ПРЯМАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭХОТРАКТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИНОМИАЛЬНОГО ФИЛЬТРА ВОЛЬТЕРРА

Коврижных А.Г., Меньшиков Б.Н.

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова
150000, Россия, Ярославль, ул. Советская, 14.
Тел. (0852) 79-77-75. E-mail: dcslab@uniyar.ac.ru

1. Введение

Наличие акустических и электрических эхо-сигналов в телефонных сетях представляет собой хорошо известную проблему на протяжении последних четырех десятилетий. Ее решение в классе линейных адаптивных фильтров в ряде случаев не позволяет получить требуемый уровень подавления эхо-сигнала [1, 2, 3]. Причинами являются нелинейные искажения в эхотракте, обусловленные наличием аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразований речевого сигнала [3, 4, 5], каналы мобильной и спутниковой связи и др. При этом в реальных эхотрактах, как показывают экспериментальные данные, наблюдаются не только квадратичные [2, 3], но и кубические нелинейности [4, 5]. Эхокомпенсатор не может быть рассчитан на подавление конкретного эхо-сигнала, т.к. при этом оборудование будет дорогим и неремонтопригодным. Эхокомпенсатор также должен быть построен таким образом, чтобы обеспечивать требуемое подавление эхо-сигналов в среднестатистической ситуации. Немалую роль при этом играют экспериментальные данные, полученные путем измерений нелинейностей в таких эхотрактах во временной или частотной областях [6]. Анализ существующих литературных источников свидетельствует об актуальности задачи идентификации нелинейных эхотрактов.

В работе предложен метод идентификации нелинейных эхотрактов на базе квадратичных и кубических фильтров Вольтерра во временной области. На основе данных о входной и выходной последовательностях вычисляются оптимальные по критерию СКО значения коэффициентов фильтра. Порядки ядер и их инерционность при этом могут быть различными. Предлагаемый метод может быть использован для идентификации нелинейных эхотрактов при решении задач электрической и акустической эхокомпенсации. Он позволяет оценить вклад квадратичного и кубического ядер в сигнале на выходе данных эхотрактов и выбрать соответствующую конструкцию эхокомпенсатора. Указанные методы позволяют идентифицировать не только статические, но и динамические нелинейные эхотракты. В последнем случае для получения усредненных данных необходимо провести серию процедур идентификации.

2. Идентификация нелинейных эхотрактов на базе неоднородного квадратичного фильтра Вольтерра во временной области

Неоднородный квадратичный фильтр Вольтерра с учетом симметрии квадратичного ядра может быть представлен следующим образом

$$y(k)=\sum_{i=0}^{N_1-1}h_1(i)x(k-i)+\sum_{i=0}^{N_2-1}\sum_{j=i}^{N_2-1}h_2(i,j)x(k-i)x(k-j)\,, \qquad (1)$$

где $x(k)$ и $y(k)$ – входная и выходная последовательности соответственно. Частота дискретизации составляет 8 кГц. Звено $h_1(i)$ (рис. 1) представлено линейным КИХ – фильтром с импульсной характеристикой $h_1(i)$ и является линейным ядром полиномиального фильтра Вольтера. Звено $h_2(i,j)$ - квадратичное ядро, являющееся в общем случае инерционным. При этом N_1 - порядок линейного ядра, которое может быть представлено в виде вектор – столбца $\mathbf{h}_1$ длиной N_1 отсчетов

$$\mathbf{h}_1=\left(h_1(0),\ h_1(1),....,\ h_1(N_1-1)\right)^T.$$

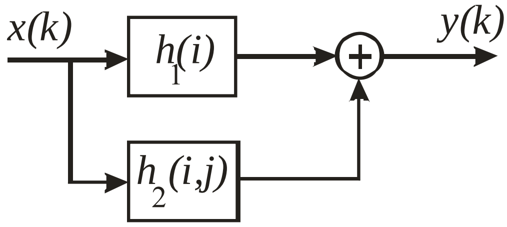

Рис. 1. Модель нелинейного эхотракта, идентифицируемая с помощью неоднородного квадратичного фильтра Вольтерра

Квадратичное ядро ввиду своей симметрии может быть представлено в виде квадратной триангулярной матрицы размером $N_2\times N_2$ элементов (все элементы, лежащие ниже главной диагонали, равны нулю),

$$\mathbf{h}_2 = \begin{pmatrix} h_2(0,0) & h_2(0,1) & \ldots & h_2(0,N_2-1) \\ 0 & h_2(1,1) & \ldots & h_2(1,N_2-1) \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & \ldots. & h_2(N_2-1,N_2-1) \end{pmatrix}$$

где N_2 - порядок квадратичного ядра, или в виде вектор – столбца с учетом лишь уникальных коэффициентов

$$\mathbf{h}_2 = \left(h_2(0,0), h_2(0,1), \ldots., h_2(0,N_2-1), \ldots, h_2(N_2-1,N_2-1)\right)^T$$

Расчет коэффициентов фильтра при наличии безынерционного квадратичного ядра производится по формуле $\mathbf{h} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{e}$, где вектор–столбец $\mathbf{h}$ содержит элементы линейного и квадратичного ядер:

$$\mathbf{h} = (\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2)^T .$$

Здесь $\mathbf{M}$ - матрица корреляции, а $\mathbf{e}$ - вектор корреляции между входной и выходной последовательностями. Матрица корреляции $\mathbf{M}$ определяется следующим образом

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} R(0) & R(1) & \ldots & R(N_1) & \mu_3(0,0) \\ R(1) & R(0) & \ldots & R(N_1-1) & \mu_3(0,1) \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ R(N_1) & R(N_1-1) & \ldots & R(0) & \mu_3(0,N_1) \\ \mu_3(0,0) & \mu_3(0,1) & \ldots & \mu_3(0,N_1) & \mu_4(0,0,0) \end{pmatrix},$$

где

$$R(l) = < x(k)x(k-l) >= \mu_2(l), \; < x(k)x(k-l)x(k-p) >= \mu_3(l,p),$$

$$< x(k)x(k-l)x(k-p)x(k-r) >= \mu_4(l,p,r).$$

Здесь μ_2, μ_3, μ_4 - дискретные начальные моменты второго, третьего и четвертого порядков. Вектор корреляции между входным и выходным процессами:

$$\mathbf{e} = \left(< y(k)x(k) >, \; < y(k)x(k-1) >, \ldots, < y(k)x(k-N_1) >, \; < y(k)x^2(k) >\right)^T .$$

При появлении инерции в квадратичном ядре матрица корреляции усложняется, соответственно усложняется и вектор корреляции между входным и выходным процессами.

3. Идентификация нелинейных эхотрактов на базе кубического фильтра Вольтерра во временной области

Неоднородный кубический фильтр Вольтерра с безынерционными полиномиальными ядрами может быть представлен следующим образом

$$y(k) = \sum_{i=0}^{N_1-1} h_1(i)x(k-i) + h_2(0,0)x^2(k) + h_3(0,0,0)x^3(k) = y_1(k) + y_2(k) + y_3(k),$$

где коэффициенты $h_2(0,0)$ и $h_3(0,0,0)$ характеризуют квадратичное и кубическое безынерционные ядра соответственно (рис. 2). Отметим, что рассматриваемая модель не является моделью Винера, Гаммерштейна или их комбинаций. Учет инерционности ядер при необходимости может быть осуществлен, но он приведет к усложнению соответствующих векторов данных.

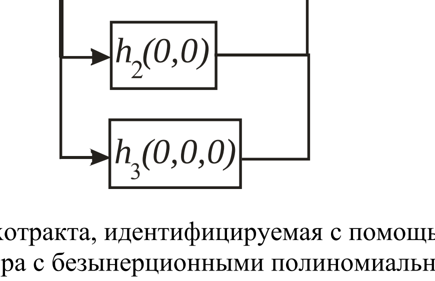

Рис. 2. Модель нелинейного эхотракта, идентифицируемая с помощью неоднородного кубического фильтра Вольтерра с безынерционными полиномиальными ядрами

Вектор-столбец коэффициентов фильтра в данном случае равен

$$\mathbf{h} = \left(h_1(0),...., h_1(N_1-1),\ h_2(0,0),\ h_3(0,0,0)\right)^T,$$

матрица корреляции $\mathbf{M}$ имеет вид

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} <x^2(k)> & R(1) & ... & ... & <x^3(k)> & <x^4(k)> \\ R(1) & <x^2(k)> & ... & ... & \mu_3(0,1) & \mu_4(0,0,1) \\ ... & ... & ... & ... & ... & ... \\ R(N_1-1) & R(N_1-1) & ... & ... & \mu_3(0,N_1-1) & \mu_4(0,0,N_1-1) \\ <x^3(k)> & \mu_3(0,1) & ... & ... & <x^4(k)> & <x^5(k)> \\ <x^4(k)> & \mu_4(0,0,1) & ... & ... & <x^5(k)> & <x^6(k)> \end{pmatrix}$$

Вектор корреляции между входным и выходным процессами задается следующим образом

$$\mathbf{e} = \left(< y(k)x(k) >,...,< y(k)x(k-N_1+1) >, < y(k)x^2(k) >,\ < y(k)x^3(k) >\right)^T.$$

Расчет коэффициентов фильтра производится по формуле $\mathbf{h} = \mathbf{M}^{-1}\cdot\mathbf{e}$.

Входной дискретизированный тестовый сигнал задается следующим выражением: $x(k) = A\sin\left(\frac{2\pi k}{L}\right)$, где A – амплитуда сигнала (при моделировании эта величина предполагается безразмерной и не превосходящей единицу), параметр L является отношением частоты дискретизации (8 кГц) и частоты тестового сигнала, для которой вычисляется уровень нелинейных искажений. Ослабление сигнала в идентифицируемом эхотракте (в дБ) может быть найдено по формуле $D = 10\lg\left(\frac{E(x^2(k))}{E(y^2(k))}\right)$.

Уровень нелинейных искажений относительно уровня сигнала на выходе эхотракта (дБ) может быть получен по формуле $L_1 = 10\lg\left(\frac{E({y_2}^2(k)) + E({y_3}^2(k))}{E(y^2(k))}\right)$.

Уровень нелинейных искажений относительно уровня линейной составляющей сигнала на выходе эхотракта (дБ) задается выражением $L_2 = 10\lg\left(\frac{E({y_2}^2(k)) + E({y_3}^2(k))}{E({y_1}^2(k))}\right)$.

Апробация предлагаемого метода идентификации с использованием экспериментально полученных квадратичных ядер [2, 3] в качестве моделей идентифицируемых нелинейных эхотрактов подтверждает его эффективность. Установлено, что уровень нелинейных компонентов выходного сигнала находится ниже уровня линейной составляющей всего на 17-19 дБ, т.е. ощущается человеческим ухом. Вклад кубического ядра только увеличивает этот уровень на 1-2 дБ. Таким образом, становится возможным оценить необходимые порядки полиномиальных ядер адаптивного фильтра Вольтерра в составе нелинейного эхокомпенсатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Agazzi O. Nonlinear echo cancellation of data signals. IEEE Trans. Comm., 1982. V. 30, P. 2421-2433.
2. Stenger A., Trautmann L., Rabenstein R. Nonlinear acoustic echo cancellation with 2nd order adaptive Volterra filters. Proc. ICASSP 99, Phoenix, USA, 1999. P. 877-880.