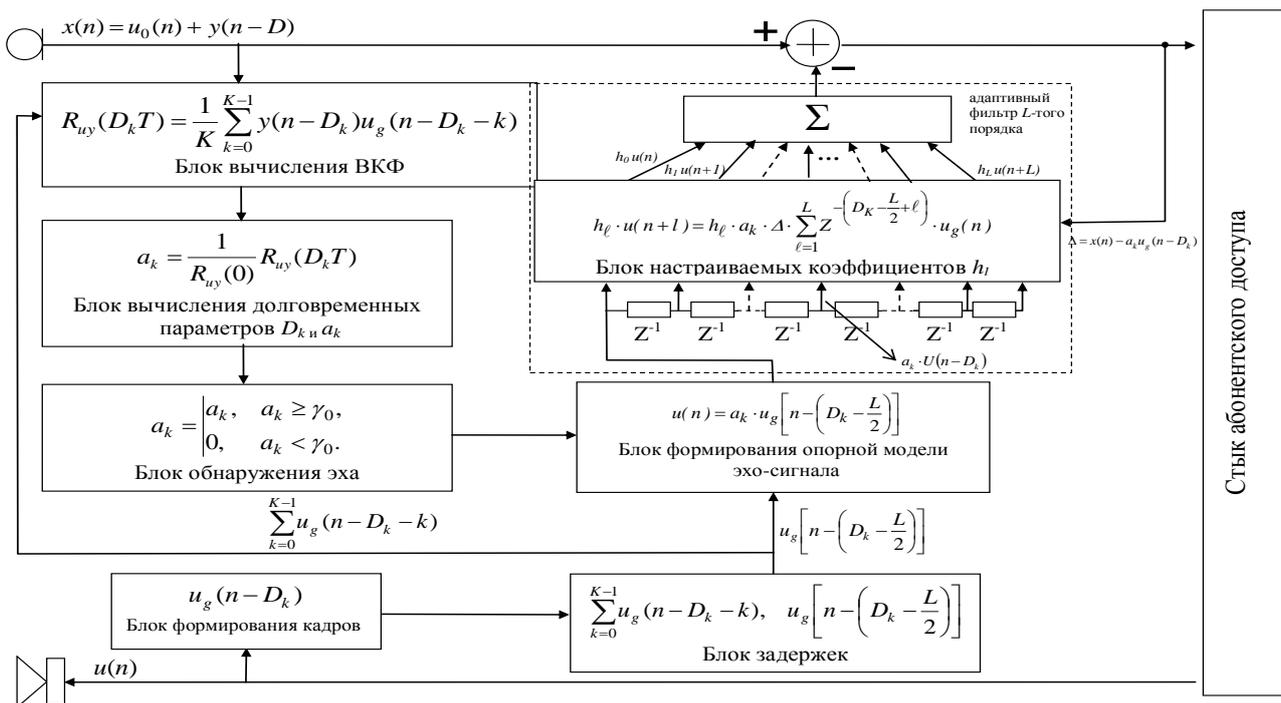


Рис. 13. Структурная схема однополосной обработки многоканальной адаптивной компенсации эхо-сигналов

Назначение блока корреляторов в представленном алгоритме многоканальной компенсации состоит в определении набора ковариационных функций. По максимумам этих функций в блоке настройки задержек оцениваются значения долговременных параметров эхо-сигналов и, соответственно, определяется число каналов компенсации.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования позволили создание более эффективных диспетчерско-технологических систем телекоммуникаций, систем громкоговорящей связи обмена речевыми сообщениями в условиях сложной помеховой обстановки. Разработаны методы построения моделей сигналов и моделей алгоритмов обработки, разработаны методы определения параметров систем передачи и обмена речевыми сообщениями, разработаны более эффективные алгоритмы подавления внешних акустических шумов и помех, разработаны более быстродействующие алгоритмы компенсации эхосигналов. Решены вопросы повышения эффективности передачи информации речевыми сообщениями в распределенных оперативно-командных телекоммуникационных системах на многофункциональных объектах, работающих в условиях воздействия помех интенсивностью до 90 дБ. Представлены разработанные структуры устройств подавления внешних акустических помех и устройств адаптивных эхокомпенсаторов, позволяющие получить на выходе системы аудиообмена отношение $P_c / P_{\text{ак. пом.}}$ более 20 дБ и, соответственно, обеспечить слоговую разборчивость речевых сообщений $S \geq 93\%$.

Литература

1. Сапожков М. А. Речевой сигнал в кибернетике и связи. М.: Связьиздат, 1962. 452 с.
2. Фланаган Дж. Л. Анализ, синтез и восприятие речи. М.: Связь, 1968. 396 с.
3. Рабинер Л. Р., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1975. 835 с.
4. Назаров М. В., Прохоров Ю. Н. Методы цифровой обработки и передачи речевых сигналов. М.: Радио и связь, 1985. 600 с.
5. Граничин О. Н., Поляк Б. Т. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. М.: Наука, 2003. 296 с.
6. Нестеров Ю. Е. Введение в выпуклую оптимизацию. М.: МЦНМО, 2010. 280 с.
7. Катковник В. Я. Методы алгоритмической оптимизации // Методы исследования нелинейных систем автоматического управления. М.: Наука, 1975. 448 с.
8. Кропотов Ю. А. Исследование вопросов повышения эффективности передачи информации речевым сигналом // Радиотехника. 2006. № 11. С. 66-68.
9. Кропотов Ю. А., Ермолаев В. А. Метод барьерных функций в задаче оценивания параметризованной аппроксимации плотности вероятностей с ограничениями // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 9/2. С. 209-211.
10. Кропотов Ю. А., Ермолаев В. А. Оценивание параметризованной аппроксимации плотности вероятностей методом барьерных функций // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 3. С. 37-43.

11. Кропотов Ю. А. Статистические параметры сигналов при проектировании оперативно-командных телекоммуникационных систем // В мире научных открытий. 2010. № 6-1. С. 39-44.
12. Ермолаев В. А., Кропотов Ю. А. О корреляционном оценивании параметров моделей акустических эхо-сигналов // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. № 1. С. 46-50.
13. 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.
14. Кропотов Ю. А., Кульков Я. Ю. Аппроксимация закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2006. № 11. С. 63-66.
15. Кропотов Ю. А. Временной интервал определения закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2006. № 6. С. 97-98.
16. Кропотов Ю. А., Ермолаев В. А. Оценивание акустических тональных сигналов методами линейной и нелинейной регрессии // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 1. С. 71-73.
17. Кропотов Ю. А., Ермолаев В. А., Еременко В. Т., Карасев О. Е. Идентификация моделей дискретных линейных систем с переменными, медленно изменяющимися параметрами // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 1. С. 57-62.
18. Кропотов Ю. А. Алгоритм определения параметров экспоненциальной аппроксимации закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2007. № 3. С. 44-47.
19. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Аппроксимация закона распределения вероятности отсчетов сигналов акустических помех // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 2. С. 61-66.
20. Кропотов Ю. А., Быков А. А., Проскуряков А. Ю. Исследование методов спектрального анализа речевых сигналов // 18-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2008). Севастополь, 2008. С. 308-309.
21. ГОСТ Р 50840-95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости.
22. 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.
23. Ермолаев В. А., Кропотов Ю. А. Метод интерполяционной фильтрации в задачах обработки речевых сигналов во временной области // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 7. С. 12-17.
24. Кропотов Ю. А. Способ многоканального адаптивного подавления акустических шумов и сосредоточенных помех и устройство для его осуществления // Патент на изобретение № 2477533.

25. Кротов Ю. А., Ермолаев В. А. Об адаптивном алгоритме наименьших квадратов в задачах компенсации акустического эха // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. №2. С. 40-44.

References

1. Sapozhkov M. A. *Rechevoj signal v kibernetike i svjazi* [The Speech Signal in Cybernetics and Communication]. Moscow, Communication publisher Publ, 1962, 452 p. (In Russian).
2. Flanagan D. L. *Analiz, sintez i vosprijatie rechi* [Analysis, Synthesis and Speech Perception]. Moscow, Communications Publ, 1968, 396 p. (In Russian)
3. Rabiner L. R., Gould B. *Teorija i primenenie cifrovoj obrabotki signalov* [Theory and Application of Digital Signal Processing]. Moscow, World Publ, 1975, 835 p. (In Russian).
4. Nazarov M. V., Prohorov Ju. N. *Metody cifrovoj obrabotki i peredachi rechevyh signalov* [Methods of Processing and Transmitting Digital Speech Signals]. Moscow, Radio and Communications Publ, 1985. 600 p. (In Russian).
5. Granichin O. N., Poljak B. T. *Randomizirovannye algoritmy ocenivaniya i optimizacii pri pochte proizvol'nyh pomehah* [Randomized Algorithms for Estimation and Optimization with Nearly Arbitrary Interference]. Moscow, Science Publ, 2003. 296 p. (In Russian).
6. Nesterov Ju. E. *Vvedenie v vypuklujuju optimizaciju* [Introduction to Convex Optimization]. Moscow, Moscow Center Continuous Mathematical Education Publ, 2010, 280 p. (In Russian).
7. Katkovnik V. Ja. *Metody algoritmicheskoj optimizacii. Metody issledovanija nelinejnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija* [Algorithmic Optimization Methods. Methods of Nonlinear Systems of Automatic Control]. Moscow, Science Publ, 1975. 448 p. (In Russian).
8. Kropotov Y. A. Issledovanie voprosov povyshenija jeffektivnosti peredachi informacii rechevym signalom [Investigation of How to Enhance the Speech Signal Transmission Information]. *Radiotehnika*, 2006, no. 11, pp. 66-68 (In Russian).
9. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A. Metod bar'ernyh funkcij v zadache ocenivaniya parametrizovannoj approksimacii plotnosti verojatnostej s ogranichenijami [The Method of Barrier Function in the Problem of Estimating the Probability Density Approximation Parameterized with Restrictions]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 9/2, pp. 209-211 (In Russian).
10. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A. Ocenivanie parametrizovannoj approksimacii plotnosti verojatnostej metodom bar'ernyh funkcij [Evaluation of Parameterized Probability Density Approximation Method of Barrier Functions]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*, 2013, no. 3, pp. 37-43 (In Russian).
11. Kropotov Y. A. Statisticheskie parametry signalov pri proektirovanii operativno-komandnyh telekommunikacionnyh system [The Statistical Parameters of Signals in the Design of Operational Command of Telecommunication Systems]. *V mire nauchnyh otkrytij*, 2010, no. 6-1, pp. 39-44 (In Russian).

12. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. O korreljacionnom ocenivanii parametrov modelej akusticheskikh jecho-signalov [About Correlation Estimating Model Parameters of Acoustic Echo]. *Voprosy radioelektroniki*, 2010, Vol. 1, no. 1, pp. 46-50 (In Russian).

13. Kropotov Y. A. Jeksperimental'nye issledovanija zakona raspredelenija verojatnosti amplitud signalov sistemy peredachi rechevoj informacii [Experimental Study of the Law of Probability Distribution of Signal Amplitudes of Transmission of Voice Information]. *Proektirovanie i tehnologija jelektronnyh sredstv*, 2006, Part. 4, pp. 37-42 (In Russian).

14. Kropotov Y. A., Kulkov Y. Y. Approksimacija zakona raspredelenija verojatnosti amplitud rechevogo signala [Approximation of the Laws of Probability Distribution of Amplitudes of the Speech Signal]. *Radiotekhnika*, 2006, no. 11, pp. 63-66 (In Russian).

15. Kropotov Y. A. Vremennoj interval opredelenija zakona raspredelenija verojatnosti amplitud rechevogo signala [The Time Interval Determining the Law of Probability Distribution of Amplitudes of Speech Signal]. *Radiotekhnika*, 2006, no. 6, pp. 97-98 (In Russian)

16. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A. Ocenivanie akusticheskikh tonal'nyh signalov metodami linejnoy i nelinejnoy regressii [Estimation of Acoustic Tones Methods of Linear and Non-Linear Regression]. *Radiotekhnicheskie i telekomunikacionnye sistemy*, 2011, no. 1, pp. 71-73 (In Russian).

17. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A., Eremenko V. T., Karasev O. E. Identifikacija modelej diskretnykh linejnykh sistem s peremennymi, medlenno izmenjajushhimisja parametrami [Identification of Models of Discrete Linear Systems with Variable, Slowly Changing Parameters]. *Radiotekhnika i jelektronika*, 2010, vol. 55, no. 1, pp. 57 – 62 (In Russian).

18. Kropotov Y.A. Algoritm opredelenija parametrov jeksponencial'noj approksimacii zakona raspredelenija verojatnosti amplitud rechevogo signala [The Algorithm Determining Parameters of the Exponential Approximation of the Laws of Probability Distribution of Amplitudes of Speech Signal]. *Radiotekhnika*, 2007, no. 3, pp. 44-47 (In Russian).

19. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Approksimacija zakona raspredelenija verojatnosti otschetov signalov akusticheskikh pomeh. [Approximation of the Laws of Probability Distribution of Samples of Signals of Acoustic Noise] *Radiotekhnicheskie i telekomunikacionnye sistemy*, 2011, no. 2, pp. 61-66 (In Russian).

20. Kropotov Y. A., Bykov A. A., Proskurjakov A. Y. Issledovanie metodov spektral'nogo analiza rechevyh signalov [Research Methods of Spectral Analysis of Speech Signals]. *Materialy 18 Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii «SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii» (CriMiKo'2008)*, Sevastopol, 2008. Vol. 2, pp. 308-309.

21. Russian Standard 50840-95. Peredacha rechi po traktam svjazi. metody ocenki kachestva, razborchivosti i uznavaemosti. [Voice of the Communication Path. Methods for Evaluating the Quality, Legibility and Recognition] (In Russian).

22. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Algoritm podavlenija akusticheskikh shumov i sosredotochennyh pomeh s formantnym raspredeleniem polos rezhekicii [Acoustic

Noise Suppression Algorithm and Concentrated Interference with Formant Band Allocation Rejection]. *Voprosy radioelektroniki*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 60-65 (In Russian).

23. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. Metod interpoljacionnoj fil'tracii v zadachah obrabotki rechevyh signalov vo vremennoj oblasti [Method of Interpolation Filtering Processing Tasks of Speech Signals in the Time Domain]. *Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tehnologij*, 2008, no. 7, pp. 12-17 (In Russian).

24. Kropotov Y. A. Sposob mnogokanal'nogo adaptivnogo podavlenija akusticheskikh шумов i sosredotochennyh помех i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija. patent na izobretenie № 2477533 [The Method of Multi-Channel Adaptive Suppression of Acoustic Noise and Concentrated Interference and Device for its implementation. Patent application № 2477533]. №2011116625/08 of 26.04.2011, patent published 10.03.2013, newsletter number no. 7 (In Russian).

25. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A. Ob adaptivnom algoritme naimen'shikh kvadratov v zadachah kompensacii akusticheskogo jeha [About Adaptive Least Squares Algorithm in Problems of Acoustic Echo Cancellation]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*, 2012, vol. 2, pp. 40-44 (In Russian).

Статья поступила 19 июня 2015 г.

Информация об авторах

Кропотов Юрий Анатольевич – доктор технических наук, профессор. Зав. кафедрой «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные информационно-управляющие системы. Тел.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Белов Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные системы мониторинга и прогнозирования, обработка информации. Тел.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Проскураков Александр Юрьевич – кандидат технических наук. Доцент кафедры «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные системы мониторинга и прогнозирования, обработка информации. Тел.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Колпаков Александр Анатольевич – старший преподаватель кафедры «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных

интересов: распараллеливание вычислительных процессов, обработка информации. Тел.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru
Адрес: Россия, 602264, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

Methods of Designing Telecommunication Information and Control Audio Exchange Systems in Difficult Noise Conditions

Kropotov Y. A., Belov A. A., Proskuryakov A. Y., Kolpakov A. A.

Purpose. Information transfer voice messaging is a powerful tool for operational management, ensuring reliable operation of complex objects, which increases the performance requirements for information management systems audio-exchange in a complex interference environment. **Methods.** During the research applied the methods of adaptive compensation, linear and nonlinear filtering, **Results.** The work carried out research and development of methods and theoretical approaches to the creation of speech signal processing algorithms that improve the efficiency of information and control telecommunication systems audio-exchange when exposed to external acoustic noise of high intensity.

Developed algorithm for estimating the histogram of experimental probability density function of the digitized voice signal. The dependence of the accuracy of estimating the probability density function of analysis time. For example, to compute this probability density function algorithm with an error lowly 5% is required analysis time of 0.3 seconds, for calculations with an accuracy of lowly 1% of the required analysis time of 4.5 seconds.

Compared with the known methods of reduction of the probability density of the speech signal having a significant error recovery algorithms are considered more accurate. Most preferred criteria for maximum precision and the computational complexity is minimal algorithm based on the polynomial approximating the histogram system of exponential functions.

The developed algorithm histogram of experimental evaluation of a one-dimensional function of the law of probability density distribution of voice and recurrent algorithm for determining the parameters of a polynomial approximation of a system of exponential functions provides error recovery above the distribution function of the probability density of less than 5%, when used in the approximating polynomial function of the third order.

A mathematical model of the distribution function of the probability density signals to external acoustic noise interference, obtained using histogram estimation algorithm and recursive algorithm for calculating a parameter representing a number of Gaussian curves of the third order. Error Recovery dimensional probability density distribution function of external acoustic noise is achieved by less than 4.8%.

Studies of various approximations power spectral density voice and acoustic noise interference have shown that the approximation of the Lagrange interpolation polynomial or cubic spline have almost the same error in the approximation of the spectral function of the Lagrange polynomial of order 11 get the error 3,39...4.82%.

Comparative studies of the spectral characteristics of voice and acoustic noise have shown that the spectrum of acoustic noise with respect to the spectrum of the speech signal is shifted to lower frequencies of the audio range and is in the range 0...1000 Hz. Thus, the noise spectrum is concentrated in a sea area from 0 to 500 Hz, the spectrum of wind noise is concentrated in the range of from 0 to 300 Hz, and the noise spectrum in the engine room or the spectrum of noise in the cockpit of an aircraft is centered between 0 and 1200 Hz.

The research allowed the creation of more efficient dispatch and technological systems of telecommunications, Handsfree Voice Message in a difficult jamming environment. The methods of construction of models of signal processing algorithms and models, methods for determining the parameters of transmission systems and voice messaging, develop better algorithms for suppression of external acoustic noise and interference, developed more advanced algorithms of echo cancellation. The issues increase the efficiency of information transfer voice messages in distributed operational command of telecommunication systems on a multi-functional facilities, operating under the impact of noise intensity to 90 dB. The developed device structures suppress external noise and acoustic echo cancellers of adaptive devices to

allow the system to get the output audio exchange ratio exceeding 20 dB, respectively, to provide syllabic intelligibility of voice messages more 93%.

Key words: processing algorithms, information management telecommunications audio-exchange system, adaptive compensation, linear and nonlinear filtering, environmental monitoring, time series, combined forecasting, artificial neural networks.

Information about Authors

Kropotov Yuriy Anatolievich – Dr. habil. of Engineering Sciences, professor, Head of the Department of «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

Belov Alexey Anatolievich – Ph.D. of Engineering Sciences, docent, 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.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Proskuryakov Alexander Jurievich - Ph.D. of Engineering Sciences, 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.: +7-49234-772-72. E-mail:kaf-eivt@yandex.ru

Kolpakov Aleksandr Anatolievich- Senior Lecturer of Department «Electronics and Computer Science» Murom institute (branch) of the «Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs». Field of research: parallelization of computing processes, information processing. Ph.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Address: Russia, 602264, Murom, Orlovskaya street, 23.