УДК 621.391

Методы оценивания моделей плотности вероятностей акустических сигналов в телекоммуникациях аудиообмена

Кропотов Ю. А.

Постановка задачи: *оценивание моделей плотности вероятностей акустических сигналов в системах телекоммуникаций актуально ввиду необходимости повышения эффективности передачи данных и повышения эффективности обмена информацией в оперативно-командных системах связи. Работа посвящена исследованиям по решению задач моделирования акустических сигналов в информационно-управляющих телекоммуникационных системах аудиообмена.* ***Объектом исследования*** *являются модели функций плотности вероятностей, по которым возможно создание более эффективных алгоритмов выделения сигналов на фоне внешних акустических шумов и помех в системах телекоммуникаций обмена аудио информацией.* ***Целью работы*** *является разработка и исследование прямых и косвенных методов оценивания плотности вероятностей акустических сигналов и помех, получение и исследование ядерных и проекционных оценок плотности вероятностей, получение гистограммных оценок плотности вероятностей, исследование возможности применения метода барьерных функций для оценивания параметризованной аппроксимации плотности вероятностей акустических сигналов.* ***Используемые методы****: в работе использовались прямые и косвенные методы оценивания моделей плотности вероятностей, теории аппроксимации и интерполяции, метод барьерных функций, метод восстановления плотности вероятностей по ограниченному объему данных, метод условной оптимизации с ограничениями.* ***Научная новизна*** *работы заключается в рассмотрении вопросов параметрического и непараметрического оценивания моделей плотности вероятностей акустических сигналов в телекоммуникационных системах связи и обмена аудиоинформацией.* ***Результат:*** *разработаны и исследованы прямые и косвенные методы оценивания плотности вероятностей акустических сигналов и помех, получены ядерные и проекционные оценки плотности вероятностей, получены гистограммные оценки плотности вероятностей в условиях ограниченного объема данных, обоснована возможность применения метода барьерных функций для оценивания параметризованной аппроксимации плотности вероятностей акустических сигналов. в системах телекоммуникаций.* ***Практическая значимость:*** *применение метода барьерных функций показало его эффективность по сравнению с известными результатами, практическая реализация алгоритмов минимизации приведенных функционалов обусловливает появление вопросов выбора базисных функций и требуемого порядка многочленов, аппроксимирующих плотности распределения.*

Ключевые слова: *плотность вероятностей, акустические сигналы, телекоммуникационные системы, аппроксимация, гистограммное оценивание.*

1. Введение

Оценка моделей распределений плотности вероятностей акустических сигналов и помех основывается на результатах измерений, полученных из эксперимента. Известен ряд методов получения таких оценок. К ним относятся параметрические и непараметрические, прямые и косвенные методы [1].

Библиографическая ссылка на статью:
Кропотов Ю. А. Методы оценивания моделей плотности вероятностей акустических сигналов в телекоммуникациях аудиообмена // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 26-39. URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2017-01/03-Kropotov.pdf.
Reference for citation:
Kropotov Y. A. Methods of estimation models of the acoustic signals probability density in telecommunications audio-exchange systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 1, pp. 26-39. Available at: http://sccs.intelgr.com/archive/2017-01/03-Kropotov.pdf.

Под параметрическими понимаются методы, в рамках которых плотность вероятностей известна с точностью до параметров, то есть имеет вид $f(x,\theta) \equiv f_\theta(x)$, где $x \in R^n$ и $\theta \in R^m$ являются соответственно векторами случайных переменных и неизвестных параметров. Такое задание распределений характерно, например, для задач обнаружения и оценивания сигналов.

В задачах обнаружения предполагается, что наблюдаемые данные принадлежат одному из нескольких классов, каждый из которых характеризуется своей априорно известной плотностью вероятностей $f_k(x)$, или, в частности, своим набором параметров θ_k. При этом плотность $f_k(x) = f(x,\theta_k)$, а задача заключается в соотнесении наблюдаемых данных одному из известных распределений. Наоборот, в задачах оценивания вектор параметров θ считается неизвестным, притом, что сама функция $f(x,\theta)$ может представлять собой известную плотность вероятностей [7, 8, 9].

Если же функция $f(x,\theta)$ не является плотностью вероятностей, то методы оценивания вектора параметров θ считаются непараметрическими. В данном случае – это задача аппроксимации или приближения наблюдаемых данных. Полученная в результате аппроксимации функция $f(x,\theta)$ должна удовлетворять ограничениям

$$f(x,\theta) \geq 0 \text{ и } \int_{-\infty}^{\infty} f(x,\theta)dx = 1. \tag{1.1}$$

Провести четкое разграничение между параметрическими и непараметрическими методами оказывается не всегда возможным. Так, задачу приближения данных смесью известных распределений можно представить функциями плотности в виде

$$\psi_k(x,\theta_k),\ f(x,\theta) = \sum_k a_k \psi_k(x,\theta_k),\ \sum_k a_k = 1. \tag{1.2}$$

В этом случае функцию плотности (1.2) целесообразнее отнести к классу непараметрических задач. Однако если коэффициенты $a_k \geq 0$ являются известными, то задачу можно рассматривать как параметрическую.

2. Прямые и косвенные методы оценивания плотности вероятностей

В ряде работ методы оценивания плотности вероятностей подразделяют на прямые и косвенные. При этом основной чертой прямых методов считается использование прямой связи искомой плотности с эмпирическими данными [2]. Так, к прямым относятся методы, основанные на решении интегрального уравнения, связывающего плотность вероятностей с эмпирической функцией распределения

$$\int_{-\infty}^{\infty} I(x-v) f(v)dv = F_n^*(x), \tag{2.1}$$

где $F_n^*(x)$ является эмпирической функцией распределения ступенчатого вида. При этом решение уравнения (2.1) дает искомую оценку плотности вероятностей.

Эмпирическая функция распределения находится по формуле

$$F_n^*(x) = \frac{1}{N}\sum_{l=1}^{N} I_{(-\infty,\, x]}(x_l), \tag{2.2}$$

где $I_{(-\infty,\, x]}(x_l)$ – индикатор множества $(-\infty, x]$,

$$I_{(-\infty,\, x]}(x_l) = \begin{cases} 1, & x_l \in (-\infty, x] \\ 0, & x_l \notin (-\infty, x] \end{cases},$$ N – объем выборки.

Задача решения уравнения (2.1) с функцией (2.2), как уже указывалось, относится к классу некорректных и требует применения особых методов. Особенно некорректность проявляется при небольшом объеме выборки. При этом потребность восстановления плотности вероятностей по ограниченному объему данных возникает довольно часто, например, в связи с анализом и сегментацией нестационарных, в частности, речевых сигналов, статистические характеристики которых могут считаться неизменными только на интервалах однотипных звуков.

В отличие от прямых, косвенные методы основываются на минимизации функционалов среднего риска, описываемых выражениями вида

$$R(\theta) = \int Q(x, \theta) dF(x),$$

или соответствующих им эмпирических функционалов вида

$$R_n(\theta) = \frac{1}{N}\sum_{l=1}^{n} Q(x_l, \theta).$$

По данному критерию к косвенным методам относится, например, метод максимального правдоподобия.

Прямыми методами могут также являться, например, методы гистограмм и методы, основанные на применении аппроксимации $\delta-$функции в выражении вида

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - v) f(v) dv. \tag{2.3}$$

Однако провести четкую границу между прямыми и косвенными методами, в общем, не всегда возможно. И обусловлено это тем, что в обоих случаях задача нахождения оценки плотности может привести к задаче минимизации некоторого функционала от эмпирических данных, в частности, от эмпирической функции распределения.

3. О ядерных и проекционных оценках плотности вероятностей

Непараметрические оценки плотности вероятностей это обычно функции, полученные в результате аппроксимации эмпирических данных, часто по системе линейно независимых функций [2, 3]. Выражение для плотности имеет при этом вид

$$f(x, \theta) = \sum_k a_k \varphi_k(x, \theta_k). \tag{3.1}$$

В качестве системы $\varphi_k(x,\theta_k)$ могут, например, использоваться алгебраические и тригонометрические многочлены, сплайны, функции нормального и двухстороннего экспоненциального распределения с неизвестными параметрами. Параметры функции (3.1) находятся при этом в результате решения задачи минимизации

$$J(f,a,\theta)\to\min, \tag{3.2}$$

с ограничениями

$$f(x,\theta)\geq 0 \text{ и } \int_{-\infty}^{\infty} f(x,\theta)dx=1, \tag{3.3}$$

где a и θ - векторы коэффициентов a_k и параметров функций системы $\varphi_k(x,\theta_k)$.

Если данные представить эмпирической функцией распределения $F^*(x)$, то функционал (3.1), подлежащий минимизации, записывается в виде

$$J(f,a,\theta)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(\hat{F}(x,a,\theta)-F^*(x)\right)^2\mu(dx)+\alpha_N Q(f(x,a,\theta)), \tag{3.4}$$

где $\hat{F}(x,a,\theta)=\int_{-\infty}^{\infty} f(v,a,\theta)dv$ и $Q(f)-$ регуляризирующий функционал, например, вида

$$Q(f)=\int_{-\infty}^{\infty} q(x)\left(f'(x,a,\theta)\right)^2 dx.$$

В этом случае задача минимизации (3.2) записывается в виде

$$\left\{\hat{a},\hat{\theta}\right\}=\arg\min_{a,\theta}\left\|\tilde{F}(x,a,\theta)-F_n^*(x)\right\|^2+\alpha_j Q\left(f(x,a,\theta)\right), \tag{3.5}$$

при ограничениях (3.3).

В случае, когда эмпирические данные представлены эмпирической плотностью вероятностей, задача записывается в виде

$$\left\{\hat{a},\hat{\theta}\right\}=\arg\min_{a,\theta}\sum_{l=1}^{n}\left(a^T\varphi(x_l,\theta)-f_l^*\right)^2+\alpha_j Q\left(f(x,a,\theta)\right). \tag{3.6}$$

Здесь $f_l^*=\dfrac{n_l}{\Delta x_l N}-$ эмпирическая плотность при разбиении области ее определения на интервалы различной длины $\Delta x_l=x_l-x_{l-1}$, n_l- число значений случайной величины, наблюдаемой в интервале Δx_l, и $N-$ объем выборки.

В общем случае нахождение функций плотности является задачей условной оптимизации с ограничениями и требует применения численных методов. Одним из возможных подходов здесь является сведение условной задачи оптимизации к безусловной задаче с помощью методов барьерных или штрафных функций. В рамках этих методов задача условной минимизации сводится к последовательности безусловных задач, отличающихся параметром барьерной или штрафной функции. Согласно [18, 19] метод барьерных функций применим не только при решении задач оптимизации с ограничениями в виде неравенств, но и с ограничениями-равенствами. При использовании метода барьерных функций задача минимизации (3.2) с ограничениями (3.3) сводится к последовательному решению безусловных задач

$$q(a,\theta)=J(a,\theta)-\frac{1}{\lambda_j}\sum_l \mu(f(a^j,\theta^j))\to \min,$$

для заранее заданной последовательности параметра барьерной функции $\lambda_1<\lambda_2<\lambda_3<\cdots$. Барьерная функция может быть задана различными способами. Основное требование, предъявляемое к ней, заключено в условиях: функция $-\frac{1}{\lambda_j}\mu(g_l)$ при любом параметре барьера $\lambda_l>0$ должна стремиться к бесконечности при приближении к границе допустимого множества, то есть $-\frac{1}{\lambda_j}\mu(g_l)\to\infty$, если $g_l\to 0$, а при любом конечном значении $g_l>0$, $-\frac{1}{\lambda_j}\mu(g_l)\to 0$, если $\lambda_j\to\infty$.

Одна из таких функций описывается выражением $-\frac{1}{\lambda}\mu(g_l)=-\frac{1}{\lambda}\ln(-g_l)$, графики которой при нескольких параметрах масштаба приведены на рис. 1.

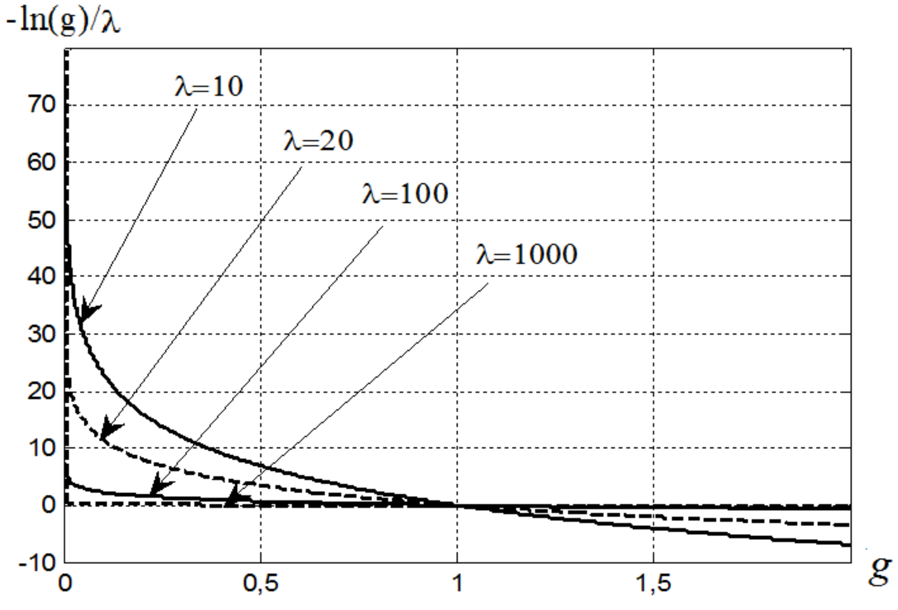

Рис. 1. Графики логарифмической барьерной функции

Каждый цикл минимизации начинается с нахождения точки a^0,θ^0 отрицательного минимума целевой функции (3.5) или (3.6) с параметрами, полученными по завершении предыдущего цикла, то есть по достижении параметром λ_k некоторого значения, обеспечивающего допустимую ошибку оценивания векторов a^*,θ^*. При этом на первом цикле начальные векторы

a^0, θ^0 представляют собой решения задачи (3.5) или (3.6) в отсутствии неравенств.

Однако, при наличии нескольких отрицательных минимумов алгоритм не гарантирует получение неотрицательной функции и требуется увеличение числа ограничений-неравенств в точках отрицательных минимумов x^{l*}, что приводит к минимизации функции $q(a,\theta) = J(a,\theta) - \frac{1}{\lambda}\sum_{l=1}^{h}\mu(f(x^{l*}, a, \theta)) \to \min$.

Следует отметить, что количество точек, в которых на аппроксимирующую функцию накладываются ограничения типа неравенства, в общем, зависит от установленной степени сглаживания данных, числа подлежащих выявлению экстремальных точек и от размера системы базисных функций, увеличиваясь с ростом диапазона скоростей их изменения. В рамках метода барьерной функции осуществляется варьирование аппроксимирующих функций в окрестности отрицательных минимумов. При этом в начале каждого нового цикла минимизации, функция (1.1) варьируется таким образом, чтобы обеспечить сходимость решения к неотрицательной величине, что позволяет представить решение задачи минимизации в виде

$$f(x,a,\theta) = \sum_{k=1}^{m} a_k \phi_k(x,\theta_k) + \sum_{j=1}^{h_l} \delta f(x, x^{j*}),$$

где первое слагаемое отвечает решению задачи в отсутствии неравенств, а второе – вариации этого решения на цикле l.

При гистограммном оценивании плотности варьированию можно подвергать не аппроксимирующие функции, а распределения данных по интервалам и координаты точек, к которым привязываются значения эмпирической плотности вероятностей.

Применение метода барьерных функций показало его эффективность по сравнению с результатами работ [4, 17]. Практическая реализация алгоритмов минимизации приведенных функционалов обусловливает появление вопросов выбора базисных функций и требуемого порядка многочленов, аппроксимирующих плотности распределения. Кажется очевидным, что ответы на эти вопросы зависят от объема используемых данных и свойств исследуемых явлений. В качестве базисных функций можно, в частности, использовать функции нормального распределения и распределения Лапласа. Можно ожидать, что с помощью функций Лапласа лучше аппроксимируются островершинные, а с помощью функций нормального распределения – гладкие распределения. Соответствующие этим функциям многочлены записываются в виде [1, 2, 5, 13]

$$f_L(x) = \sum_{k=1}^{m} c_k e^{-a_k|x-\nu_k|}, \quad f_\Gamma(x) = \sum_{k=1}^{m} c_k e^{-a_k(x-\nu_k)^2}.$$

Помимо экспоненциальных и гауссовых функций в базисных системах могут использоваться степенные и ортогональные многочлены, сплайны и всплески (вейвлеты) [14, 15, 16].

4. Гистограммные оценки плотности вероятностей

Гистограмма – это столбчатая диаграмма-график, характеризующий распределение случайной величины. Высота каждого столбца отражает число значений случайной величины, попадающей в исследуемый интервал [1, 8].

Отношение числа значений n_l случайной величины в исследуемом интевале $(x_{l-1}, x_l]$ к общему числу значений N представляет собой эмпирическую вероятность события $x \in (x_{l-1}, x_l]$ и должно подчиняться ограничению в виде равенства

$$\frac{1}{N}\sum_{l=-N/2}^{N/2} n_l = 1. \tag{4.1}$$

Теоретическое значение этой вероятности записывается через плотность вероятностей как

$$P\left(x \in (x_{l-1}, x_l]\right) = \int_{x_{l-1}}^{x_l} f(x)dx. \tag{4.2}$$

Если приравнять теоретическую и эмпирическую плотности и принять, что в пределах каждого интервала изменением плотности вероятности можно пренебречь, то оценку плотности можно записать в виде

$$f_l(x_1) = \frac{n_l}{N}, \ -\frac{N}{2} \le l \le \frac{N}{2}. \tag{4.3}$$

Значения оценок, полученных по формуле (4.3), далее могут быть использованы в целях аппроксимации плотности вероятностей.

График полученной в результате аппроксимации плотности вероятностей строится по точкам (x_l, f_l) в координатах x, f. При этом, в зависимости от объема данных, могут быть использованы как методы численной интерполяции, так и приближения функций. В обоих случаях задача заключается в построении многочлена $P(x, \mathbf{a})$ по системе функций

$$\varphi_i(x),\ i = 1, \ldots, m,\ P(x, \mathbf{a}) = \sum_{i=1}^{m} a_i \varphi_i(x) = \mathbf{a}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\varphi}(x), \tag{4.4}$$

где $\mathbf{a} = \left(a_1, \cdots, a_m\right)^{\mathrm{T}}$ и $\boldsymbol{\varphi}(x) = \left(\varphi_1(x), \ldots, \varphi_m(x)\right)^{\mathrm{T}}$.

Аппроксимация плотности вероятностей методами сглаживания является задачей наименьших квадратов. Задача здесь заключается в минимизации суммы квадратов невязки сглаживающего многочлена и оценок плотности f_l. Подлежащий минимизации функционал записывается в виде

$$J(\mathbf{a}) = \sum_{l=1}^{n} \left(\mathbf{a}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\varphi}(x_l) - f_l\right)^2. \tag{4.5}$$

В целях сглаживания данных, как и при интерполяции, можно воспользоваться методами локальной аппроксимации, обобщив их в плане требуемого, в частности, гладкого сопряжения многочленов, определенных на последовательности интервалов и доставляющих минимальные значения функционалам вида (3.4) при ограничениях, задаваемых условиями сопряжения.

Гистограммным методам оценивания плотности вероятностей, особенно посредством интерполяции, при небольших размерах выборки присуща проблема разбиения множества значений случайной величины на интервалы. На рис. 2*a*, и рис. 2*b* показаны гистограммы смеси двух нормальных распределений.

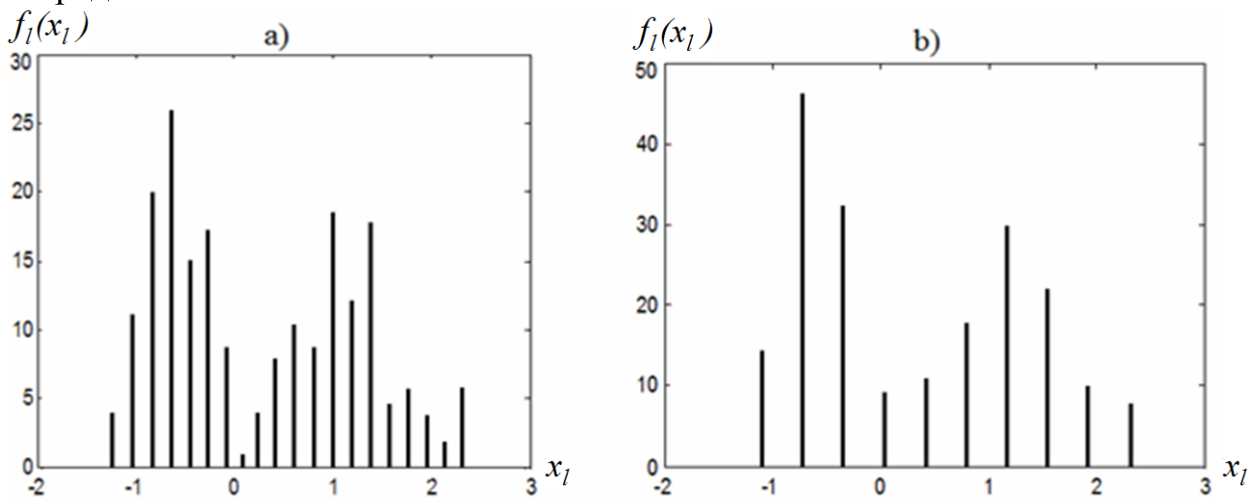

Рис. 2. Гистограммы смеси нормальных распределений при разбиении области значений на $m = 20$ (a) и $m = 10$ (b) интервалов

Из этого рисунка видно, что при разбиении множества значений случайной величины на 20 интервалов (рис. 2a) интерполяционный подход не позволяет восстановить истинную форму распределения и сделать правильные выводы. Ситуация улучшается при разбиении указанного множества на 10 интервалов (рис. 2b). В этом случае получается график, близкий по форме к истинной двумодальной плотности вероятностей.

Решение этой проблемы осуществимо в рамках адаптивного разбиения множества значений случайной величины на интервалы, не обязательно одинаковой длины. Оптимальное разбиение находится в этом случае посредством варьирования длины и центров интервалов и сравнения получаемых результатов, возможно с их последующим усреднением.

При локальной, в том числе обобщенной локальной, аппроксимации проблема разбиения стоит менее остро, и связана, наоборот, с обеспечением достаточного для сглаживания числа интервалов. Однако при этом возникает новый вопрос – вопрос выбора алгоритма, обеспечивающего оптимальную степень сглаживания эмпирических оценок. Разрешение этого вопроса осуществимо методами, основанными на варьировании свободных параметров алгоритма с последующим выбором наилучшей по некоторому критерию оценки.

Еще одной проблемой, как для интерполяционных, так и для сглаживающих методов аппроксимации является проблема обеспечения принадлежности оценки $\hat{f}(x)$ к классу функций плотности вероятностей. Эти условия в рамках локальной аппроксимации могут быть учтены посредством введения в задачу минимизации функционала (3.1) соответствующих ограничений, а в рамках интерполяционного подхода – посредством варьирования длины и центров интервалов разбиения.

Нахождение коэффициентов многочлена методами оптимизации является задачей линейной регрессии. Однако на практике эти многочлены часто строятся по системам типовых плотностей вероятностей, нелинейно зависящих от некоторого множества параметров. В этом случае, если ввести вектор параметров $\theta = \left(\theta_1, L, \theta_r\right)^{\mathrm{T}}$, можно определить многочлен

$$\mathrm{P}(x, \mathbf{a}, \theta) = \sum_{k=1}^{m} a_k \varphi_k(x, \theta) = \mathbf{a}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\varphi}(x, \theta),$$

где $\boldsymbol{\varphi}(x, \theta) = \left(\varphi_1(x, \theta), \ldots, \varphi_m(x, \theta)\right)^{\mathrm{T}}$.

Соответственно оценка плотности записывается в виде

$$\hat{f}(x) = \sum_{k=1}^{m} \hat{a}_k \varphi_k(x, \hat{\theta}) = \hat{\mathbf{a}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\varphi}(x, \hat{\theta}),$$

где параметры оценки являются решением задачи минимизации

$$\left\{\hat{a}, \hat{\theta}\right\} = \arg\min_{a, \theta} \sum_{l=1}^{n} \left(\mathbf{a}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\varphi}(x_l, \theta) - f_l\right)^2.$$

Нахождение векторных параметров a и θ в этом случае относится к классу нелинейных задач, которые, как правило, решаются методами оптимизации с ограничениями.

5. Заключение

Таким образом, в работе исследованы прямые и косвенные методы оценки плотности вероятностей акустических сигналов и помех, имеющих место в информационно-управляющих системах телекоммуникаций. Исследованы ядерная и проекционная модели оценки плотности вероятности, основанные на аппроксимации плотности вероятности. В работе применялся метод оценки гистограммы смеси нормальных распределений, который показал, что при разбиении множества значений случайной величины на интервалы, не всегда возможно восстановить форму распределений. Показано, что восстановление достаточно точной формы распределений можно обеспечить с помощью адаптивного оптимального разбиения путем изменения длины интервалов и центров интервалов разбиения.

Литература

1. Кропотов Ю. А., Парамонов А. А. Методы проектирования алгоритмов обработки информации телекоммуникационных систем аудиообмена. Монография.-Москва Берлин: Директ медиа. 2015. 226 с.

2. Кропотов Ю. А. Временной интервал определения закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2006. № 6. С. 97-98.

3. Ермолаев В. А., Кропотов Ю. А. О корреляционном оценивании параметров моделей акустических эхо-сигналов // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. № 1. С. 46-50.

4. 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.

5. Быков А. А., Кропотов Ю. А. Аппроксимация закона распределения вероятности отсчетов сигналов акустических помех // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 2. С. 61-66.

6. Ермолаев В. А., Карасев О. Е., Кропотов Ю. А. Метод интерполяционной фильтрации в задачах обработки речевых сигналов во временной области // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 7. С. 12-17.

7. Ермолаев В. А., Еременко В. Т., Карасев О. Е., Кропотов Ю. А. Идентификация моделей дискретных линейных систем с переменными, медленно изменяющимися параметрами // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 1. С. 57-62.

8. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A. Algoritmy obrabotki akusticheskih signalov v telekommunikacionnyh sistemah metodami lokal'nogo parametricheskogo analiza [Algorithms for processing acoustic signals in telecommunication systems by local parametric methods of analysis]. *Trudy mezhdunarodnoj sibirskoj konferencii po upravleniju i svjazi SIBCON-2015* [Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015)]. Omsk: Omsk State Technical University. Russia, 2015, pp. 345-348.

9. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. Issledovanie parametrov modelej akusticheskih jeho-signalov s pomoshh'ju metoda ocenki korreljacii [Investigation of parameters of models of acoustic ECHO-signals by method of correlation estimation]. *Trudy 20 mezhdunarodnoj krymskoj konferencii "SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii"* [Proceedings of 20 th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”]. Sevastopol, 2010, vol. 1, pp. 422-423.

10. Kropotov Y. A. Upravlenie podavleniem pomeh kanalov v mnogokanal'nyh sistemah peredachi akusticheskih signalov [Management of the channel suppression hindrances in multichannel systems of transfer acoustic signals]. *Trudy pervoj rossijskoj i tihookeanskoj konferencii "Komp'juternye tehnologii i prilozhenija (RPC 2010)* [Proceedings of First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2010)]. Vladivostok: IACP FEB RAS, 2010, pp. 399-400.

11. Кропотов Ю. А. Статистические параметры сигналов при проектировании оперативно-командных телекоммуникационных систем // В мире научных открытий. 2010. № 6-1. С. 39-44.

12. Кропотов Ю. А., Ермолаев В. А. Вопросы параметрического представления нестационарных сигналов // Проектирование и технология электронных средств. 2010. № 1. С. 31.

13. Быков А. А., Кропотов Ю. А. Модель закона распределения вероятности амплитуд сигналов в базисе экспоненциальных функций системы // Проектирование и технология электронных средств. 2007. № 2. С. 30-34.

14. Белов А. А., Кропотов Ю. А. Исследование вопросов сжатия и поиска картографической информации методом вейвлет-преобразований в экологической геоинформационной системе // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 12. С. 9-14.

15. Кропотов Ю. А., Белов А. А. Исследование статистических характеристик оцифрованных сигналов систем телекоммуникаций аудиообмена // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 4. С. 150-157.

16 Белов А. А., Кропотов Ю. А., Проскуряков А. Ю. Автоматизированный анализ и обработка временных рядов данных о загрязняющих выбросах в системе экологического контроля // Информационные системы и технологии. 2010. № 6 (62). С. 28-35.

17. Кропотов Ю. А. Алгоритм определения параметров экспоненциальной аппроксимации закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2007. № 6. С. 44-47.

18. Ермолаев В. А., Кропотов Ю. А. Оценивание параметризованной аппроксимации плотности вероятностей методом барьерных функций//Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 3 (11). С. 37-43.

19. Ермолаев В. А., Кропотов Ю. 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.

References

1. Kropotov Y. A., Paramonov A. A. *Metody proektirovanija algoritmov obrabotki informacii telekommunikacionnyh sistem audioobmena: monographia* [Methods of designing information processing telecommunications systems sharing audio algorithms: monograph.] Moscow-Berlin, Direct Media Publ., 2015. 226 p. (in Russian).

2. Kropotov Y. A. Vremennoj interval opredelenija zakona raspredelenija verojatnosti amplitud rechevogo signala [The time interval determining the distribution law of probability amplitudes of speech]. *Radiotehnika*, 2006, no. 6, pp. 97-98 (in Russian).

3. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. O korreljacionnom ocenivanii parametrov modelej akusticheskih jeho-signalov [About correlation estimation of the parameters of acoustic echo models]. *Questions of radio-electronics*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 46-50 (in Russian).

4. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Algoritm podavlenija akusticheskih shumov i sosredotochennyh pomeh s formantnym raspredeleniem polos rezhekcii [Algorithm acoustic noise suppression and interference with concentrated formant distribution

rejection bands]. *Questions of radio-electronics*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 60-65 (in Russian).

5. Bykov A. A., Kropotov Y. A. Approksimacija zakona raspredelenija verojatnosti otschetov signalov akusticheskih pomeh [Approximation of law probability distribution of acoustic noise signal samples]. *Radio and telecommunication systems*, 2011, no. 2, pp. 61-66 (in Russian).

6. Ermolaev V. A., Karasev O. E., Kropotov Y. A. Metod interpoljacionnoj fil'tracii v zadachah obrabotki rechevyh signalov vo vremennoj oblasti [Interpolation filtering method in problems of speech signal processing in the time domain]. *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2008, no. 7, pp. 12-17 (in Russian).

7. Ermolaev V. A., Eremenko V. T., Karasev O. E., Kropotov Y. A. Identifikacija modelej diskretnyh linejnyh sistem s peremennymi, medlenno izmenjajushhimisja parametrami [Identification of models for discrete linear systems with variable, slowly varying parameters]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2010, vol. 55, no. 1, pp. 57-62.

8. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A. Algoritmy obrabotki akusticheskih signalov v telekommunikacionnyh sistemah metodami lokal'nogo parametricheskogo analiza [Algorithms for processing acoustic signals in telecommunication systems by local parametric methods of analysis]. *Trudy mezhdunarodnoj sibirskoj konferencii po upravleniju i svjazi SIBCON-2015* [Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015)]. Omsk, Omsk State Technical University, 2015, pp. 345-348.

9. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. Issledovanie parametrov modelej akusticheskih jeho-signalov s pomoshh'ju metoda ocenki korreljacii [Investigation of parameters of models of acoustic ECHO-signals by method of correlation estimation]. *Trudy 20 mezhdunarodnoj krymskoj konferencii "SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii"* [Proceedings of 20th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”]. Sevastopol, 2010, vol. 1, pp. 422-423.

10. Kropotov Y. A. Upravlenie podavleniem pomeh kanalov v mnogokanal'nyh sistemah peredachi akusticheskih signalov [Management of the channel suppression hindrances in multichannel systems of transfer acoustic signals]. *Trudy pervoj rossijskoj i tihookeanskoj konferencii "Komp'juternye tehnologii i prilozhenija (RPC 2010)* [Proceedings of First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2010)]. Vladivostok, 2010, pp. 399-400.

11. Kropotov Y. A. Statisticheskie parametry signalov pri proektirovanii operativno-komandnyh telekommunikacionnyh sistem [Statistical parameters of signals in the design of operational command of telecommunication systems]. *In the World of Scientific Discoveries*, 2010, no. 6-1, pp. 39-44 (in Russian).

12. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A. Voprosy parametricheskogo predstavlenija nestacionarnyh signalov [Questions parametric representation of non-stationary signals]. *Design and technology of electronic means*, 2010, no. 1, p. 31 (in Russian).

13. Bykov A. A., Kropotov Y. A. Model' zakona raspredelenija verojatnosti amplitud signalov v bazise jeksponencial'nyh funkcij sistemy [Model law probability distribution of the signal amplitudes in the basis of the system of exponential functions]. *Design and technology of electronic means*, 2007, no. 2, pp. 30-34 (in Russian).

14. Belov A. A., Kropotov Y. A. Issledovanie voprosov szhatija i poiska kartograficheskoj informacii metodom vejvlet-preobrazovanij v jekologicheskoj geoinformacionnoj sisteme [Study on the compression and map information search method wavelet transforms environmental geographic information system]. *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2008, no. 12, pp. 9-14 (in Russian).

15. Kropotov Y. A., Belov A. A. Research of the statistical characteristics of digitized signals in telecommunications audio exchange systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 4, pp. 150-157 (in Russian).

16. Belov A. A., Kropotov Y. A., Proskuryakov A.Y. Avtomatizirovannyj analiz i obrabotka vremennyh rjadov dannyh o zagrjaznjajushhih vybrosah v sisteme jekologicheskogo kontrolja [Automated analysis and processing of time-series data on polluting emissions in the system of environmental control]. *Information systems and technologies*, 2010, no. 6 (62), pp. 28-35 (in Russian).

17. Kropotov Y. A. Algoritm opredelenija parametrov jeksponencial'noj approksimacii zakona raspredelenija verojatnosti amplitud rechevogo signala [The algorithm for determining the parameters of the exponential approximation law of the probability distribution of the amplitude of the speech signal]. *Radiotehnika*, 2007, no. 6, pp. 44-47 (in Russian).

18. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. Ocenivanie parametrizovannoj approksimacii plotnosti verojatnostej metodom bar'ernyh funkcij [Evaluation of parameterized probability density approximation method of barrier functions]. *Radio and telecommunication systems*, 2013., no. 3 (11), pp. 37-43 (in Russian).

19. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. Metod bar'ernyh funkcij v zadache ocenivanija parametrizovannoj approksimacii plotnosti verojatnostej s ogranichenijami [The method of barrier functions in the problem of estimating the probability density of the parameterized approximation with constraints]. *Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 9-2, pp. 209-211 (in Russian).

Статья поступила 10 января 2017 г.

Информация об авторе

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

Адрес: Россия, 602264, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

Methods of estimation models of the acoustic signals probability density in telecommunications audio-exchange systems

Y. A. Kropotov

Statement of the problem: *estimation models of the acoustic signals of the probability density in telecom systems is overdue because of the need to improve the efficiency of data transmission and improve the efficiency of the exchange of information on operational and command communications systems. The work is devoted to research on the challenges of modeling the acoustic signals in the information and control systems, telecommunications audioobmena. The object of research is the model probability density functions, which can create a more efficient allocation of algorithms signals against external acoustic noise and interference in the audio information exchange telecommunications systems.* ***Object of research*** *are models of probability density functions, which can create a more efficient allocation of algorithms signals against external acoustic noise and interference in the audio information exchange telecommunications systems*. ***The purpose*** *is to development and study of direct and indirect methods of estimating the density of acoustic signals and interference probabilities, the receipt and investigation of nuclear and projection estimates the probability density histogram to obtain the probability density estimators, investigate the possibility of applying the method of barrier functions for the evaluation of the parameterized approximation of the density of probability of the acoustic signals.* ***Used methods***: *we used direct and indirect methods of estimating models of the probability density approximation and interpolation theory, method of barrier functions, probability density recovery method for a limited amount of data, constrained optimization method with constraints.* ***The scientific novelty*** *of the work lies in addressing the parametric and nonparametric estimation models of the probability density of the acoustic signals in telecommunication systems, communication and exchange of audio information.* ***Results***: *developed and investigated the direct and indirect methods of estimating the density of the acoustic signals of probabilities and interference obtained nuclear and projection assessment of the probability density, obtained histogram estimation of the probability density in a limited amount of data proved that the method of barrier functions for the evaluation of the parameterized approximation of the density of the acoustic signals of probabilities . in telecommunication systems.* ***Practical value***: *the use of the method of barrier functions has shown its efficiency in comparison with known results, the practical implementation of algorithms to minimize the above functional causes the appearance of problems of choice of basis functions and the required order of polynomials approximating the density distribution.*

Key words: *probability density, acoustic signals, telecommunication systems, approximation, histogram evaluation*.

Information about Author

Yurij Anatolievich Kropotov – Dr. of Engineering Sciences, Full Professor. Head of the Department «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

Address: Russia, 602264, Murom, st. Orlovskaya, h. 23.