

11

Цифровая фильтрация аудиосигналов на основе дуального вейвлет-преобразования

© А.С. Ясин^{1,2}, А.Н. Павлов^{1,3}

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Россия

² Университет технологий, Ирак, Багдад, ул. Аль-Сина

³ Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, Россия

E-mail: pavlov.alexeyn@gmail.com

Поступило в Редакцию 2 марта 2015 г.

Рассматривается метод фильтрации аудиосигналов с применением дуального вейвлет-преобразования. Предложен адаптивный подход, позволяющий оптимизировать автоматическую настройку параметров вейвлет-фильтра. Продемонстрировано существенное улучшение качества фильтрации по сравнению с традиционно применяемыми фильтрами на основе дискретного вейвлет-преобразования.

Необходимость цифровой фильтрации зашумленных сигналов возникает при решении многих научно-технических задач, например для улучшения качества приема информационных сообщений в технике связи. Одним из сравнительно новых вариантов решения данных задач является вейвлет-фильтрация [1]. Методы, основанные на дискретном вейвлет-преобразовании (ДВП) [2–6], в последние годы все чаще находят широкое применение в технике, что обусловлено рядом их преимуществ по сравнению с фильтрацией, базирующейся на преобразовании Фурье [1,2].

Традиционным подходом в вейвлет-фильтрации является использование быстрых (пирамидальных) алгоритмов разложения сигнала в базисе вейвлет-функций, при котором сигнал раскладывается на составляющие, соответствующие разным временным масштабам j , после чего корректируются (обычно обнуляются) коэффициенты разложения $d_{j,k}$, не превышающие заданный пороговый уровень C , так как именно они

в наибольшей степени подвержены влиянию помех. Соответствующая пороговая фильтрация представляет собой вариант нелинейного сглаживания, проводимого в вейвлет-пространстве, которое существенным образом зависит от выбранного порогового уровня [7]. При „жестком“ задании пороговой функции $p(x)$

$$p(x) = \begin{cases} x, & |x| \geq C, \\ 0, & |x| < C \end{cases} \quad (1)$$

обнуляются только малые вейвлет-коэффициенты [7], что позволяет получить неискаженную амплитуду сигнала, но приводит к появлению дополнительных нерегулярностей, вызванных разрывами функции (1). Их можно избежать в случае „мягкого“ варианта задания пороговой функции [8]

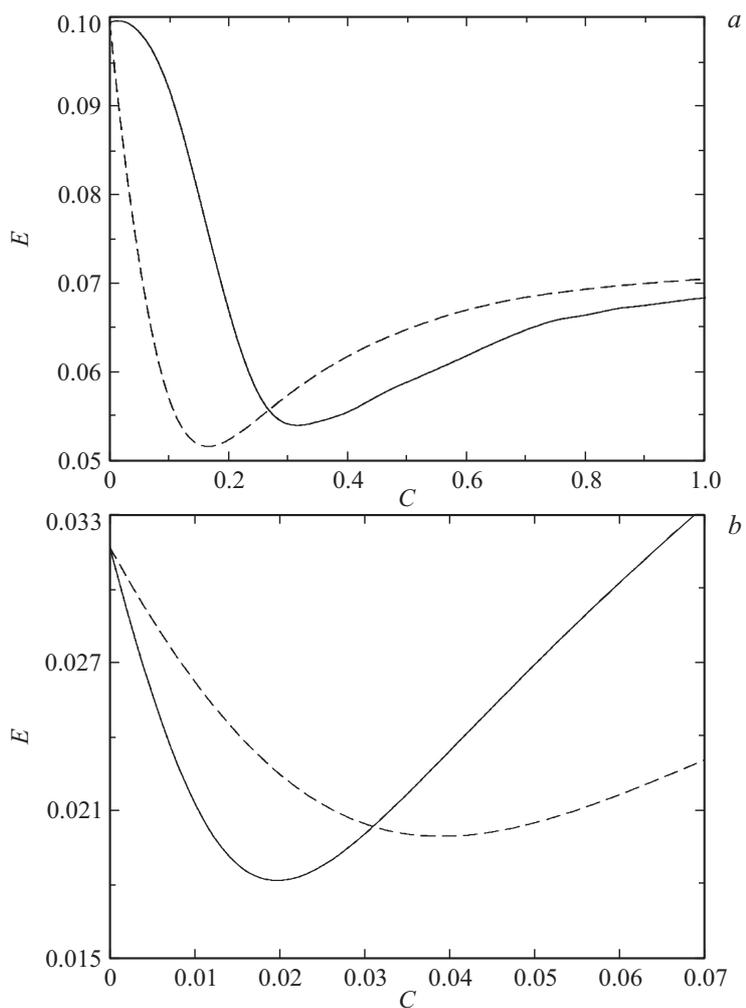
$$p(x) = \begin{cases} x - C, & x \geq C, \\ x + C, & x \leq -C, \\ 0, & |x| \leq C, \end{cases} \quad (2)$$

но такой подход приводит к коррекции всех коэффициентов, и амплитуда сигнала уменьшается. Данное обстоятельство не всегда является критичным: при фильтрации сильно зашумленных звуковых сообщений важнее провести эффективную очистку от шума, после чего отфильтрованный сигнал может быть усилен.

Достоинством отмеченных методов вейвлет-фильтрации является простота их реализации (например, с применением семейств вейвлетов Добеши [3]) и быстроедействие, представляющее собой одно из основных преимуществ ДВП. К числу недостатков относятся осцилляции вейвлет-коэффициентов в окрестности сингулярностей и отсутствие инвариантности относительно сдвига вейвлет-функции, что приводит к непредсказуемым изменениям паттернов вейвлет-коэффициентов при смещении сингулярностей. Для устранения этих недостатков был предложен альтернативный подход, основанный на применении комплексного вейвлет-преобразования [9,10]. Его идея состоит в том, чтобы дополнить вещественные базисные функции мнимыми частями, построенными на основе преобразования Гильберта, перейдя к комплексным (аналитическим) низкочастотному и высокочастотному фильтру. В частности,

комплексные вейвлеты $\psi^c(t)$, применяемые в рамках данного подхода, могут быть представлены в виде $\Psi^c(t) = \psi^r(t) + j\psi^i(t)$, где каждая из функций $\psi^r(t)$ и $\psi^i(t)$ используется для формирования своего ортонормированного базиса. При анализе сигналов вейвлет-преобразование отдельно вычисляется с применением функций $\psi^r(t)$ и $\psi^i(t)$, что приводит к комплексным вейвлет-коэффициентам $d_{j,k}^c = d_{j,k}^r + jd_{j,k}^i$, характеризующим детали разложения сигнала на разных уровнях разрешения j . Поскольку действительные и мнимые части коэффициентов $d_{j,k}^c$ определяются отдельно, вычислительный процесс состоит из двух этапов и реализуется в рамках подхода, называемого дуальным вейвлет-преобразованием [10]. При анализе сигналов этот подход реализуется как два независимых применения одномерного дискретного вейвлет-преобразования и алгоритмически сводится к двум „деревьям“ (пирамидальным разложениям сигнала) [9]. Аналогичная процедура проводится при восстановлении сигнала по вейвлет-коэффициентам. Следует отметить характерную особенность дуального вейвлет-преобразования. Для локализованных функций с конечной областью задания применение преобразования Гильберта не обеспечивает аналитические свойства $\psi^c(t)$, и для получения приближенно аналитических скейлинг-функций и вейвлетов должны применяться специальные приемы построения зеркальных фильтров, которые, в частности, рассматривались в [11].

В данной работе в ходе решения задачи развития методов очистки аудиосигналов от фоновых помех были протестированы различные подходы на основе дискретного вейвлет-преобразования с вещественными базисами семейства Добеши [7] и дискретного дуального вейвлет-преобразования с комплексными базисами [10]. В качестве тестового аудиосигнала была записана короткая фраза „Привет, как дела?“, и на соответствующий сигнал накладывался белый шум различной интенсивности. Полученный зашумленный сигнал фильтровался, и путем сравнения с исходным аудиосигналом вычислялась среднеквадратичная ошибка фильтрации E . На рисунке, *a* представлены результаты сравнения двух методов вейвлет-фильтрации, применяющих вещественные базисы (случай „мягкого“ и „жесткого“ задания пороговой функции в вейвлет-пространстве, уровень шума 20 dB). Как следует из этого рисунка, минимальное значение ошибки E достигается в случае „мягкого“ варианта задания пороговой функции, однако минимумы соответствующих зависимостей $E(C)$ наблюдаются при разных значениях C . Отсюда следует, что для обеспечения эффективной вейвлет-фильтрации важно



Зависимости среднеквадратичной ошибки вейвлет-фильтрации тестового аудиосигнала от порогового уровня C : a — для „жесткого“ (сплошная линия) и „мягкого“ (пунктирная линия) вариантов задания пороговой функции, в качестве базисной функции выбран вейвлет Добеши D^8 , уровень шума 20 dB; b — для комплексного базиса [11] (сплошная линия) и вещественного базиса (вейвлет Добеши D^8 , „мягкий“ вариант задания пороговой функции, пунктирная линия), уровень шума 30 dB.

оптимизировать выбор порогового уровня. Конкретный вид зависимостей (см. рисунок) и положение минимумов варьируются при изменении отношения сигнал/шум (SNR), однако во всех рассмотренных тестовых примерах вейвлет-фильтрация с „мягким“ вариантом задания пороговой функции (2) обеспечивала более качественную фильтрацию помех по сравнению с функцией (1).

Дальнейшее сопоставление методов вейвлет-фильтрации было проведено для вещественных и комплексных базисов. С этой целью аналогичные расчеты были выполнены для комплексного вейвлет-преобразования с базисом [11]. На рисунке, *b* представлены результаты сопоставления этого подхода с применением стандартного ДВП для случая пороговой функции (2). Рисунок, *b* наглядно иллюстрирует, что при изменении уровня шума (в данном случае он составлял 30 dB) происходит существенное смещение оптимального значения порогового уровня. Таким образом, при проведении вейвлет-фильтрации параметр C необходимо выбирать с учетом отношения сигнал/шум в регистрируемых данных. В связи с тем, что при цифровой обработке аудиосигналов, регистрируемых на входе приемного устройства, отсутствует возможность сравнения с незашумленным процессом и соответственно вычисления среднеквадратичной ошибки, в данной работе предлагается следующий подход. Учитывая, что наиболее важным параметром при настройке алгоритма вейвлет-фильтрации является величина SNR, перед разложением сигнала в базисе вейвлет-функций необходимо провести оценку уровня шума в сигнале, поступающем на вход приемного устройства. Эта оценка проводится на основе расчета спектра мощности и определения величины „шумового пьедестала“. Далее определяется оптимальный пороговый уровень, соответствующий минимуму зависимости $E(C)$ метода фильтрации, использующего дуальное вейвлет-преобразование. С этой целью генерируется тестовый сигнал (например, гармоническая функция), к которой добавляется шум, обеспечивающий то же значение SNR, что и в регистрируемом аудиосигнале. Значение C , соответствующее минимуму $E(C)$, определяемое для тестового сигнала, используется при вейвлет-фильтрации аудиоданных. Процедура соответствующей настройки параметров вейвлет-фильтра может быть проведена в автоматическом режиме. Таким образом, реализуется вариант адаптивного вейвлет-фильтра, автоматически подстраивающегося под регистрируемый аудиосигнал. За счет такой адаптации обеспечивается существенное снижение среднеквадратич-

ной ошибки восстановления информационного сигнала в приемном устройстве. Проведенные исследования для большого числа примеров аудиосигналов, к которым подмешивался шум разной интенсивности и статистики, продемонстрировали преимущество адаптивного подхода с применением дуального вейвлет-преобразования по сравнению со стандартной вейвлет-фильтрацией на основе ДВП. В среднем снижение среднеквадратичной ошибки с применением предложенного адаптивного подхода составляло около 7%.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-12-00324).

Список литературы

- [1] *Vetterli M., Kovacevic J.* Wavelets and subband coding. New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- [2] *Meyer Y.* Wavelets: Algorithms and applications. Philadelphia: S.I.A.M., 1993.
- [3] *Daubechies I.* Ten lectures on wavelets. Philadelphia: S.I.A.M., 1992.
- [4] *Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А.* // УФН. 2001. Т. 171. С. 465. [*Dremin I.M., Ivanov O.V., Nechitailo V.A.* // Phys. Usp. V. 44. P. 447.]
- [5] *Павлов А.Н., Храмов А.Е., Короновский А.А., Ситникова Е.Ю., Макаров В.А., Овчинников А.А.* // УФН. 2012. Т. 182. С. 905. [*Pavlov A.N., Hramov A.E., Koronovskii A.A., Sitnikova E.Yu., Makarov V.A., Ovchinnikov A.A.* // Phys. Usp. 2012. V. 55. P. 845.]
- [6] *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Makarov V.A., Pavlov A.N., Sitnikova E.* Wavelets in Neuroscience. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.
- [7] *Jansen M.* Noise reduction by wavelet thresholding. New York: Springer-Verlag, 2001.
- [8] *Donoho D.L.* // IEEE Transactions on Information Theory. 1995. V. 41. P. 613.
- [9] *Kingsbury N.G.* // Appl. Comput. Harmon. Anal. 2001. V. 10. P. 234.
- [10] *Selesnick I.W., Baraniuk R.G., Kingsbury N.G.* // IEEE Signal Processing Magazine. 2005. V. 22. P. 123.
- [11] *Selesnick I.W.* // IEEE Signal Processing Lett. 2001. V. 8. P. 170.