

## НЕЛИНЕЙНАЯ ЭХОКОМПЕНСАЦИЯ НА БАЗЕ КУБИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА ВОЛЬТЕРРА С ДИНАМИЧЕСКИ ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ СТРУКТУРОЙ

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

Качество звукового сигнала и стоимость предоставляемых услуг в настоящее время часто являются одними из основных показателей, определяющих выбор потенциальным клиентом оператора связи. В настоящее время на развитие телекоммуникационных сетей продолжают оказывать негативное влияние устаревшие технологии и решения, которые широко распространились на предыдущих этапах их развития. При проектировании любых телекоммуникационных систем следует учитывать характеристики тракта передачи полезной информации и уменьшать вносимые им нежелательные эффекты [1].

По историческим и экономическим причинам абонентские линии телефонной сети являются двухпроводными. Для стыковки четырехпроводных и двухпроводных цепей в телефонных сетях общего пользования (ТФОП) применяют дифференциальные системы, работа которых неидеальна. В результате сигнал, передаваемый по исходящей части четырехпроводной цепи, возвращается к своему источнику в виде эхосигнала. Для уменьшения влияния эхосигнала на разговор абонентов в современных системах связи применяют эхокомпенсаторы, работа которых основывается на формировании оценки эхосигнала и вычитании ее из прошедшего эхосигнала. Кроме свойств сходимости и уровня остаточного эхосигнала существует еще один важный фактор, определяющий качество адаптивных алгоритмов эхокомпенсации – потребление вычислительных ресурсов или вычислительная сложность. На практике этот фактор значительно затрудняет техническую реализацию сложных алгоритмов эхокомпенсации ввиду резкого возрастания стоимости конечного решения или приводит к невозможности работы алгоритма в режиме реального времени.

Решение проблемы эхокомпенсации в классе линейных адаптивных фильтров в ряде случаев не позволяет получить требуемый уровень подавления эхо-сигнала [2, 3] даже при наличии нелинейного процессора, являющегося пороговым устройством обработки остаточного эхо-сигнала [6]. Примерами являются нелинейные искажения в эхотракте, обусловленные наличием аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразований речевого сигнала [1, 3, 7, 9-11], телекоммуникационные системы с пакетной передачей данных, каналы мобильной связи и др. При этом в ТФОП задача нелинейной эхокомпенсации при передаче данных не менее актуальна, чем при передаче речевых сигналов.

Анализ существующих разработок в области нелинейной эхокомпенсации позволяет сделать вывод об актуальности задачи нелинейной эхокомпенсации, связанной с необходимостью эффективного подавления эхо-сигнала, возникающего в телефонных сетях, при учете нелинейного характера эхотракта. Исследования в данной области были начаты рядом зарубежных специалистов и ученых более трех десятилетий назад и продолжаются в настоящее время [4, 10, 11]. Наиболее широкое распространение получили методы, базирующиеся на применении функциональных рядов Вольтерра [2, 4, 7, 9-11]. Построенные на базе адаптивных нерекурсивных полиномиальных цифровых фильтров Вольтерра, нелинейные эхокомпенсаторы отличаются большей вычислительной сложностью по сравнению с линейными. Отсутствие проблемы устойчивости такого фильтра облегчает техническую реализацию нелинейного эхокомпенсатора. В этом случае главными факторами, определяющими структуру эхокомпенсатора, выступают ограничения на общую вычислительную сложность и выбор соответствующего адаптивного алгоритма.

Анализ на основе рядов Вольтерра является наиболее подходящим методом описания телекоммуникационных систем со слабой нелинейностью, предлагая значительно большую точность и скорость, на несколько порядков превышающие получаемые при использовании метода гармонического баланса. Кроме того, он хорошо интегрируется с распространёнными методами анализа линейных систем и даёт возможность одновременной оптимизации нелинейных эффектов и коэффициентов передачи. С учётом всех перечисленных преимуществ, этот метод может считаться оптимальным для анализа систем со слабой нелинейностью.

В настоящее время при моделировании и идентификации нелинейных экотрактов, являющихся нелинейными инерционными динамическими системами, используются модели Винера, Гаммерштейна, их комбинации, полиномиальные нерекурсивные фильтры Вольтерра. Проблема соответствующего увеличения вычислительных затрат, решаемая с помощью модификаций и аппроксимаций полиномиальных ядер или структур фильтров [7, 10, 11], наиболее остро стоит в случае использования дискретных фильтров Вольтерра с третьей или более высокой степенью аппроксимирующего полинома [4]. Разработанные методы аппроксимации стандартных структур полиномиальных фильтров Вольтерра не приводят к возникновению проблемы устойчивости самого фильтра [4] и обеспечивают работу эхокомпенсатора в режиме реального времени. Следует отметить, что ни одна из существующих модификаций структур фильтров Вольтерра не предусматривает возможности порогового отключения исходных ядер или их аппроксимаций в зависимости от уровня вносимых ими нелинейных искажений, а также возможности динамического изменения числа рабочих коэффициентов, характеризующих полиномиальное ядро, в зависимости от статистических свойств входного процесса.

Работа нелинейных эхокомпенсаторов пока еще не регламентирована в существующих рекомендациях Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т) [6], но существующие технические решения нелинейной эхокомпенсации во многих случаях обеспечивают лучшее подавление эхо-сигнала по сравнению с линейными эхокомпенсаторами, особенно при наличии значительных нелинейностей в экотрактах, хотя и ценой увеличения вычислительных затрат [4].

Так как между выходной последовательностью и коэффициентами фильтра Вольтерра существует линейная связь [8], все адаптивные алгоритмы, применявшиеся в линейной адаптивной эхокомпенсации [5], используются и при решении задач нелинейной акустической и электрической эхокомпенсации, где соответствующие расширенные векторы данных характеризуются большей длиной и определенным порядком следования отсчетов.

В работе предложен вариант динамической модификации стандартной структуры кубического фильтра Вольтерра, позволяющий отключать модифицированное кубическое ядро и часть коэффициентов модифицированного с помощью метода триангулярных представлений квадратичного ядра согласно статистическим свойствам входного процесса.

Неоднородный кубический фильтр Вольтерра с триангуляризованными ядрами может быть представлен в следующем виде

$$y(n) = \sum_{m_1=0}^{N_1-1} h_1(m_1)x(n-m_1) + \sum_{m_1=0}^{N_2-1} \sum_{m_2=m_1}^{N_2-1} h_{2,tri}(m_1, m_2)x(n-m_1)x(n-m_2) + \sum_{m_1=0}^{N_3-1} \sum_{m_2=m_1}^{N_3-1} \sum_{m_3=m_2}^{N_3-1} h_{3,tri}(m_1, m_2, m_3)x(n-m_1)x(n-m_2)x(n-m_3). \quad (1)$$

Приняты следующие обозначения:  $x(n)$  и  $y(n)$  - входная и выходная последовательности (дискретизированные с частотой 8 кГц исходные сигналы),  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  - длины линейного, квадратичного и кубического ядер в триангулярном представлении, соответственно,  $h_1$  - линейное ядро полиномиального фильтра,  $h_{2,tri}$  и  $h_{3,tri}$  - триангуляризованные квадратичное и кубическое ядра. В общем случае длины всех ядер могут быть различны, что и подтверждается экспериментально. Например, для длин линейного и квадратичного ядер всегда выполняется условие  $N_1 \geq N_2$  [7]. Данное представление использовано при моделировании нелинейного экотракта в задаче нелинейной электрической эхокомпенсации, так как оно позволяет учитывать не только квадратичные, но и кубические нелинейности. Аналогичный подход может быть использован и при решении задачи нелинейной акустической эхокомпенсации. Линейное ядро представлено наихудшим вариантом импульсной характеристики из рекомендации МСЭ-Т G.168, соответствующей ослаблению сигнала в дифференциальной системе на 7.6 дБ в случае стационарного случайного процесса на входе и 6 дБ для синусоидального воздействия с частотой 1020 Гц. Уровень аддитивного шума при моделировании выбран на уровне -30 дБ по отношению к полезному сигналу.

На рис. 1 показана структура нелинейного электрического эхокомпенсатора на базе модифицированного адаптивного кубического фильтра Вольтерра. При этом приняты следующие обозначения:  $x(n)$  - сигнал дальнего абонента, зашумленный входной процесс,  $d(n)$  - сигнал на выходе нелинейного экотракта,  $s(n)$  - сигнал ближнего абонента,  $y(n)$  - выходной процесс,  $\hat{y}(n)$  - оценка процесса на выходе эхокомпенсатора,  $e(n)$  - сигнал ошибки. Блок ДДР - детектор двойного разговора,

работающий согласно алгоритму Гейгеля. Для подстройки всех ядер используется нормализованный алгоритм наименьших квадратов.

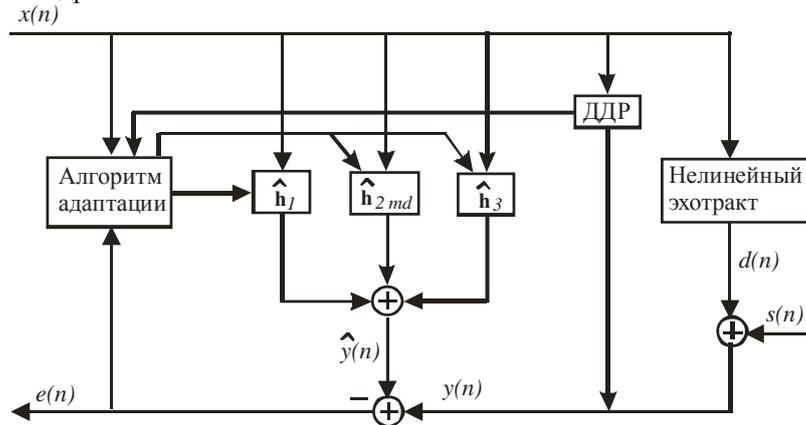


Рис. 1. Структура нелинейного электрического эхокомпенсатора на базе модифицированного адаптивного кубического фильтра Вольтерра

Так как речь человека является квазистационарным случайным процессом со слабой корреляцией отсчетов [7], то в структуре ядер можно выделить области, дающие основной вклад в энергию каждой нелинейной составляющей выходного процесса и отключать те области, вклад которых незначителен и находится на уровне шума. Например, для кубического ядра справедливо выражение  $E\{x(n-k)x(n-l)x(n-m)\} \approx 0$ , где  $E\{\dots\}$  обозначает суммарную энергию от соответствующих областей ядра. Отметим, что данное выражение может дать значительную погрешность, например, в случае подачи на вход эхокомпенсатора дискретизированного гармонического воздействия, отсчеты которого сильно коррелированы [2]. Практически вся энергия обеспечивается элементами кубического ядра с совпадающими индексами аргументов:  $E\{x(n-k)x(n-k)x(n-k)\} = E\{x^3(n-k)\} \neq 0$ . В итоге структура кубического ядра может быть преобразована следующим образом:  $h_{3,tri}(m_1, m_2, m_3) \rightarrow h_{3,m}(m)$ , при этом для порядка такого ядра всегда выполняется условие  $N_3 < N_2$ . Соответственно изменяется представление выходной последовательности

$$y(n) = y_1(n) + y_2(n) + y_3(n) = \sum_{m_1=0}^{N_1-1} h_1(m_1)x(n-m_1) + \sum_{m_1=0}^{N_2-1} \sum_{m_2=m_1}^{N_2-1} h_{2,tri}(m_1, m_2)x(n-m_1)x(n-m_2) + \sum_{m=0}^{N_3-1} h_{3,m}(m)x^3(n-m). \quad (2)$$

Если вклад кубического ядра составляет величину менее 30 дБ (в случае необходимости данное пороговое значение может быть заменено другим) ниже уровня линейной составляющей на выходе  $y_1(n)$ , то оно отключается, т.к. его коэффициенты будут в этом случае неправдоподобны из-за наличия аддитивного шума, что уменьшает суммарную вычислительную сложность работы нелинейного эхокомпенсатора. Для треугольного представления квадратичного ядра и квазистационарного входного процесса справедливо неравенство

$$E\{y_2(n)\} - E\{y_{2,md}(n)\} \geq 0, \quad (3)$$

где  $E\{y_{2,md}(n)\}$  - вклад коэффициентов квадратичного ядра с одинаковыми индексами аргументов, т.е. коэффициентов, стоящих на главной диагонали. Если значение разностной энергии дает вклад на уровне ниже 30 дБ по отношению к линейной выходной составляющей  $y_1(n)$ , то отключаются вся область коэффициентов под главной диагональю. В этом случае достигается дополнительное уменьшение вычислительных затрат без потери качества речевого сигнала, и в результате выходная последовательность будет описываться следующим выражением:

$$y(n) = \sum_{m_1=0}^{N_1-1} h_1(m_1)x(n-m_1) + \sum_{m=0}^{N_2-1} h_{2,md}(m)x^2(n-m) + \sum_{m=0}^{N_3-1} h_{3,m}(m)x^3(n-m).$$

Если уровень нелинейных составляющих возрастает, отключенные области ядер вновь включаются в работу, так как через каждые 240 отсчетов осуществляется пороговый контроль. Данный интервал

соответствует интервалу корреляции речевого сигнала [10]. При моделировании выбраны следующие параметры фильтра:  $N_1 = 64, 128, 256$ ;  $N_2 = 32, 64$ ;  $N_3 = 10$ . Во всех экспериментах вклад кубического ядра не превосходил 1,5 дБ в оценке энергии остаточного эхо-сигнала, что дает основания считать, что во многих практических случаях кубическое ядро может быть отключено. При этом вклад квадратичного ядра добавлял к значениям ERLE 4.5–6.5 дБ и отключение коэффициентов вне главной диагонали произошло только при подаче на вход стационарного случайного процесса.

Таким образом, предлагаемая динамически перестраиваемая структура кубического фильтра Вольтерра позволяет снизить вычислительные затраты без потерь в качестве выходного сигнала. Предлагаемая модификация учитывает статистические свойства сигналов на входе нелинейного эхокомпенсатора, поэтому ее применение не ограничено отдельными частными случаями, в отличие от многих предлагаемых статических модификаций структур полиномиальных фильтров Вольтерра [4, 7, 9-11].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Biglieri E., Barberis S., Catena M. Analysis and compensation of nonlinearities in digital transmission systems. // IEEE J. Selected Areas Commun. 1988, № 6 (1). P. 42-51.
2. Agazzi O. Nonlinear echo cancellation of data signals. // IEEE Trans. Comm., November 1982. V. 30, P. 2421-2433.
3. Bedrosian E., Rice S.O. The output properties of Volterra systems (nonlinear systems with memory) driven by harmonic and Gaussian inputs. // Proc. IEEE V. 59, №12, 1971. P. 1688-1708.
4. International Telecommunication Union. General characteristics of international telephones connections and international telephone circuits – Digital network echo cancellers. ITU-T Recommendation G. 168, 1997.
5. Favier G., Kibangou A.Y., Khouaja A. Nonlinear system modeling by means of Volterra models. Approaches for parametric complexity reduction. // ISA-2004 Symposium Proc. P. 367-395.
6. Haykin S. Adaptive Filter Theory 3rd ed. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs. NJ. 1996.
7. Kellerman W. Nonlinear line echo cancellation using a simplified second order Volterra filter. // Int. Conf. on Acoustic, Speech, and Signal Proc. Seattle, WA, 2002. P. 2508-2511.
8. Mathews V.J. Adaptive polynomial filters // IEEE SP Magazine, 1991, P. 10-26.
9. Mihaelides J.F., Kabal P. Nonlinear adaptive filtering for echo cancellation. // Proc. IEEE Int. Conf. Commun., Philadelphia. PA. June 1988. P. 30.3.1-30.3.6.
10. Stenger A., Rabenstein R. Adaptive Volterra filters for nonlinear acoustic echo cancellation. // Proc. NSIP-99. P. 135-140.
11. Stenger A., Trautmann L., Rabenstein R. Nonlinear acoustic echo cancellation with 2nd order adaptive Volterra filters. // Proc. ICASSP-99. P. 877-880.

---

## NONLINEAR ECHO CANCELLATION BASED ON THE CUBIC VOLTERRA FILTER WITH DYNAMICALLY RECONSTRUCTED STRUCTURE

Menshikov B.

Yaroslavl State University

150000, Russia, Yaroslavl, Sovetskaya st., 14, Phone (0852) 79-7775. [dcslab@uniyar.ac.ru](mailto:dcslab@uniyar.ac.ru)

**Abstract.** The problem of the nonlinear echo cancellation based on the cubic Volterra filter with dynamically reconstructed structure is considered. The case of nonlinear line echo cancellation is described. The method of the decreasing of computational cost is presented. The capability of dynamic change of number of working factors describing the polynomial nucleus based on the statistical properties of input process. The application of considered modification is not limited to separate particular cases.

The solution of the problem of nonlinear echo cancellation in the class of linear adaptive filters in some cases did not allow to receive a required level of suppression of an echo - signal [1, 2]. For example, there are nonlinear distortions in the echopath, stipulated by analog-to-digital and digital-to-analog conversions of a speech signal [1, 2, 5-7], telecommunication systems with batch data transfer, channels of mobile communication, etc. There are no modifications of the structures of Volterra filters today, which provide a capability of threshold switching-off of nucleuses or their approximations depending on a level of nonlinear distortions, introduced by them, and also capability of dynamic change of number of working factors describing the polynomial nucleus, depending on statistical properties of input process [3].

The version of dynamic modification of the standard structure of the cubic Volterra filter is presented, permitting is offered to disconnect a modified cubic nucleus and part of factors modified with the help of the triangular method of the quadratic nucleus representation according to statistical properties of input process. If the level of nonlinear components will increase, the disconnected areas of nucleuses are actuated in activity again. In all experiments the contribution of a cubic nucleus did not exceed 1,5 dB in an evaluation of energy of a residual echo - signal (ERLE). The contribution of a quadratic nucleus added to ERLE values of about 4.5-6.5 dB.

The presented dynamically reconstructed structure of the cubic Volterra filter allows to reduce computing

costs. The modification takes into account statistical properties of the signals in the nonlinear echo canceller. Therefore the application of this modification is not limited to separate particular cases, in difference from many offered static modifications of structures polynomial of Volterra filters [4-7].

#### REFERENCES

1. Agazzi O. Nonlinear echo cancellation of data signals. IEEE Trans. Comm., November 1982. Vol. 30, P. 2421-2433.
2. Biglieri E., Barberis S., Catena M. Analysis and compensation of nonlinearities in digital transmission systems. // IEEE J. Selected Areas Commun. 1988, № 6 (1). P. 42-51.
3. Bedrosian E., Rice S.O. The output properties of Volterra systems (nonlinear systems with memory) driven by harmonic and Gaussian inputs. // Proc. IEEE, 1971, V. 59, №. 12. P. 1688-1708.
4. Favier G., Kibangou A.Y., Khouaja A. Nonlinear system modeling by means of Volterra models. Approaches for parametric complexity reduction. // ISA-2004 Symposium Proc. P. 367-395.
5. Kellerman W. Nonlinear line echo cancellation using a simplified second order Volterra filter // Int. Conf. on Acoustic, Speech, and Signal Proc. Seattle. WA. 2002. P. 2508-2511.
6. Stenger A., Rabenstein R. Adaptive Volterra filters for nonlinear acoustic echo cancellation. // Proc. NSIP-99. P. 135-140.
7. Stenger A., Trautmann L., Rabenstein R. Nonlinear acoustic echo cancellation with 2nd order adaptive Volterra filters. // Proc. ICASSP-99. P. 877-880.

