

Идентификация и оценивание параметров акустических сигналов в телекоммуникационных системах аудиообмена

Ю.А. Кропотов¹, Н.Е. Холкина¹, А.Ю. Проскуряков¹, Д.В. Бейлекчи¹

¹Владимирский государственный университет имени Столетовых, ул. Орловская, 23, Муром, Владимирская область, Россия, 602264

Аннотация. В работе исследуются вопросы формирования моделей стационарных сигналов линейными системами с постоянными параметрами и нелинейными системами, описываемыми функциональными рядами второго, третьего порядков. Так же показано, что нестационарный характер сигналов, в общем случае, может быть представлен системой с переменными параметрами. Полученные в работе уравнения решают задачу идентификации параметров модели нестационарного сигнала с переменным во времени средним значением и дисперсией. Объектом исследования являются стационарные и нестационарные процессы и их статистические характеристики. Целью работы является разработка методов идентификации и оценивания параметров процесса, описывающего акустический сигнал в системах телекоммуникаций.

1. Введение

Решение задачи идентификации параметров стационарных и нестационарных акустических сигналов дает возможность разрабатывать алгоритмы обработки и сжатия сигналов для передачи по телекоммуникационным каналам и в системах аудиообмена.

2. Оценки характеристик стационарных акустических сигналов в телекоммуникациях

К характеристикам стационарных сигналов относятся корреляционные функции, начальные и центрированные моменты высоких порядков, семиинварианты (или кумулянты), а также их спектры – спектры первого и высокого порядка. Известны также другие характеристики, такие как одномерная функция распределения, а также информация Кульбака, энтропия и коэффициент качества шума [1].

По виду одномерной функции распределения можно, например, оценить нелинейные искажения в каналах передачи, а также возникающие при преобразовании акустической энергии в электрический сигнал. Это объяснимо, если принять во внимание различия в нелинейных и инерционных характеристиках преобразователей.

Аналогично можно ожидать, что и ковариационные функции сигналов на выходах различных преобразователей не обязаны описываться одинаковыми функциями. При этом нелинейность преобразователя может особенно проявить себя при высоком уровне помехи. Изменение характеристик выходного сигнала обуславливается также и перемещениями

преобразователя относительно источника акустического сигнала. В любом случае, независимо от причины, возможное влияние характеристик преобразователя на результаты обработки акустического сигнала не должно остаться без внимания.

В качестве меры отклонения распределения случайной величины X , характеризуемой плотностью вероятности $f(x, \varphi)$, от распределения с плотностью $f(x, \theta)$ часто используется информация Кульбака [2]

$$I(\varphi, \theta) = E_{\varphi} \left\{ \log \frac{f(X, \varphi)}{f(X, \theta)} \right\} = \int f(x, \varphi) \log \frac{f(x, \varphi)}{f(x, \theta)} d\mu(x). \quad (1)$$

Эта функция равна нулю, если плотности вероятности $f(x, \varphi)$ и $f(x, \theta)$ по мере $\mu(x)$ совпадают между собой. В остальных случаях $I(\varphi, \theta) > 0$. Если случайная величина x с независимыми значениями на выходе линейного преобразователя имеет плотность вероятности $f(x, \theta)$, а на выходе нелинейного преобразователя – плотность $f(x, \varphi)$, то информация Кульбака

$$I(\varphi, \theta) = \int f(x(\xi), \theta) \left| \frac{dx(\xi)}{d\xi} \right| \log \left| \frac{dx(\xi)}{d\xi} \right| d\xi. \quad (2)$$

Здесь принято, что случайная переменная на выходе нелинейного преобразователя $\xi = \xi(x)$ является монотонной нелинейной функцией выхода линейного преобразователя. Соответственно, $x(\xi)$ – это обратная функция.

В качестве меры отклонения от нормального распределения используется также выражение вида

$$H = - \int f(x, \theta) \log f(x, \theta) dx, \quad (3)$$

именуемое энтропией случайной величины [3]. Своего максимального значения энтропия достигает на гауссовом распределении $f(x, \theta)$.

Посредством энтропии вводится коэффициент качества шума

$$\eta = \frac{1}{2e\pi} e^{2H(x)}, \quad (4)$$

который удовлетворяет неравенству $\eta \leq 1$, если случайная величина X отклоняется от гауссового распределения.

Моменты и спектры высокого порядка позволяют оценивать асимметрию распределений, выделять негауссовы сигналы на фоне гауссовых помех, поскольку для гауссовых помех все семинварианты второго и более высокого порядка равняются нулю. Равняются нулю и соответствующие им спектры высокого порядка.

В качестве оценки близости распределения экспериментальных данных к принятой модели используют также различные критерии согласия. Однако в силу сложности реализации обычно ограничиваются лишь некоторыми параметрами распределений, типа приведенных выше. В целях идентификации распределений используются и моментные функции, в том числе моменты и спектры второго и более высокого порядка [4]. Традиционным является применение при оценке точности моделей математических ожиданий и дисперсий.

Электроакустическим преобразователям свойственны, как правило, неравномерные амплитудно-частотные характеристики. На рисунке 1 эти характеристики представлены передаточной функцией H_1 .

Передаточная функция H_2 характеризует при этом линейные искажения сигнала $x(t)$, передаваемого на фоне помехи $n(t)$. Поэтому при определенных условиях преобразователь следует рассматривать как нелинейную инерционную систему, в которой возможно описание процессов с помощью нелинейных дифференциальных уравнений. Также эту систему преобразователя можно представить в виде нелинейной системы Вольтерра [5].

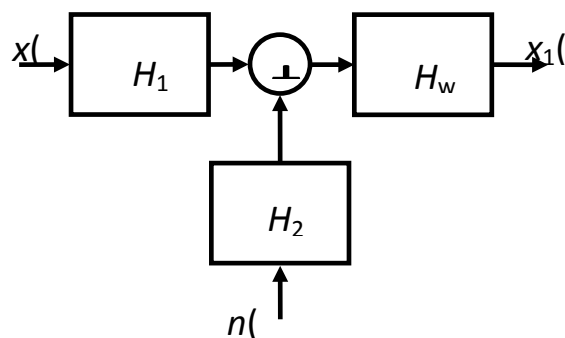


Рисунок 1. Структура преобразователя с обратной системой коррекции.

Соответственно и обратную систему можно искать в классе нелинейных систем Вольтерра, описываемых функциональными рядами Вольтерра. В этом случае нелинейную систему преобразователя на рис. 1 можно достаточно полно описать функциональным рядом Вольтера второго порядка в виде

$$x(t) = \sum_{k=0}^K W_k(y, t), \quad (5)$$

где K - порядок системы, а слагаемое $W_k(y, t)$ имеет вид

$$W_k(y, t) = \int_{t_0}^t \cdots \int_{t_0}^t w_k(t, \tau_1, \dots, \tau_k) y(\tau_1) \cdots y(\tau_k) d\tau_1 \cdots d\tau_k. \quad (6)$$

Пример нелинейной системы Вольтерра второго порядка приведен на рисунке. 2.

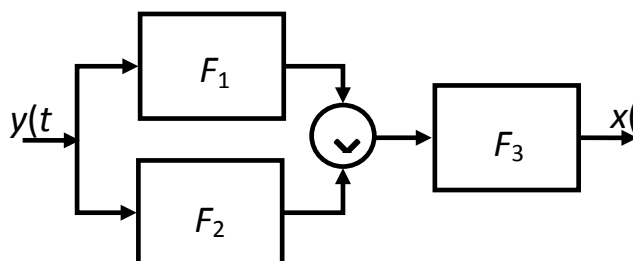


Рисунок 2. Структура нелинейной системы Вольтерра второго порядка.

На рисунке 2 передаточным функциям F_k соответствуют импульсные функции $f_k(t)$. При этом в разложении (5) все слагаемые с индексом $k > 2$, принимаются равными нулю. Выражение (6) при значении $k = 2$ имеет вид

$$W_2(y, t) = \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t f_3(t - \theta) f_1(\theta - \tau_1) f_2(\theta - \tau_2) y(\tau_1) y(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 d\theta. \quad (7)$$

Или, приняв во внимание, что поскольку $f_k(t) = 0$, если $t < 0$, то и

$$W_2(y, t) = \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t f_3(t - \theta) f_1(\theta - \tau_1) f_2(\theta - \tau_2) y(\tau_1) y(\tau_2) d\theta d\tau_1 d\tau_2. \quad (8)$$

Ядро Вольтерра в выражении (8) можно записать в виде

$$w_2(t, \tau_1, \tau_2) = \int_{t_0}^t f_3(t - \theta) f_1(\theta - \tau_1) f_2(\theta - \tau_2) d\theta. \quad (9)$$

Данный подход можно, в частности, использовать с целью учета нелинейных искажений в каналах связи.

Для дискретных систем выражение (6) может быть записано в виде

$$F_k(y, t) = \sum_{n_1=1}^t \cdots \sum_{n_k=1}^t h_k(t, n_1, \dots, n_k) y(n_1) \cdots y(n_k). \quad (10)$$

Задачу идентификации таких систем, состоящую в определении коэффициентов $h_k(t, n_1, \dots, n_k)$, можно считать при этом эквивалентной задаче многомерной регрессии [6].

3. Оценивание нестационарных сигналов в системах телекоммуникационного аудиообмена

По своему характеру нестационарные процессы разделяются на классы [6,7]:

- 1) с переменным во времени средним значением –

$$y(t) = a(t) + u(t), \quad E\{y(t)\} = a(t) \quad (11)$$

- 2) с переменной во времени дисперсией –

$$y(t) = b(t)u(t), \quad E\{y(t)\} = 0, \quad E\{y^2(t)\} = b^2(t)E\{u^2(t)\} \quad (12)$$

- 3) с переменной частотной структурой –

$$y(t) = u(\varphi(t)), \quad (13)$$

- 4) периодически стационарный или цикло-стационарный процесс – это процесс, характеристики которого на интервалах $[kT, (k+1)T]$ изменяются по одним и тем же законам,

- 5) процесс, формируемый динамической системой –

$$\frac{dx(t)}{dt} = A(t)x(t) + B(t)u(t), \quad y(t) = c(t)u(t), \quad x \in R^n, \quad u \in R^m, \quad y \in R. \quad (14)$$

Известны также почти периодические и циклические процессы, которыми не исчерпываются все возможные ситуации. В информационных системах интервалы стационарности процесса могут зависеть от характера передаваемых данных таким образом, что статистические характеристики процесса будут синхронизированы с данными.

Подобная ситуация имеет, например, место в случае акустического речевого сигнала, являющегося стационарным на интервалах, обусловленных передаваемой информацией. Нечто похожее можно, видимо, наблюдать и при передаче информации с помощью динамического хаоса.

Оценки математического ожидания, дисперсии и корреляционных функций используются также в задачах обнаружения изменений в свойствах сигналов и динамических систем. В частности, они используются при сегментации акустического речевого сигнала. В подобных задачах можно принять, что по характеру нестационарности сигнал относится к первому или второму классу. При этом необходимые оценки можно получить методом наименьших квадратов [8,9].

Детерминированные функции $a(t)$ и $b(t)$ нестационарного процесса $y(t) = a(t) + b(t)u(t)$ по отдельности находятся методом наименьших квадратов как функции линейной регрессии

$$a(t) = \sum_{k=1}^n \alpha_k \varphi_k(t) = \Phi^T(t) \alpha \quad \text{и} \quad b^2(t) = \sum_{k=1}^n \beta_k \varphi_k(t) = \Phi^T(t) \beta. \quad (15)$$

Здесь введены векторы $\Phi^T(t) = (\varphi_1(t) \cdots \varphi_n(t))$, $\alpha = (\alpha_1 \cdots \alpha_n)^T$ и $\beta = (\beta_1 \cdots \beta_n)^T$. Вектор коэффициентов α находится, при условии, что функция $b(t)$ известна, в результате минимизации функции потерь

$$Q(\alpha) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N \frac{1}{b^2(t_k)} (y(t_k) - \Phi^T(t_k) \alpha)^2. \quad (16)$$

Если ввести матрицу $\Phi = (\varphi(t_0) \ \varphi(t_1) \ \dots \ \varphi(t_N))$, вектор наблюдаемых данных $\mathbf{y} = (y(t_0) \ y(t_1) \ \dots \ y(t_N))^T$ и диагональную матрицу $P = \text{diag}\left(\frac{1}{b^2(t_0)} \ \frac{1}{b^2(t_1)} \ \dots \ \frac{1}{b^2(t_N)}\right)$, то функцию потерь можно записать в виде

$$Q(\mathbf{a}) = \frac{1}{2} (\mathbf{y} - \Phi^T \mathbf{a})^T P (\mathbf{y} - \Phi^T \mathbf{a}). \quad (17)$$

Тогда вектор коэффициентов, обеспечивающий минимум этой функции, находится из выражения

$$\mathbf{a} = (\Phi P \Phi^T)^{-1} \Phi P \mathbf{y}. \quad (18)$$

Аналогично, если известно математическое ожидание $a(t)$, то вектор коэффициентов $\mathbf{\beta}$ функции $b^2(t)$ находится из условия минимума функции

$$Q(\mathbf{a}) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N \left(\frac{(y(t_k) - a(t_k))^2}{\sigma_u^2} - \varphi^T(t_k) \mathbf{\beta} \right)^2. \quad (19)$$

Для распространения этого подхода на случай, когда неизвестными являются обе функции, $a(t)$ и $b(t)$, предлагается использовать метод последовательных приближений, основанный на поочередном, до получения заданной точности, вычислении указанных функций. Там же рассматриваются рекуррентные алгоритмы вычисления векторов коэффициентов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{\beta}$, а также статистические характеристики полученных решений.

Поскольку полученные таким способом решения имеют силу только на ограниченных интервалах времени, задачу можно дополнить условиями сопряжения отдельных локальных решений, например, условиями гладкого сопряжения [10,11,12]. При решении этой задачи можно воспользоваться рекуррентным алгоритмом, обеспечивающим обновление коэффициентов регрессии по мере смещения скользящего окна конечного набора данных. В принципе, такой подход более соответствует задаче обработки нестационарных сигналов, чем алгоритм обновления по мере увеличения размера выборки [13,14].

Однако, решение задачи (19) не гарантирует, что функция $b^2(t) = \varphi^T(t) \mathbf{\beta}$ будет неотрицательной на интервале ее определения и, соответственно, что такой способ позволяет оценить функцию $b(t)$. Поэтому постановку задачу нахождения функции $b(t)$ необходимо видоизменить. Например, сформулировать ее как задачу минимизации целевой функции (19) при дополнительном ограничении $\varphi^T(t) \mathbf{\beta} \geq 0$.

4. Заключение

В работе показано, что в качестве формирующих моделей стационарных сигналов могут найти применение линейные системы с постоянными параметрами и нелинейные системы Вольтерра. Метод наименьших квадратов является также распространенным средством идентификации систем. В этом плане естественным выглядит и его применение при идентификации динамической, описываемой дифференциальными или разностными уравнениями, модели акустического сигнала. Если принять, что, например, помещение, в котором может распространяться акустический сигнал, характеризуется некоторым числом мод колебаний или резонансных частот, то задача идентификации будет, в частности, заключаться и в оценивании числа и параметров этих мод. Также показано, что нестационарный характер сигнала может иметь различное описание – в виде изменяющегося во времени математического ожидания, дисперсии или частоты, а в общем случае может быть представлен системой с переменными параметрами. Полученные в данной работе уравнения в целом решают задачу идентификации

параметров модели нестационарного сигнала с переменным во времени средним значением и с переменной во времени дисперсией.

Разработанные алгоритмы оценивания характеристик процессов могут, в частности, использоваться при контроле параметров технических средств по излучаемым ими акустическим сигналам. Задачи оценивания параметров сигналов и идентификации систем с переменными медленно изменяющимися параметрами обеспечивают, соответственно, сегментацию сигналов, их классификацию по уровню активности и возможности адаптации, определению уровня подавляемых или компенсируемых помех.

5. Литература

- [1] Кропотов, Ю.А. Моделирование и методы исследований акустических сигналов, шумов и помех в системах телекоммуникаций: моногр. / Ю.А. Кропотов, В.А. Ермолаев. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 251 с.
- [2] Кульбак, С. Теория информации и статистика / С. Кульбак. – М.: Наука, 1967. – 408 с.
- [3] Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
- [4] Brillinger, D.R. A study of second- and third-order spectral procedures and maximum likelihood in the identification of bilinear systems / D.R. Brillinger // IEEE Trans. on Acoustics, Speech and signal processing. – 1990. – Vol. 38(7). – P. 1238-1245.
- [5] Пупков, К.А. Функциональные ряды в теории нелинейных систем / К.А. Пупков, В.И. Капалин, А.С. Ющенко. – М.: Наука, 1976. – 448 с.
- [6] Бондаренко, М.В. Сходимость алгоритмов оценивания нестационарных параметров регрессионно-авторегрессионных объектов при помехах типа скользящего среднего / М.В. Бондаренко, А.С. Позняк // Автоматика и телемеханика. – 1993. – № 8. – С. 90-108.
- [7] Кропотов, Ю.А. Вопросы обработки экспериментальных временных рядов в электронной системе автоматизированного контроля / Ю.А. Кропотов, А.А. Белов, А.Ю. Проскуряков // Вопросы радиоэлектроники. – 2010. – Т. 1, № 1 – С. 95-101.
- [8] Шалыгин, А.С. Прикладные методы статистического моделирования / А.С. Шалыгин, Ю.И. Палагин. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1986. – 320 с.
- [9] Кропотов, Ю.А. Метод интерполяционной фильтрации в задачах обработки речевых сигналов во временной области / Ю.А. Кропотов, В.А. Ермолаев, О.Е. Карасёв // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2008. – №7. – С. 12-17.
- [10] Ermolaev, V.A. Algorithms for processing acoustic signals in telecommunication systems by local parametric methods of analysis / V.A. Ermolaev, Y.A. Kropotov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015). Proceedings. – Omsk: Omsk State Technical University, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147109.
- [11] Кропотов, Ю.А. Алгоритм определения параметров экспоненциальной аппроксимации закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала / Ю.А. Кропотов // Радиотехника. – 2007. – №6. – С. 44-47.
- [12] Кропотов, Ю.А. Модель закона распределения вероятности амплитуд сигналов в базе экспоненциальных функций системы / Ю.А. Кропотов, А.А. Быков // Проектирование и технология электронных средств. – 2007. – №2 – С. 30-34.
- [13] Кропотов, Ю.А. Исследование вопросов сжатия и поиска картографической информации методом вейвлет-преобразований в экологической геоинформационной системе / Ю.А. Кропотов, А.А. Белов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2008. – №12. – С. 9-14.
- [14] Кропотов, Ю.А. Алгоритм подавления акустических шумов и сосредоточенных помех с формантным распределением полос режески / Ю.А. Кропотов, А.А. Быков // Вопросы радиоэлектроники. – 2010. – Т. 1, №1. – С. 95-101.

Identification and estimation parameters of acoustic signals in telecommunication systems of audio exchange

Yu.A. Kropotov¹, N.E. Holkina¹, A.Yu. Proskuryakov¹, D.V. Beilekchi¹

¹Vladimir State University named after Alexander and Nicholay Stoletovs, Orlovskaya street, 23, Murom, Vladimir Region, 602264.

Abstract. The paper research the formation models of stationary signals by linear systems with constant parameters and nonlinear systems described by second-order and third-order functional series. It is also shown that the nonstationary nature of signals, in general, can be represented by a system with variable parameters. The equations obtained in the work solve the problem of identifying the parameters of a model of a non-stationary signal with a time-varying mean value and variance. The object of the study are stationary and nonstationary processes and their statistical characteristics. The aim of the work is to develop methods for identifying and evaluating process parameters describing the acoustic signal in telecommunication systems.

Keywords: acoustic signals, stationary process, non-stationary process, parameter identification, one-dimensional, distribution function, nonlinear system, loss function.