Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 65.011.56
DOI: 10.12737/article_5ac49dc42def93.21192955

Ю.А. Кропотов, Н.Е. Холкина

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ АУДИООБМЕНА

Исследуются вопросы формирования моделей стационарных сигналов линейными системами с постоянными параметрами и нелинейными системами, описываемыми функциональными рядами второго, третьего порядков. Показано, что нестационарный характер сигналов в общем случае, может быть представлен системой с переменными параметрами. Получены уравнения, решающие задачу идентификации параметров модели нестационарного сигнала с переменными во времени средним значением и дисперсией.

Ключевые слова: акустические сигналы, стационарный процесс, нестационарный процесс, идентификация параметров, одномерная функция распределения, нелинейная система, функция потерь.

Yu.A. Kropotov, N.E. Kholkina

IDENTIFICATION AND ESTIMATE OF ACOUSTIC SIGNAL PARAMETERS IN TELECOMMUNICATION SYSTEMS OF AUDIOEXCHANGE

In the paper problems of the formation of stationary signal models by linear systems with constant parameters and non-linear systems described by the functional row of the second and third orders are under investigations. The object of investigation is stationary and transient processes and their statistic characteristics. The purpose of the work is the formation of methods of identification and estimates parameters of the process describing an acoustic signal in the systems of telecommunications.

In the work it is shown that as forming models of stationary signals the linear systems with constant parameters and Wolter non-linear systems can find application. A method of least-squares is also a wide-spread means for system identification. In this sense its applications at the identification of the acoustic signal dynamic model describe with differential and difference equations seem to be natural. If we assume that, for instance, a room in which can spread an acoustic signal is characterized with a certain number of modes of oscillations and resonance frequencies, then the problem of identification will consist, in particular, in the assessment of the number and parameters of these modes. It is also shown that a transient character of a signal may have a different description as a mathematical expectation changing in time, dispersion or frequency, and in a general case, may be presented as a system with varying parameters. The equations obtained in this work solve, in general, the problem of the model parameter identification of a transient signal with the average value variable in time and dispersion.

Key words: acoustic signals, stationary process, transient process, parameter identification, one-dimensional function of distribution, non-linear system, loss function.

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.

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 и другие характеристики, такие как одномерная функция распределения, 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 обусловливается 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]:

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

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

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

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

В качестве меры отклонения от нормального распределения используется также выражение вида

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

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

Посредством энтропии вводится коэффициент качества шума

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

который удовлетворяет неравенству $\eta\le 1$, 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 семиинварианты 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 ввиду 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 рис. 1 эти характеристики представлены передаточной функцией H_1.

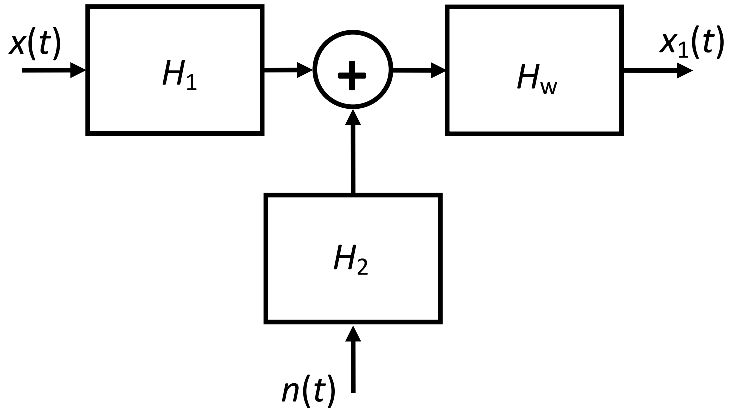

Рис. 1. Структура преобразователя с обратной системой коррекции

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]. 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 Вольтерра второго порядка в виде

$$x(t) = \sum_{k=0}^{K} W_k(y, t), \qquad (1)$$

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

$$W_k(y, t) = \int_{t_0}^{t} \cdots \int_{t_0}^{t} w_k(t, \tau_1, \cdots, \tau_k) y(\tau_1) \cdots y(\tau_k) d\tau_1 \cdots d\tau_k . \qquad (2)$$

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

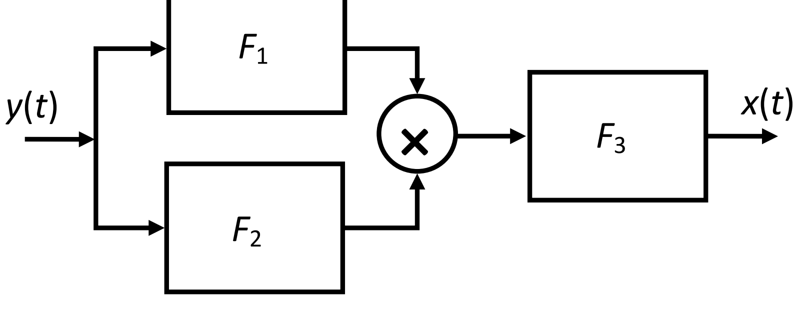

Рис. 2. Структура нелинейной системы Вольтерра второго порядка

На рис. 2 передаточным функциям F_k соответствуют импульсные функции $f_k(t)$. При этом в разложении (1) все слагаемые с индексом $k > 2$ принимаются равными нулю. Выражение (2) при значении $k = 2$ имеет вид

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

или, поскольку $f_k(t) = 0$, если $t < 0$,

$$W_2(y,t) = \int_{t_0}^{t}\int_{t_0}^{t}\int_{t_0}^{t} f_3(t-\theta) f_1(\theta-\tau_1) f_2(\theta-\tau_2) y(\tau_1) y(\tau_2) d\theta\, d\tau_1 d\tau_2 . \quad (3)$$

Ядро Вольтерра в выражении (3) можно записать в виде

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

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

Для дискретных систем выражение (2) может быть записано в виде

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

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

Оценивание нестационарных сигналов в телекоммуникационных системах аудиообмена

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

1) с переменным во времени средним значением -

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

2) с переменной во времени дисперсией -

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

3) с переменной частотной структурой -

$$y(t) = u(\varphi(t));$$

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

5) процесс, формируемый динамической системой, -

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

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 наблюдается, например, 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

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

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

$$Q(\boldsymbol{\alpha}) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N} \frac{1}{b^2(t_k)} \left(y(t_k) - \boldsymbol{\varphi}^T(t_k)\boldsymbol{\alpha} \right)^2.$$

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

$$Q(\boldsymbol{\alpha}) = \frac{1}{2} \left(\mathbf{y} - \Phi^T \boldsymbol{\alpha} \right)^T P \left(\mathbf{y} - \Phi^T \boldsymbol{\alpha} \right).$$

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

$$\boldsymbol{\alpha} = \left(\Phi P \Phi^T \right)^{-1} \Phi P \mathbf{y}.$$

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

$$Q(\boldsymbol{\alpha}) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N} \left(\frac{\left(y(t_k) - a(t_k) \right)^2}{\sigma_u^2} - \boldsymbol{\varphi}^T(t_k)\boldsymbol{\beta} \right)^2. \tag{4}$$

Для распространения этого подхода на случай, когда неизвестными являются обе функции, $a(t)$ и $b(t)$, предлагается использовать метод последовательных приближений, основанный на поочередном вычислении (до получения заданной точности) указанных функций. Здесь же рассматриваются рекуррентные алгоритмы вычисления векторов коэффициентов $\boldsymbol{\alpha}$ и $\boldsymbol{\beta}$, 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]. 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.

Однако решение задачи (4) не гарантирует, что функция $b^2(t) = \boldsymbol{\varphi}^T(t)\boldsymbol{\beta}$ будет неотрицательной на интервале ее определения и, соответственно, что такой способ позволит оценить функцию $b(t)$. Поэтому постановку задачи нахождения функции $b(t)$ необходимо видоизменить. Например, можно сформулировать ее как задачу минимизации целевой функции (4) при дополнительном ограничении $\boldsymbol{\varphi}^T(t)\boldsymbol{\beta} \geq 0$.

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 модели акустического сигнала, описываемой дифференциальными или разностными уравнениями. 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 переменными во времени средним значением и 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 медленно изменяющимися переменными параметрами обеспечивают соответственно сегментацию сигналов, их классификацию по уровню активности и возможности адаптации, определению уровня подавляемых или компенсируемых помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кропотов, Ю.А. Моделирование и методы исследований акустических сигналов, шумов и помех в системах телекоммуникаций: монография / 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. 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.
8. Шалыгин, А.С. Прикладные методы статистического моделирования / А.С. Шалыгин, Ю.И. Палагин. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. - 320 с.
9. Кропотов, Ю.А. Алгоритм определения параметров экспоненциальной аппроксимации закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала / Ю.А. Кропотов // Радиотехника. - 2007. - № 6. - С. 44-47.
10. 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.

1. Kropotov, Yu.A. *Simulation and Methods in Investigations of Acoustic Signals, Noises and Distur-*

bances in Telecommunication Systems: monograph / Yu.A. Kropotov, V.A. Yerolaev. – M.-Berlin: Direct-Media, 2016. – pp. 261.
2. Kulbak, S.T. *Theory of Information and Statistics* / S.T. Kulbak. – M.: Science, 1967. – pp. 408.
3. Lung, L. *System Identification. Theory for User* / L. Lung. – M.: Science, 1991. – pp. 432.
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. Pupkov, K.A. *Functional Rows in Theory of Non-Linear Systems* / K.A. Pupkov, V.I. Kapalin, A.S. Yushchenko. – M.: Science, 1976. – pp. 448.
6. Bondarenko, M.V. Convergence of algorithms to estimate transient parameters of regression auto-regression objects at disturbances of sliding average type / M.V. Bondarenko, A.S. Poznyak // *Automation and Telemechanics.* – 1993. – No.8. – pp. 90-108.
7. Belov, A.A. Investigation of problems of mapping information compression and search by 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.
8. Shalygin, A.S. Applied Methods of Statistic Modeling / *Applied Methods of Statistical Modeling* / A.S. Shalygin, Yu.I. Palagin. – L.: Mechanical Engineering, Leningrad Branch, 1986. – pp. 320.
9. Kropotov, Yu.A. Algorithm for exponential approximation definition of law of speech signal amplitude likelihood distribution / Yu.A. Kropotov // Radio Engineering. – 2007. – No.6. – pp. 44-47.
10. Bykov, A.A. Model of law of signal amplitude likelihood distribution in basis of system exponential functions / A.A. Bykov, Yu.A. Kropotov // *Design and Technology of Electronic Means.* – 2007. – No.2. – pp. 30-34.

Статья поступила в редколлегию 15.02.18.
Рецензент: д.т.н., профессор МИ ВлГУ Жизняков А.Л.

Сведения об авторах:

Кропотов Юрий Анатольевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой ЭиВТ 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 ЭиВТ Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Kropotov Yury Anatolievich, D. Eng., Prof., Head of the Dep. of E&CE, Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Kholkina Natalia Yevgenievna, Senior lecturer of the Dep. E&CE, Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.