

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 004.042

DOI: 10.30987/article_5bd17b40d44b13.13292615

Ю.А. Кропотов, А.А. Белов, А.Ю. Проскуряков, Н.Е. Холкина

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ И АКУСТИЧЕСКИХ ПОМЕХ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЯХ АУДИООБМЕНА

Рассмотрены модели и методы оценивания сигналов при передаче информационных сообщений в телекоммуникационных системах аудиообмена. Представлены одномерные функции распределения вероятностей, которые могут быть применимы для выделения полезных сигналов и акустических шумовых помех. Предложен подход к оцениванию корреляционных и спектральных функций параметров акустических сигналов, основанный на параметрическом представлении акустических сигналов и компонент шумовых составляющих. Также

предложен подход к повышению эффективности подавления помех и выделения необходимой информации при обработке сигналов систем телекоммуникаций. Описаны модели эхо-сигналов и структуры абонентских устройств в оперативно-командных телекоммуникационных системах связи.

Ключевые слова: методы оценивания сигналов, речевые сообщения, телекоммуникационные системы, одномерные функции распределения, случайные процессы, эхо-сигналы.

Yu.A. Kropotov, A.A. Belov, A.Yu. Proskuryakov, N.E. Kholkina

MODELING OF SIGNALS AND ACOUSTIC DISTURBANCES IN TELECOMMUNICATIONS OF AUDIO-EXCHANGE

A problem of signal processing in telecommunication systems of voice messaging is caused by insufficiency of reliable a priori information about characteristics of signals observed. That is why in the paper there are considered methods for the assessment of signal models in the systems of telecommunication of audio-exchange.

The investigation objects are methods for the assessment of analog signal statistical characteristics such as one-dimensional density of probabilities of signals and disturbances in telecommunications, methods for the parameter determination of signals observed being an additive sum of the signal under assessment and acoustic disturbance. The aim of the work is modeling signals and acoustic disturbances, the development of a signal processing structure on the basis of parameter assessments of a process model and a model of acoustic disturbances, the development of a structure of a noise cancelling device in telecommunication systems of audio-exchanges under conditions of acoustic disturbances.

Models and methods for signal assessments at information message transfers in telecommunication

systems of audio-exchanges, methods for the creation of the model of one-dimensional function of the distribution of voice acoustic disturbance probabilities are under consideration. The considered problem in the model formation of function distribution is formulated as a problem of approximation on the basis of optimization methods with limitations which may be applicable for useful signal separation against a background of acoustic noise disturbances. Noise cancelling is based on the methods of adaptive filtering and adaptive equalization.

In the work there is offered a new approach to the assessment of parameters of the process under observation based a parametric presentation of acoustic signals and components of noise constituents. The models of echo-signals and structures of subscriber devices in operation-command telecommunication systems are described.

Key words: methods of signal assessment; voice messages, telecommunication systems, one-dimensional functions of distribution, random processes, echo-signals.

Введение

Задачи обработки сигналов в телекоммуникационных системах аудиообмена обуславливаются потребностями выделения информации, повышения устойчивости систем связи, подавления акустических помех и компенсации эха. К указанным

задачам относятся диагностика объектов по излучаемым шумовым сигналам и повышение эффективности систем связи.

В связи с обработкой сигналов можно поставить задачи: оценивания и аппроксимации одномерных функций рас-

пределения и корреляционных функций по ограниченному набору данных и, на этой основе, формирования базы априорной информации и выделения интервалов стационарности наблюдаемых сигналов. Для построения алгоритма обработки также ставятся задачи: сглаживания и локальной аппроксимации наблюдаемых сигналов и, на этой основе, сегментации нестационарных сигналов; обнаружения и оценивания гармонических сигналов, сигналов с дискретным спектром на фоне акустического шума с непрерывным распределением и,

Теоретические основы

Одномерные функции распределения являются важной статистической характеристикой аналоговых акустических сигналов, которые могут использоваться для синтеза алгоритмов обработки и структур различения речи и шума. Поэтому задача создания модели функций распределения речи может быть сформулирована как задача аппроксимации на основе методов оптимизации с ограничениями [3; 4], а именно как задача минимизации квадрата нормы:

$$\|f(\theta) - \hat{f}\|^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где \hat{f} – вектор значений гистограммы, характеризующей распределение выборок x наблюдаемого сигнала.

Соответственно компонентами вектора $f(\theta)$ являются вероятности, с которыми значения наблюдаемого сигнала попадают в интервалы гистограммы $[a_{k-1}, a_k]$, $k = 1, \dots, n$. Значения компонент $f(\theta)$ в k -м интервале определяются в виде

$$f_k(\theta) = \int_{a_{k-1}}^{a_k} P(x, \theta) dx,$$

где $P(x, \theta)$ – аппроксимация искомой функции плотности вероятности, которая должна подчиняться условиям

$$P(x, \theta) \geq 0, \quad \int_{a_0}^{a_n} P(x, \theta) dx = 1, \quad (2)$$

а θ – вектор параметров, по которым осуществляется минимизация. В целях регуляризации на вектор параметров θ

на этой основе, диагностики объектов; спектрального анализа наблюдаемых сигналов, разрешения источников излучения, селекции речевого сигнала и помехи; формирования модели эхо-сигналов и оценивания ее параметров; идентификации нестационарных сигналов и создания нестационарных моделей по наблюдаемым данным; адаптивной компенсации акустических помех и эхо-сигналов с применением многоканальной и многоскоростной обработки [1; 2].

могут быть наложены дополнительные ограничения.

Статистические характеристики вектора параметров, представляющего решение задачи (1), существенно зависят от объема используемых выборок. Установление этой зависимости является необходимым основанием достоверности полученных результатов аппроксимации.

Широкое распространение получил подход к оцениванию статистических характеристик процессов, основанный на параметрическом представлении случайных процессов. Этот подход используется при анализе временных рядов и предполагает наличие некоторой дискретной модели, описываемой соответствующим разностным уравнением.

В задачах оптимальной фильтрации процессы часто моделируются с помощью динамических систем, возбуждаемых случайными сигналами с известными характеристиками. В случае акустических сигналов такой подход также вполне обоснован, особенно если учесть вполне детерминированный механизм их формирования. В этом случае входные воздействия можно отнести скорее к регулярным сигналам с неизвестными, возможно, изменяющимися параметрами, нежели к случайным процессам. Например, акустический шум вращающейся машины может быть обусловлен в основном гармониками частоты ее вращения.

Акустические и механические резонансы природных и искусственных

объектов под воздействием ветра обуславливают звуки на соответствующих резонансных частотах, интенсивность которых зависит от скорости и направления ветра. Характеристики ветра, имеющего на небольших интервалах вполне регулярный характер, в целом подвержены значительным, возможно, скачкообразным изменениям. Все это в плане борьбы с шумами и выделения полезных сигналов приводит к задаче идентификации параметров как самой модели, так и входных воздействий [5; 6].

В широком смысле подавление помех может основываться как на методах

$$x_k = a_1 x_{k-1} + a_2 x_{k-2} + \dots + a_p x_{k-p} + u_k - b_1 u_{k-1} - b_2 u_{k-2} - \dots - b_q u_{k-q}, \quad (3)$$

либо вида системы в переменных состояния

$$y(k+1) = Ay(k) + Bu(k), \quad x(k) = Cy(k) + Du(k), \quad (4)$$

где $y \in R^n$ – вектор состояния; $u \in R^m$ – вектор входных воздействий; $x \in R^h$ – вектор выходов. Соответственно матрицы A , B , C и D имеют размеры $n \times n$, $n \times m$, $h \times n$ и $h \times m$. При этом оценивание спектров сводится к оцениванию параметров модели (3) или (4).

Уравнение (3) является, как это следует из его названия, комбинацией двух моделей: модели авторегрессии, если все коэффициенты $b_k = 0$, и модели скользящего среднего – если все $a_k = 0$.

$$Y(z) = (zI - A)^{-1} BU(z), \quad X(z) = (C(zI - A)^{-1} B + D)U(z).$$

Соответственно спектры выходов описываются выражением

$$X(\omega) = \left| C(e^{j\omega}I - A)^{-1} B + D \right| U(e^{j\omega}). \quad (5)$$

Обычно модель, описываемая выражениями (4) и (5), зависит только от состояния системы, при этом $x(k) = Cy(k)$, а матрица $D = 0$.

Задача идентификации модели (4) может заключаться не только в оценивании матриц A , B и C , но и в оценивании состояния системы. При этом иногда используется прием, основанный на замене модели в переменных состояния эквивалентной моделью авторегрессии.

Задача идентификации во многих случаях – это задача минимизации некоторого функционала потерь,

адаптивной фильтрации, так и на методах компенсации [1]. В первом случае помеха устраняется с помощью соответствующим образом спроектированных заграждающих фильтров, а во втором – посредством вычитания ее оценки из наблюдаемого сигнала. Однако в последующем, в целях упрощения, подавление будет чаще рассматриваться в узком смысле – как фильтрация помехи.

В качестве моделей сигналов используются дискретные системы, описываемые разностными уравнениями либо вида авторегрессии – скользящего среднего

Для системы (4) изображения вектора переменных состояния и вектора выхода модели записываются в виде

характеризующего отклонение результата аппроксимации $\hat{x}(k)$ от наблюдаемых данных $\bar{x}(k)$, $k = 1, \dots, N$: $\rho(\hat{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}) \rightarrow \min$.

Здесь $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{x}(1) \ \hat{x}(2) \ \dots \ \hat{x}(N))^T$ и $\bar{\mathbf{x}} = (\bar{x}(1) \ \bar{x}(2) \ \dots \ \bar{x}(N))^T$ – векторы соответственно результатов аппроксимации и наблюдаемых данных. Уравнение (2) или (3) выступает при этом в качестве ограничения задачи. Возможны и другие ограничения, обусловленные, например, условиями устойчивости модели.

Указанный функционал потерь при решении некорректных задач дополняется регуляризирующим функционалом $\Omega(\hat{x}(t))$, который областью своего определения может иметь множество функций как дискретного, так и непрерывного времени. При этом задача идентификации принимает вид

$$\rho(\hat{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}) + \alpha \Omega(\hat{x}(t)) \rightarrow \min.$$

Во многих случаях в качестве функционала потерь используется норма, характеризующая расстояние между наблюдаемыми данными и значениями функции, полученной в результате идентификации:

$$\rho(\hat{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}) = \frac{1}{2} \|\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}\|^2.$$

В случае гильбертова пространства норма представляется скалярным произведением, а функционал потерь $\rho(\hat{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}) = \frac{1}{2} \langle \hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}} \rangle$ является квадратичной функцией оценки сигнала по наблюдаемым данным.

Если ограничения также имеют вид квадратичных или линейных функций, то имеет место задача квадратичного программирования.

Вектор $\hat{\mathbf{x}}$ может быть образован выборками функции $\hat{x}(t)$ непрерывного времени, представленной в виде линейной или нелинейной регрессии, а именно в виде функции $\hat{x}(t) = g(t, \mathbf{a})$, зависящей от вектора \mathbf{a} параметров оптимизации. В случае линейной регрессии эта функция принимает вид $\hat{x}(t) = \boldsymbol{\varphi}^T(t) \mathbf{a}$, где $\boldsymbol{\varphi}(t) = (\varphi_1(t) \ \varphi_2(t) \ \dots \ \varphi_n(t))^T$ представляет собой вектор по системе линейно независимых функций $\varphi_k(t)$, $k = 1, \dots, n$.

Вектор $\hat{\mathbf{x}}$ можно при этом записать в виде $\hat{\mathbf{x}} = \Phi \mathbf{a}$, где строками матрицы Φ являются значения транспонированных векторных функций $\boldsymbol{\varphi}(k)$ в точках наблюдения:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varphi}^T(1) \\ \boldsymbol{\varphi}^T(2) \\ \vdots \\ \boldsymbol{\varphi}^T(N) \end{pmatrix}.$$

В случае нелинейной регрессии вектор

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} g(1, \mathbf{a}) \\ g(2, \mathbf{a}) \\ \vdots \\ g(N, \mathbf{a}) \end{pmatrix} \equiv \mathbf{g}(\mathbf{a}).$$

Тогда задачу минимизации функции потерь в случае нелинейной регрессии можно записать в виде

$$\frac{1}{2} \|\mathbf{g}(\mathbf{a}) - \bar{\mathbf{x}}\|^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

а в случае линейной регрессии – в виде

$$\frac{1}{2} \|\Phi \mathbf{a} - \bar{\mathbf{x}}\|^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

Как известно [2], математическое ожидание функции (6) или (7) достигает своего наименьшего значения, если вектор $\mathbf{g}(\mathbf{a})$ или $\Phi \mathbf{a}$ совпадает с условным математическим ожиданием вектора \mathbf{x} $E\{\mathbf{x}|\bar{\mathbf{x}}\}$, рассматриваемым как функция наблюдаемых данных $\bar{\mathbf{x}}$. При этом величина потерь совпадает с условной дисперсией, если отбросить коэффициент 1/2.

Полученный в результате минимизации функции потерь вектор коэффициентов регрессии $\hat{\mathbf{a}}$ определяет оптимальное решение $\hat{x}^*(t) = \boldsymbol{\varphi}^T(t) \hat{\mathbf{a}}$ как функцию непрерывного времени. Это позволяет при необходимости наложить на ее поведение между выборками данных дополнительные ограничения (с помощью, например, регуляризирующего функционала).

Существуют и другие способы оценки параметров модели, например способ, основанный на согласовании корреляционных функций. В частности, такого рода методы используются при сжатии речи и вычислении спектров. Используются методы, основанные на собственных значениях и сингулярных разложениях ковариационных матриц, имеющих тёплицеву структуру [2; 3].

Достижимая точность приближения наблюдаемых данных функцией регрессии зависит в значительной степени от размеров области ее определения. С увеличением размеров области, в пределах которой наблюдаемые данные не стремятся к нулю, точность снижается. Устранить этот недостаток можно, воспользовавшись методом локальной аппроксимации [4; 5]. Приближение наблюдаемых данных в этом случае обеспечивается последовательностью функций регрессии, каждая из которых задана на своем конечном интервале. Одновременно это позволяет

аппроксимировать нестационарные сигналы и системы.

Вопрос сопряжения отдельных функций регрессии можно решить, если дополнить ограничения, представленные в задаче минимизации, условиями согласования значений этих функций и, возможно, значений их производных в узлах сопряжения.

Поставим задачу определения параметров в наблюдаемом сигнале $x(t)$, являющемся аддитивной суммой оцениваемого сигнала $s(t)$ и акустической помехи $\eta(t)$, которая также считается комплексной функцией. В дискретной форме этот сигнал имеет вид

$$x(k) = s(k) + \eta(k) = \sum_{n=1}^p a_n e^{j\left(\frac{\omega_1}{f_0}k + \varphi_n\right)} + \eta(k). \quad (8)$$

Здесь f_0 – частота дискретизации.

Задачу определения параметров функции (8) можно решить также методом максимального правдоподобия, применение которого осложнено недостаточной надежностью априорной информации о распределениях помех [4]. Метод максимального правдоподобия, как известно, в случае независимых одинаково распределенных гауссовых величин эквивалентен методу наименьших квадратов. В этом случае параметры функции (8) можно, в принципе, найти методами нелинейного программирования,

а именно посредством решения задачи минимизации:

$$\{\hat{\omega}_1, \hat{\mathbf{a}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}\} = \arg \min_{\{\omega_1, \mathbf{a}, \boldsymbol{\varphi}\}} \|s - x\|^2.$$

Если ввести векторы выборок выделяемого $\mathbf{s} = (s(1) \ s(2) \ \dots \ s(N))^T$ и наблюдаемого $\mathbf{x} = (x(1) \ x(2) \ \dots \ x(N))^T$ сигналов, векторы $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_p)^T$ и $\boldsymbol{\varphi} = (\varphi_1, \dots, \varphi_p)^T$, то норму можно записать в виде

$$\|s - x\|^2 = \langle s - x, s - x \rangle = \sum_{k=1}^N \left| \sum_{n=1}^p a_n e^{j\left(\frac{\omega_1}{f_0}k + \varphi_n\right)} - x(k) \right|^2.$$

Если к тому же помеха является коррелированной, с корреляционной

$$\|s - x\|^2 = \langle s - x, s - x \rangle = (\mathbf{s} - \mathbf{x})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{s} - \mathbf{x})^*.$$

Как задачу нелинейной регрессии можно рассматривать метод максимального правдоподобия, если только принять, что оцениваемый сигнал имеет вид многочлена $\mathbf{a}^T \boldsymbol{\varphi}(t)$ по системе линейно независимых функций. Это приводит к параметрической задаче максимизации функции правдоподобия $P(y_a^b | \mathbf{a})$, решение которой по

функцией $R(k)$, то квадрат нормы в задаче минимизации принимает вид [8]

наблюдаемым на интервале $[a, b]$ данным y_a^b записывается в виде

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \sup_{\mathbf{a}} P(y_a^b | \mathbf{a}). \quad (9)$$

Метод максимального правдоподобия может быть использован при определенных условиях, если наблюдаемые данные представляют собой последовательность независимых случайных величин с плотностью

вероятности $p(y_k | \mathbf{a})$. При этом функция правдоподобия имеет вид $P(y_a^b | \mathbf{a}) = \prod_{k=1}^n p(y_k | \mathbf{a})$. Аналогично, если известны одномерная плотность вероятности $p(y_k | \mathbf{a})$ и условная плотность вероятности $p(y_{k+1} | y_k, \mathbf{a})$, функция правдоподобия описывается выражением [4; 10]

Результаты экспериментов

В свободном пространстве эхосигналы образуются в результате отражений, обусловленных особенностями рельефа местности, расположения строений и крупногабаритных объектов. Значительные размеры территории приводят к большим задержкам распространения эхо-сигналов и снижению разборчивости речи. Кроме того, в акустическом поле с множеством различных каналов эха часто возникают зоны молчания, что, в частности, необходимо учитывать при проектировании систем оповещения. Импульсные функции в каналах распространения эха можно при этом принять за некоторые постоянные коэффициенты передачи.

С учетом этого модель множественных отражений принимает вид

$$y(t) = \sum_{k=1}^r a_k u(t - \tau_k) = \sum_{k=1}^r a_k u(t - D_k T).$$

при $\hat{a}_k \geq \beta$, $D = \hat{D}_k$, где β – пороговый уровень;

– вычисляется опорный сигнал для адаптивного фильтра L -го порядка

$$\hat{y}_k(n) = \hat{a}_k u_0(n - \hat{D}_k + L/2);$$

– выходной сигнал сумматора

$$x(n) = u_0(n) + e(n) + \gamma(n),$$

где $e(n) = y(t - D) - \hat{y}(t - D)$;

– на выходе шумоподавляющего устройства $x(n) = u_0(n) + e(n) + B\gamma(n)$,

$B < 0,01$, $e(n) < 0,01$, тогда $x(n) \approx u_0(n)$.

Синтез алгоритма

$$P(y_a^b | \mathbf{a}) = p(y_1 | \mathbf{a}) \prod_{k=1}^{n-1} p(y_{k+1} | y_k, \mathbf{a}).$$

Следует отметить, что рассмотренные выше методы параметрической оптимизации и локальной аппроксимации по своему содержанию практически эквивалентны проекционным методам решения операторных уравнений, проекционным и интерполяционным методам анализа и расчета систем [4; 5; 10].

Задача заключается в определении параметров затухания a_k и запаздывания $\tau_k = D_k T$ для r каналов эхо-сигналов.

По условию сигнал $u(t)$, отражения которого формируют эхо-сигналы $y(t)$, является известным и нестационарным. Это позволяет применить при оценивании параметров a_k и D_k технику корреляционного анализа.

Таким образом, алгоритм обработки сигнала для компенсации отражений эхо-сигналов $y(t - D)$ и для подавления акустических шумовых помех $\gamma(t)$ может быть описан в следующем виде:

– на вход микрофона поступает сигнал $x(t) = u_0(t) + y(t - D) + \gamma(t)$;

– в блоке вычисления долговременных параметров методом корреляционно-экстремального оценивания вычисляются D_k и a_k в виде

$$R_{u_0, x} = \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N x(n - D) u_0(n), \quad \hat{a}_k = \frac{R_{u_0, x} \hat{D}_k T}{R_{u_0, u_0}(0)}$$

шумоподавляющего устройства осуществлен с применением таких статистических характеристик сигналов, как аппроксимация функции распределения плотности вероятностей речевых сигналов [7] и аппроксимация функции распределения внешних шумовых акустических помех [6; 9], полученные, например, методами оптимизации с ограничениями (1), (2).

На рисунке показана структура абонентского устройства в соответствии с алгоритмом обработки, представленным выше.

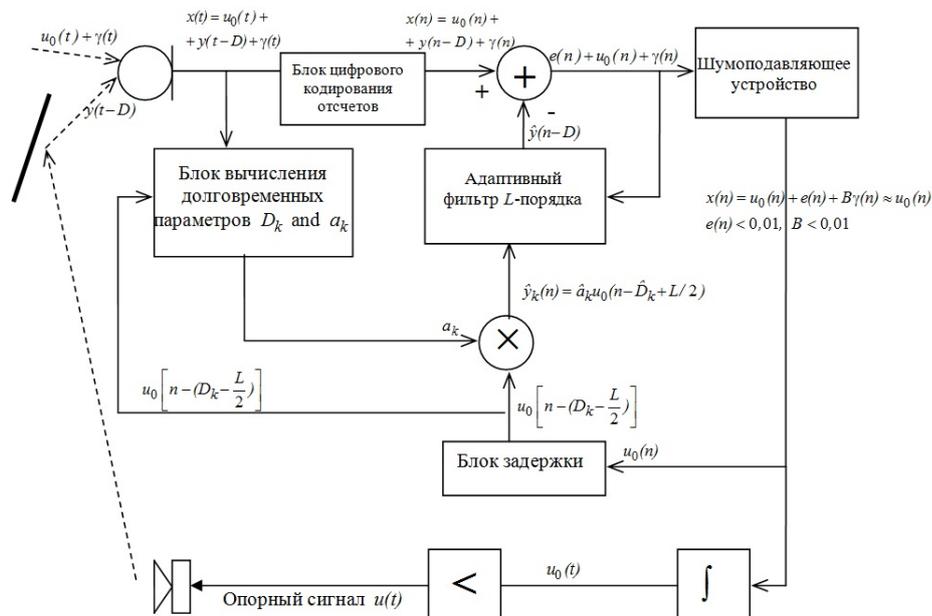


Рис. Абонентское устройство системы громкоговорящей связи с каналом компенсации эхо-сигналов и шумоподавляющим устройством

Согласно рисунку, в абонентском устройстве имеются блок вычисления долговременных параметров эха a_k и D_k , блок формирования опорного сигнала адаптивного фильтра, блок компенсации эхо-сигналов, включающий адаптивный

фильтр и сумматор, а также шумоподавляющее устройство, реализующее алгоритм адаптивного подавления акустических помех с формантным распределением полос режекции.

Заключение

Таким образом, проблема обработки сигналов в телекоммуникационных системах передачи речи обуславливается недостаточностью достоверной априорной информации о характеристиках наблюдаемых сигналов. Задача оценивания параметров моделей решается различными методами в зависимости от ограничений на статистические характеристики наблюдаемых сигналов. Наиболее перспективными методами для данных условий можно считать метод

минимизации функции потерь, метод максимального правдоподобия, метод локальной аппроксимации, когда приближение наблюдаемых данных обеспечивается последовательностью функций регрессии.

Моделирование внешних помех эхо-сигналов можно рассматривать как средство преодоления априорной неопределенности, основанное на извлечении соответствующей информации из результатов наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hansler, E. Topics in acoustic echo and noise control: Selected methods for the cancellation of acoustic echoes, the reduction of background noise, and speech processing / E. Hansler, G. Schmidt. - Berlin; Heidelberg: Springer, 2006. - 642 p.
2. Полак, Э. Численные методы оптимизации. Единый подход / Э. Полак. - М.: Мир, 1974. - 376 с.
3. Björck, Åke. Numerical methods for least squares problems / Åke Björck. - Philadelphia: SIAM, 1996. - 408 p.
4. Катковник, В.Я. Методы алгоритмической оптимизации / В.Я. Катковник // Методы

исследования нелинейных систем автоматического управления. - М.: Наука, 1975. - 448 с.

5. Белов, А.А. Исследование вопросов сжатия и поиска картографической информации методом вейвлет-преобразований в экологической геоинформационной системе / А.А. Белов, Ю.А. Кропотов // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2008. - № 12. - С. 9-14.
6. 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.
7. Быков, А.А. Модель закона распределения вероятности амплитуд сигналов в базисе экспоненциальных функций системы / А.А. Быков, Ю.А. Кропотов // Проектирование и технология электронных средств. - 2007. - № 2. - С. 30-34.
 8. Кропотов, Ю.А. Алгоритм определения параметров экспоненциальной аппроксимации закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала / Ю.А. Кропотов // Радиотехника. - 2007. - № 6. - С. 44-47.
 9. Кропотов, Ю.А. Алгоритм вычисления сигнала управления каналом режекции многоканальной системы передачи акустических сигналов / Ю.А. Кропотов // Вопросы радиоэлектроники. - 2010. - Т. 1. - № 1. - С. 57-60.
 10. Вапник, В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным / В.Н. Вапник. - М.: Наука, 1979. - 448 с.
 1. 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.
 2. Polak, E. *Numerical Methods of Optimization. Single Approach* / E. Polak. - М.: Mir, 1974. - pp. 376.
 3. Björck, Åke. Numerical methods for least squares problems / Åke Björck. - Philadelphia: SIAM, 1996. - 408 p.
 4. Katkovnik, V.Ya. Methods of algorithmic optimization / V.Ya. Katkovnik // *Methods of Automatic Control Non-linear Systems Investigation*. - М.: Science, 1975. - pp. 448.
 5. Belov, A.A. Investigation of problems of compression and search of mapping information through method of wavelet-transformations in ecological geo-information system / A.A. belov, Yu.A. Kropotov // *Bulletin of Computer and Information Technologies*. - 2008. - No.12. - pp. 9-14.
 6. Kropotov, Yu.A. Algorithm of acoustic noise suppression and concentrated interferences with formant distribution of rejection bands / Yu.A. Kropotov, A.A. Bykov // *Problems of Radio Electronics*. - 2010. - Vol.1. - pp. 60-65.
 7. Bykov, A.A. Model of law of signal amplitude probability distribution in basis of exponential functions of system / A.A. Bykov, Yu.A. Kropotov // *Design and Technology of Electronic Means*. - 2007. - No.2. - pp. 30-34.
 8. Kropotov, Yu.A. Algorithm for parameter definition of exponential approximation of voice signal amplitudes distribution law / Yu.A. Kropotov // *Radio Engineering*. - 2007. - No.6. - pp. 44-47.
 9. Kropotov, Yu.A. Algorithm for signal computation of rejection channel control of multi-channel system of acoustic signal transfer / Yu.A. Kropotov // *Problems of Radio Electronics*. - 2010. - Vol.1. - pp. 57-60.
 10. Vapnik, V.N. *Dependences Recovery on Empirical Data* / V.N. Vapnik. - Science, 1979. - pp. 448.

Статья поступила в редакцию 9.06.18.

Рецензент: д.т.н., доцент, сотрудник Академии ФСО России
Лисичкин В.Г.

Статья принята к публикации 14.08.18.

Сведения об авторах:

Кропотов Юрий Анатольевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Электроника и вычислительная техника» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, тел. (49234) 77-2-72, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Белов Алексей Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры «Электроника и вычислительная техника» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Kropotov Yury Anatolievich, Dr. Sc. Tech., Prof., Head of the Dep. "Electronics and Computer Engineering", Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Belov Alexey Anatolievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Electronics and Computer Engineering", Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Проскуряков Александр Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры «Электроника и вычислительная техника» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Холкина Наталья Евгеньевна, ст. преподаватель кафедры «Электроника и вычислительная техника» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Proskuryakov Alexander Yurievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Electronics and Computer Engineering", Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Kholkina Natalia Evgenievna, Senior Lecturer of the Dep. "Electronics and Computer Engineering", Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.