

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 53.088

ПРИМЕНЕНИЕ ДУАЛЬНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ЗАШУМЛЕННЫХ АУДИОСИГНАЛОВ

© 2017 г. А. С. Ясин^{1,2}, А. Н. Павлов^{1,3,4,*}, А. Е. Храмов^{1,3,4}

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Российская Федерация, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83

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

³Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, Российская Федерация, 410054 Саратов, ул. Политехническая, 77

⁴Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Российская Федерация, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38

*E-mail: pavlov.lesha@gmail.com

Поступила в редакцию 22.04.2015 г.

Рассмотрена проблема повышения качества фильтрации зашумленных аудио-сигналов с применением методов, основанных на дискретном вейвлет-преобразовании с вещественными базисами и дуальном (комплексном) вейвлет-преобразовании, в котором применяются аналитические вейвлеты в качестве базисных функций. На тестовых примерах и при обработке экспериментальных данных показано, что в случае оптимального выбора порогового уровня подход, использующий дуальное вейвлет-преобразование, обеспечивает минимальную ошибку восстановления сигнала после коррекции вейвлет-коэффициентов.

DOI: 10.7868/S0033849417030238

ВВЕДЕНИЕ

Методы на основе вейвлет-преобразования [1–5] в настоящее время широко применяются для решения задач цифровой фильтрации зашумленных сигналов. Многочисленные исследования вариантов фильтрации сигналов с применением дискретного вейвлет-преобразования (ДВП), позволяющие добиться высокого качества очистки экспериментальных данных от помех, обсуждаются, в частности, в работах [6–10]. Основная идея вейвлет-фильтрации состоит в разложении сигнала на составляющие на разных уровнях разрешения, при котором малые по модулю вейвлет-коэффициенты преимущественно соответствуют флуктуациям, а большие – зашумленному сигналу. По этой причине очевидный вариант фильтрации состоит в обнулении малых вейвлет-коэффициентов, связанных с помехами и случайными искажениями, с последующим восстановлением сигнала в ходе проведения обратного вейвлет-преобразования [2]. Качество такой фильтрации зависит от выбора пороговой функции, на которую умножаются вейвлет-коэффициенты. Традиционно применяются два варианта – “мягкий” и “жесткий” [6–8], в первом предусматривается коррекция всех вейвлет-коэффициентов, а во втором – только тех, которые не превышают заданный пороговый уровень.

Несмотря на то что подходы на основе ДВП рассматриваются в качестве стандартных вариантов вейвлет-фильтрации, они имеют ряд недостатков, к числу которых относятся осцилляции вейвлет-коэффициентов в окрестности сингулярностей, усложняющие обработку сигналов, отсутствие инвариантности относительно сдвига, приводящее к непредсказуемым изменениям паттернов вейвлет-коэффициентов при смещении сингулярностей, появление артефактов в реконструированном сигнале после коррекции вейвлет-коэффициентов. В целях устранения этих недостатков в работах [11–15] был предложен и впоследствии усовершенствован метод дуального комплексного вейвлет-преобразования (ДКВП; *англ.* – dual-tree complex wavelet transform). Этот подход обладает приближенной инвариантностью относительно сдвига и оперирует с комплексными (аналитическими) вейвлетами, построенными на основе вещественных вейвлет-функций путем добавления мнимой части, вычисленной с помощью преобразования Гильберта. Метод ДКВП предусматривает независимое вычисление двух ДВП, в результате которых определяются действительные и мнимые части вейвлет-коэффициентов.

В данной работе мы проводим сопоставление методов вейвлет-фильтрации на основе ДВП и

ДКВП для тестовых примеров и аудиосигналов, представляющих собой голосовые сообщения, регистрируемые при наличии помех различной интенсивности. Мы показываем, что применение метода ДКВП позволяет существенно повысить качество цифровой вейвлет-фильтрации, обеспечивая снижение ошибки восстановления сигнала после коррекции вейвлет-коэффициентов.

1. ФИЛЬТРАЦИЯ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Дискретное вейвлет-преобразование предусматривает разложение сигнала в базисе локализованных функций, представляющем собой набор перемасштабированных и смещенных версий “материнского” вейвлета $\psi(t)$ [1]. Реализация ДВП предусматривает подачу сигнала на вход двух сопряженных квадратурных зеркальных фильтров. Прохождение сигнала через НЧ-фильтр можно рассматривать как его аппроксимацию на разных уровнях разрешения, а прохождение ВЧ-фильтра интерпретируется как детализация на заданном уровне разрешения [2]. При разложении сигнала в терминах скейлинг-функций $\varphi(t)$ и вейвлетов $\psi(t)$ получаем набор коэффициентов, которые несут информацию о структуре сигнала на разных уровнях разрешения [1, 4]

$$f(t) = \sum_k c_k \varphi(t - k) + \sum_j \sum_k d_{j,k} 2^{j/2} \psi(2^j - k). \quad (1)$$

Коэффициенты разложения по вейвлет-функциям $d_{j,k}$ характеризуют амплитудные составляющие сигнала на разных масштабах и в разные моменты времени. При проведении фильтрации малые вейвлет-коэффициенты обнуляются. На практике широко применяются два основных варианта выбора пороговой функции – “жесткий” и “мягкий”. В случае “жесткого” варианта пороговой функции

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

проводится обнуление только малых по модулю коэффициентов [6], что сохраняет неискаженной амплитуду сигнала, но сопровождается появлением нерегулярностей, обусловленных разрывным характером функции (2). “Мягкий” вариант пороговой функции

$$p(x) = \begin{cases} x - C, & x \geq C \\ x + C, & x \leq -C \\ 0, & |x| \leq C \end{cases} \quad (3)$$

позволяет избежать нерегулярностей, но при этом проводится коррекция всех вейвлет-коэффициентов $d_{j,k}$ при умножении их на функцию (3) и ампли-

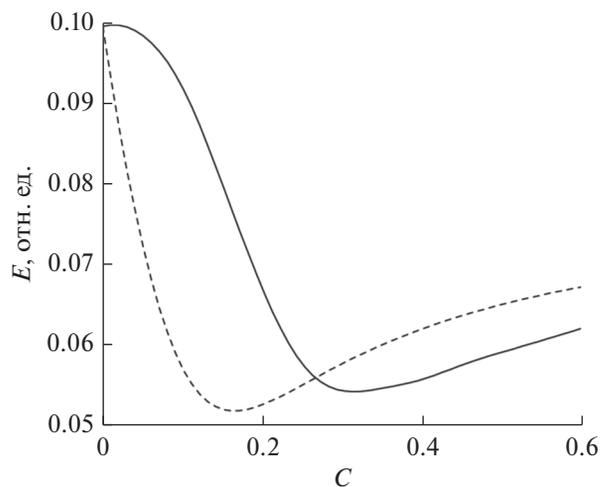


Рис. 1. Зависимости среднеквадратичной ошибки восстановления тестового сигнала (гармонических колебаний) на основе метода ДВП с применением “жесткой” (сплошная кривая) и “мягкой” (штриховая) пороговых функций; расчеты проведены для вейвлета Добеши D8 и уровня шума 20 дБ.

туда сигнала снижается [7]. Следует отметить, что коррекция всех коэффициентов не всегда является неперенным недостатком метода. В частности, при приеме сигналов в технике связи важно обеспечить эффективное подавление помех, после чего можно усилить отфильтрованный сигнал.

В обоих вариантах пороговой функции ключевым является выбор значения C . Как следует из рис. 1, приведенного для тестового примера (зашумленных гармонических колебаний), при “мягком” и “жестком” задании пороговой функции оптимальное значение C отличается. При этом для пороговой функции (3) можно достичь наименьшей ошибки восстановления сигнала. Величина C определяет уровень шума, который необходимо отфильтровать. К числу широко применяемых способов выбора C относится универсальный пороговый уровень, предложенный в работе [6]

$$C = \sigma \sqrt{2 \ln N}, \quad (4)$$

где σ – стандартное отклонение шума, N – число вейвлет-коэффициентов ($N \geq 4$). При проведении дискретного вейвлет-преобразования число коэффициентов меняется в два раза при переходе от одного уровня разрешения к другому, в связи с чем могут применяться как подходы на основе глобального введения порога (C является фиксированной величиной, не зависящей от уровня разрешения), так и подходы, предусматривающие задание разных пороговых уровней C_j в зависимости от разрешения j . В качестве оценки σ используется следующая величина [10]:

$$\frac{M(|d_{j-1,k} - M(d_{j-1,k})|)}{0.6745}, \quad (5)$$

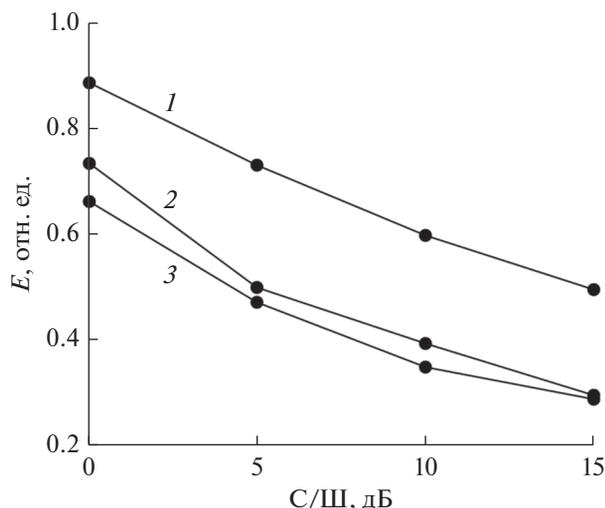


Рис. 2. Зависимости среднеквадратичной ошибки восстановления тестового сигнала (гармонических колебаний) на основе метода ДВП с применением пороговой функции (формула (3)) и вейвлетов Добеши D20 от отношения сигнал/шум: 1 – универсальный пороговый уровень, 2 – совместное использование универсального порогового уровня и метода SURE, 3 – метод SURE.

где M – медиана, J – максимальный уровень разрешения при осуществлении ДВП. Выбор предыдущего уровня $J - 1$ обусловлен тем, что на этом уровне вейвлет-коэффициенты в основном относятся к шуму. В качестве количественного критерия часто оценивают вероятность искажений сигнала при пороговой фильтрации или ошибку фильтрации [7], для уменьшения которой целесообразно использовать методы, применяющие минимальные значения порога, так как они приводят к менее существенным искажениям сигнала.

С этой целью широко используется альтернативный вариант задания порога – метод SURE [16], в соответствии с которым в качестве оценки порогового уровня \hat{C} рассматривается величина

$$\hat{C} = \arg \min_C \sum_{m=0}^{N-1} P(D_m), \quad (6)$$

$$P(D_m) = \begin{cases} D_m^2 - \sigma^2, & D_m \leq C \\ \sigma^2 + C^2, & D_m > C \end{cases}$$

Согласно проведенным исследованиям значение \hat{C} близко к оптимальному пороговому уровню. Тем не менее этот подход также может приводить к ошибкам при больших интенсивностях шума. В таких ситуациях предпочтительнее вариант совместного использования универсального порогового уровня и метода SURE: если вейвлет-коэффициенты малы, то применяется первый подход, а в противном случае – второй. Чтобы определить вы-

бор метода, задается минимальный энергетический уровень $\varepsilon_N = \sigma^2 N^{1/2} (\ln N)^{3/2}$, и величина порога определяется следующим образом:

$$C = \begin{cases} \sigma \sqrt{2 \ln N}, & \|D_m\|^2 - N\sigma^2 \leq \varepsilon_N \\ \hat{C}, & \|D_m\|^2 - N\sigma^2 > \varepsilon_N \end{cases}. \quad (7)$$

Сопоставление разных вариантов выбора порогового уровня C для метода “мягкого” задания пороговой функции, примененного для тестового примера (гармонической функции с аддитивным добавлением шума), приведено на рис. 2. Согласно полученным результатам подход на основе задания универсального порогового уровня приводит к наибольшей среднеквадратичной ошибке. Минимальную погрешность обеспечивает метод SURE.

2. ФИЛЬТРАЦИЯ НА ОСНОВЕ ДУАЛЬНОГО (КОМПЛЕКСНОГО) ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Подходы, основанные на стандартном ДВП, имеют ряд существенных недостатков, которые были отмечены во Введении. Кроме того, они не позволяют получать информацию о фазовых соотношениях, которая часто требуется при решении ряда практических задач, например, при решении задач о взаимодействии автоколебательных систем. В целях совершенствования методов, основанных на вейвлет-преобразовании, был предложен подход, применяющий комплексное вейвлет-преобразование [11, 12]. Поскольку название “комплексное вейвлет-преобразование” обычно ассоциируется с применением непрерывного вейвлет-преобразования с комплексными базисными функциями, метод [11, 12] в дальнейшем будем называть дуальным вейвлет-преобразованием. Главная идея данного подхода состоит в том, чтобы дополнить вещественные скейлинг-функции и вейвлеты мнимыми частями, полученными с помощью преобразования Гильберта, что приводит к комплексным (аналитическим) низкочастотному и высокочастотному зеркальным фильтрам.

В соответствии с методом ДКВП вводятся в рассмотрение комплексные вейвлеты $\psi^c(t) = \psi^r(t) + j\psi^i(t)$, и на основе функций $\psi^r(t)$ и $\psi^i(t)$ формируются два ортонормированных базиса. Вейвлет-преобразование независимо вычисляется с использованием каждого базиса, в результате чего получаются комплексные вейвлет-коэффициенты $d_{j,k}^c = d_{j,k}^r + jd_{j,k}^i$. Алгоритмически метод ДКВП сводится к двум независимым пирамидальным разложениям сигнала. В отличие от стандартного ДВП, накладывается дополнительное требование – скейлинг-функции и вейвлеты $\psi^c(t)$ должны

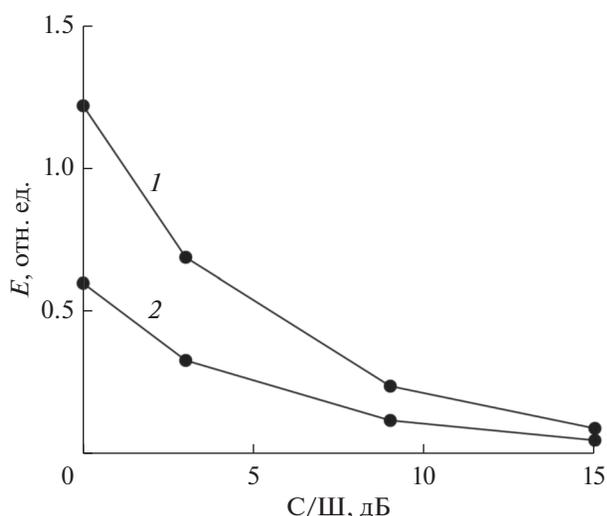


Рис. 3. Зависимости оптимального порогового уровня при вейвлет-фильтрации тестового сигнала (гармонических колебаний) на основе методов ДВП (1) и ДКВП (2) от отношения сигнал/шум.

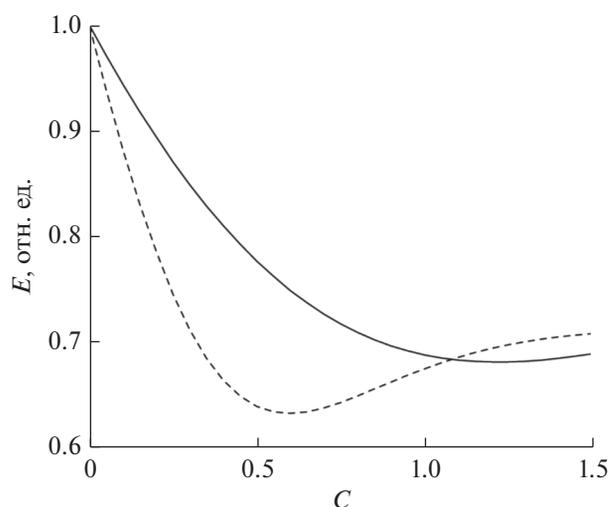


Рис. 4. Зависимости среднеквадратичной ошибки E восстановления тестового сигнала (гармонических колебаний) на основе методов ДВП (сплошная кривая) и ДКВП (штриховая) от порогового уровня; расчеты проведены для вейвлета Добеши D20 и шума 0 дБ.

быть аналитическими функциями, для выполнения этого требования применяют специальные алгоритмы построения зеркальных фильтров [15]. В проводимых исследованиях применялись фильтры, предложенные в работе [11], и их программная реализация на MATLAB, разработанная в [17].

На рис. 3 приведены результаты сопоставления вейвлет-фильтрации на основе ДВП и ДКВП для тестового сигнала – гармонической функции с аддитивным добавлением шума. Как показывает анализ полученных данных, оптимальный пороговый уровень для метода ДКВП меньше, чем для ДВП при всех рассмотренных отношениях сигнал/шум (C/S). Это означает, что применение ДКВП обеспечивает снижение вероятности возможных искажений сигнала в результате пороговой фильтрации (чем меньше C , тем ниже вероятность удалить при фильтрации информативные вейвлет-коэффициенты), что является одним из очевидных преимуществ данного подхода.

На рис. 4 представлены примеры зависимостей среднеквадратичной ошибки фильтрации для ДВП и ДКВП, согласно которым метод ДКВП обеспечивает минимальное значение ошибки при подходящем выборе порогового значения.

3. ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТРАЦИЯ АУДИОСИГНАЛОВ

Проведя сопоставление методов вейвлет-фильтрации для тестового примера, рассмотрим их применение к экспериментальным данным. С этой целью рассматривались различные аудиосигналы, преимущественно голосовые сообще-

ния, к которым аддитивно подмешивался белый шум разной интенсивности. Пример фрагмента голосового сообщения и результаты вейвлет-фильтрации для различных сигналов приведены на рис. 5. Вследствие того, что спектральные диапазоны сигнала и шума перекрываются, вейвлет-фильтрация не позволяет полностью устранить присутствующие флуктуации, и задание больших значений пороговых уровней для более эффективного подавления шума приводит к искажениям информационного сообщения. По этой причине важной задачей является выбор оптимальных параметров проводимой фильтрации.

Визуальный анализ сигналов, представленных на рис. 5в, 5г и 5д, свидетельствует о том, что метод ДКВП обеспечивает минимальные искажения. Результаты расчета минимальной ошибки, которая достигалась при проведении вейвлет-фильтрации на основе ДВП (вариант мягкого задания пороговой функции, базисы вейвлетов Добеши от D3 до D20), а также результаты расчета минимальной ошибки фильтрации при использовании метода ДКВП представлены на рис. 6.

Отметим, что оптимальное значение порогового уровня для этих методов отличается: для ДКВП оптимальный пороговый уровень равен 0.020, а для ДВП – примерно вдвое больше ($C = 0.039$). При выборе оптимальных значений C метод ДКВП приводит к среднеквадратичной ошибке фильтрации, примерно на 9% меньше, чем для метода на основе ДВП, что является существенным улучшением качества цифровой фильтрации. Сопоставимые результаты (снижение ошибки в среднем на 8%) были получены и для других примеров аудиосигналов и разных от-

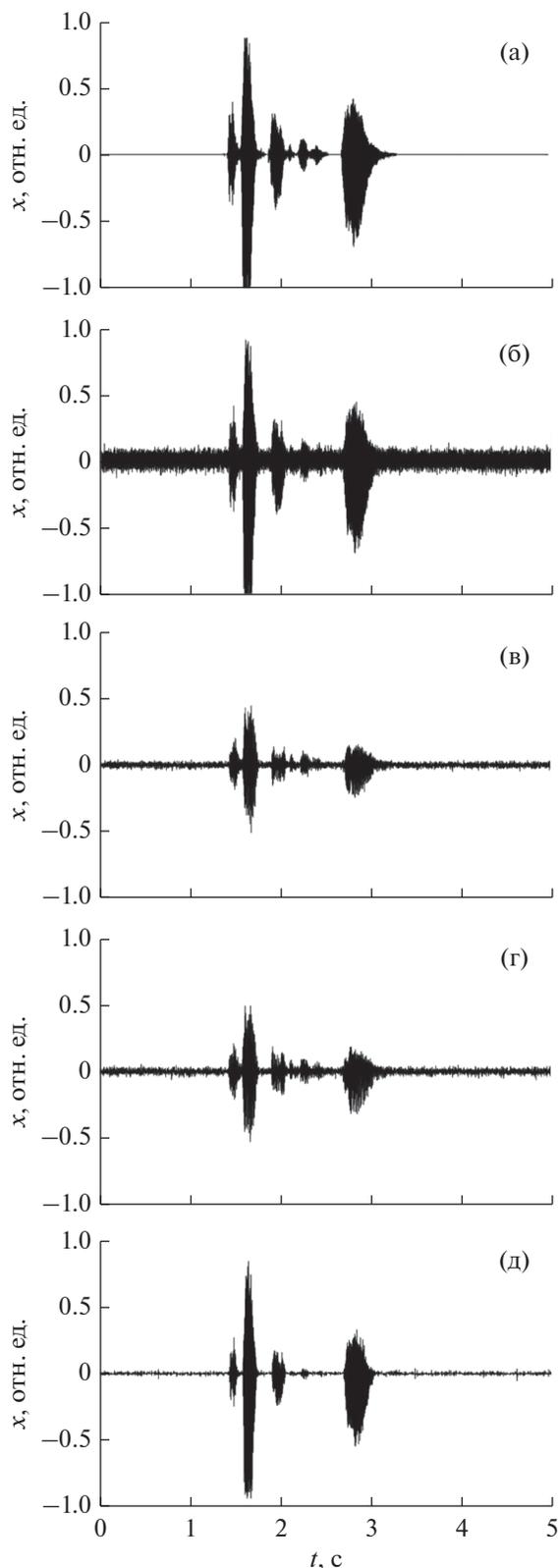


Рис. 5. Результаты вейвлет-фильтрации фрагмента голосового сообщения: а – исходный сигнал, б – сигнал с добавлением аддитивного шума, в – сигнал после фильтрации на основе метода ДВП с функцией (3), г – сигнал после фильтрации на основе ДВП с функцией (2), д – сигнал после фильтрации методом ДКВП.

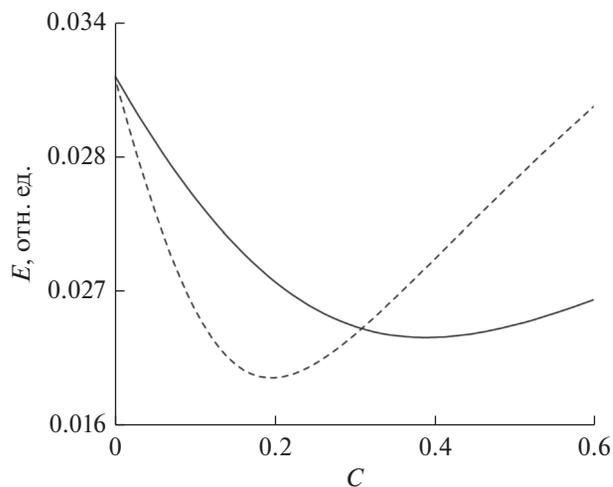


Рис. 6. Зависимости среднеквадратичной ошибки E восстановления аудиосигнала на основе методов ДВП (сплошная кривая) и ДКВП (штриховая); расчеты приведены для вейвлета Добеши D8 (который обеспечивал минимальную ошибку фильтрации) и уровня шума 30 дБ.

ношений С/Ш. Таким образом, можно утверждать, что метод ДКВП имеет несомненные преимущества по сравнению со стандартным вариантом вейвлет-фильтрации, применяющим ДВП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено сопоставление методов вейвлет-фильтрации зашумленных сигналов, применяющих вещественные и комплексные базисные функции. Протестирован метод на основе дискретного вейвлет-преобразования с базисными функциями семейства Добеши для случаев мягкого и жесткого введения пороговой функции и трех вариантов задания порогового уровня. Рассмотрен метод дуального (комплексного) вейвлет-преобразования, применяющий в качестве вейвлетов аналитические функции, который предусматривает дополнение вещественных базисных функций мнимыми частями, вычисленными на основе преобразования Гильберта. Данный подход позволяет устранить ряд существенных недостатков стандартного ДВП, такие как отсутствие инвариантности относительно сдвига и появление артефактов в восстановленном сигнале.

На тестовом примере гармонической функции с аддитивным добавлением белого шума показано, что стандартный метод ДВП обеспечивает минимальную ошибку восстановления сигнала в ходе вейвлет-фильтрации при выборе мягкого варианта задания пороговой функции и порогового уровня, введенного по методу SURE. Соответствующий вывод подтверждается для разных значений отношения сигнал/шум в анализируемых

данных. Метод ДКВП позволяет снизить ошибку цифровой фильтрации по сравнению со стандартным подходом, основанным на ДВП, и приводит к дополнительному снижению порогового уровня, что соответствует уменьшению риска возможных искажений в результате пороговой фильтрации.

Сделанные выводы подтверждены при анализе аудиосигналов, в качестве которых выбраны фрагменты голосовых сообщений с аддитивным подмешиванием белого шума различной интенсивности. Анализ экспериментальных данных свидетельствует о преимуществе метода вейвлет-фильтрации на основе ДКВП. Этот подход в среднем обеспечивал снижение ошибки вейвлет-фильтрации на 8% при оптимальном выборе порогового уровня. В качестве значения порогового уровня, близкого к оптимальному, на практике может быть использован вариант задания порогового уровня по методу SURE.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-12-00324).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meyer Y. Wavelets: Algorithms and applications. Philadelphia: SIAM, 1993.
2. Vetterli M., Kovacevic J. Wavelets and subband coding. New Jersey: Prentice Hall, 1995.
3. Daubechies I. Ten lectures on wavelets. Philadelphia: S.I.A.M., 1992.
4. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. // Успехи физ. наук. 2001. Т. 171. С. 465.
5. Павлов А.Н., Храмов А.Е., Короновский А.А. и др. // Успехи физ. наук. 2012. Т. 182. С. 905.
6. Donoho D.L., Johnstone I.M. // Biometrika. 1994. V. 81. P. 425.
7. Donoho D.L. // IEEE Trans. 1995. V. IT-41. P. 613.
8. Jansen M. Noise reduction by wavelet thresholding. New York: Springer-Verlag, 2001.
9. Zhang H., Blackburn T.R., Phung B.T., Sen D. // IEEE Trans. 2007. V. DEI-14. P. 3.
10. Chang S.G., Yu B., Vetterli M. // IEEE Trans. 2000. V. IP-9. P. 1532.
11. Kingsbury N.G. // Philos. Trans. R. Soc. London A. 1999. V. 357. P. 2543.
12. Kingsbury N.G. // Appl. Comput. Harmon. Anal. 2001. V. 10. P. 234.
13. Selesnick I.W. // IEEE Signal Processing Lett. 2001. V. 8. P. 170.
14. Selesnick I.W. // IEEE Trans. Signal Processing. 2004. V. 52. P. 1304.
15. Selesnick I.W., Baraniuk R.G., Kingsbury N.G. // IEEE Signal Processing Magazine. 2005. V. 22(6). P. 123.
16. Stein C.M. // Annals of Statistics. 1981. V. 9. P. 1317.
17. <http://eeweb.poly.edu/iselesni/WaveletSoftware/>