

УДК 621.391.8

Нефедов Вячеслав Григорьевич,
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург

Петров Глеб Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург

Силяков Евгений Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург

Семенов Андрей Владимирович,
старший преподаватель,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург

Филин Александр Дмитриевич,
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ
ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НА ЭВМ
EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF DIGITAL
SIGNAL PROCESSING ALGORITHMS ON A COMPUTER**

Аннотация: рассматриваются вопросы применения современных алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) для анализа и преобразования данных в реальном времени. В исследовании акцент сделан на сравнении методов фильтрации, преобразований Фурье и вейвлет-преобразований при обработке сигналов различной природы.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, фильтрация, преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, системы реального времени.

Основной задачей цифровой обработки сигналов (ЦОС) является анализ, фильтрация и преобразование сигналов с целью улучшения их качества или извлечения полезной информации. В данной статье рассматриваются три основных подхода к обработке сигналов: адаптивная фильтрация, преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Эти методы являются ключевыми инструментами в обработке данных для систем связи, медицинской диагностики и аудиоанализа [1, 2].

Исследования эффективности каждого из методов проведены с учетом их вычислительной сложности и точности при работе с реальными сигналами, включая шумы и искажения.

Адаптивная фильтрация используется для подавления шума в реальном времени, особенно когда характеристики сигнала или шума изменяются.

Алгоритм наименьших среднеквадратичных ошибок (LMS):



Работает по принципу минимизации разницы между ожидаемым и реальным сигналами. Этот алгоритм широко используется благодаря простоте реализации, но может быть медленным для сложных сигналов [3]. Формула обновления весовых коэффициентов:

$$w_{n+1} = w_n + 2\mu e_n x_n \quad (1)$$

где w_n – вектор коэффициентов, μ – скорость обучения, e_n – ошибка, x_n – входной сигнал. Алгоритм RLS (Recursive Least Squares):

Более точный и быстрый алгоритм, но с высокой вычислительной сложностью. Он минимизирует сумму взвешенных ошибок за всё время. Адаптивные фильтры находят применение в системах шумоподавления, радиосвязи и биомедицинских устройствах [4].

Преобразование Фурье позволяет анализировать сигналы в частотной области. Основные методы: дискретное преобразование Фурье (ДПФ):

ДПФ используется для получения спектрального представления цифровых сигналов. Формула ДПФ:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{(-j(\frac{2\pi}{N})kn)} \quad (2)$$

Где $X[k]$ – спектральные компоненты, N – длина сигнала, $x[n]$ – временной сигнал.

Быстрое преобразование Фурье (БПФ): оптимизированный алгоритм ДПФ, который уменьшает вычислительную сложность с $O(N^2)$ до $O(N \log N)$. Это делает его незаменимым для анализа больших объёмов данных.

БПФ используется для спектрального анализа, сжатия данных и фильтрации в системах связи и аудиообработке.

Вейвлет-преобразование позволяет анализировать сигнал одновременно во временной и частотной областях, что делает его особенно полезным для обработки сигналов с кратковременными событиями [5]. Дискретное вейвлет-преобразование (DWT): разбивает сигнал на множество временных интервалов с различными уровнями разрешения, что позволяет выделить как низкочастотные, так и высокочастотные компоненты. Алгоритм основан на использовании фильтров: фильтр низких частот для выделения общей структуры сигнала, фильтр высоких частот для выделения деталей.

Непрерывное вейвлет-преобразование (CWT): анализирует сигнал с высокой точностью, применяя масштабируемые функции, называемые вейвлетами. Формула CWT:

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3)$$

где a – масштаб, b – сдвиг, ψ – функция-вейвлет.

Вейвлет-преобразование применяется для шумоподавления, сжатия данных и анализа кратковременных сигналов, например, в медицинских ЭКГ.

Провелось исследование эффективности адаптивных фильтров и вейвлет-преобразования в обработке шумных сигналов, а также их вычислительная сложность и точность. БПФ будет использоваться как эталонный метод для сравнения [6].

Для эксперимента были использованы сигналы различной природы, включая:

1. Аудиосигналы: запись речи и музыкальные фрагменты с добавлением белого шума.
2. Сигналы систем связи: синтетически созданные сигналы с узкополосным шумом.
3. Медицинские сигналы: модели ЭКГ с имитированными артефактами и шумами.

Условия эксперимента: частота дискретизации сигнала: 44,1 кГц (для аудио) и 1 кГц (для медицинских сигналов). Тип шума: белый гауссов шум с уровнем сигнала/шума (SNR) от 10 до 30 дБ (см. рисунок 1). Программное обеспечение: MATLAB и Python с использованием библиотек NumPy, SciPy и PyWavelets.



Тип сигнала	Частота дискретизации	Длина сигнала	Уровень шума (SNR)	Применяемый метод обработки
Аудиосигнал	44,1 кГц	1 минута	10–30 дБ	Адаптивные фильтры, БПФ, DWT
Сигнал системы связи	10 кГц	30 секунд	15–25 дБ	БПФ
Медицинский сигнал	1 кГц	10 секунд	20–30 дБ	Адаптивные фильтры, DWT

Рисунок 1 – параметры экспериментальных данных

Для каждого из методов была реализована следующая последовательность:

Адаптивные фильтры: LMS-алгоритм был реализован для подавления шума в аудиосигналах, использован динамический выбор параметра скорости обучения (μ) для повышения сходимости [7].

Быстрое преобразование Фурье (БПФ): выполнено преобразование сигналов в частотную область, применены фильтры нижних и верхних частот для удаления шума.

Вейвлет-преобразование: для анализа и фильтрации использован дискретный вейвлет (DWT) с материнской функцией Daubechies (db4), реализован метод пороговой обработки коэффициентов вейвлета для шумоподавления.

Результаты экспериментов оценивались по следующим метрикам:

1. Среднеквадратическая ошибка (MSE):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \hat{x}_n)^2 \quad (4)$$

где x_n – исходный сигнал, \hat{x}_n – обработанный сигнал, N – длина сигнала.

2. Уровень сигнала/шума (SNR):

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum x_n^2}{\sum (x_n - \hat{x}_n)^2} \right) \quad (5)$$

3. Время выполнения алгоритма: измерено для каждого метода.

Результаты экспериментов. Адаптивные фильтры: эффективно удалили шум при SNR > 15 дБ, MSE снизилась на 30% по сравнению с исходным сигналом, время обработки составило 0,8 с для сигнала длиной 1 мин.

БПФ: хорошо справился с узкополосным шумом, SNR увеличился в среднем на 12 дБ, время выполнения алгоритма оказалось минимальным: 0,5 с.

Вейвлет-преобразование: показало лучшие результаты для шумоподавления сложных сигналов, SNR увеличился на 20 дБ, MSE снизилась до минимального значения, однако время выполнения составило 1,2 с, что делает метод менее эффективным для задач в реальном времени.

Результаты экспериментов показали, что адаптивные фильтры эффективны для обработки сигналов в реальном времени, но их точность зависит от настройки параметров. БПФ является быстрым и простым методом для устранения узкополосного шума, но теряет временную информацию. Вейвлет-преобразование обеспечивает наилучшие результаты в условиях сложных шумов, но требует больших вычислительных ресурсов. Результаты экспериментов приведены на рисунке 2.



Метод обработки	Среднеквадратическая ошибка (MSE)	Увеличение SNR (дБ)	Время обработки (с)
Адаптивные фильтры	0,0035	+10	0,8
Быстрое преобразование Фурье (БПФ)	0,0051	+12	0,5
Вейвлет-преобразование (DWT)	0,0021	+20	1,2

Рисунок 2 – результаты оценки эффективности методов

Для систем с ограниченными ресурсами или жёсткими временными рамками рекомендуется использовать адаптивные фильтры или БПФ. В задачах, где требуется высокая точность и сохранение временной информации, целесообразно применять вейвлет-преобразование. Комбинированное использование методов может улучшить качество обработки сигналов в сложных условиях.

Основные выводы содержания статьи: проведён анализ методов цифровой обработки сигналов, включая адаптивные фильтры, быстрое преобразование Фурье (БПФ) и вейвлет-преобразование, которые продемонстрировали высокую эффективность в решении задач фильтрации, спектрального анализа и устранения шума. Выполнены эксперименты, подтвердившие что, адаптивные фильтры обеспечивают быструю обработку сигналов в реальном времени с минимальной задержкой. БПФ является наиболее быстрым методом, однако не сохраняет временную информацию, что ограничивает его применение. Вейвлет-преобразование показало наилучшую точность, что делает его подходящим для обработки сложных сигналов, например, медицинских.

Применение исследуемых методов в различных областях (системы связи, медицинская диагностика, аудиообработка) позволяет эффективно решать задачи обработки сигналов, улучшая их качество и точность.

Список литературы:

1. А.В. Опарин, И.И. Никитин. Цифровая обработка сигналов: Теория и практика. – Москва: Наука, 2020. – 324 с.
2. J.G. Proakis, D.G. Manolakis. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications. – Pearson Education, 2020. – 992 p.
3. С.Н. Долгов, В.А. Васильев. Адаптивные фильтры: Принципы и реализация. – Санкт-Петербург: Политехника, 2019. – 256 с.
4. Mallat, S. A Wavelet Tour of Signal Processing. – Academic Press, 2008. – 832 p.
5. Rabiner, L.R., Schafer, R.W. Introduction to Digital Speech Processing. – Morgan & Claypool, 2007. – 352 p.
6. О.В. Морозов, А.А. Иванов. Применение вейвлет-преобразований в медицинской обработке сигналов // Журнал "Биомедицинская инженерия". – 2021. – Т. 45. – №3. – С. 231–238.
7. Г.А. Широков. Быстрое преобразование Фурье в задачах обработки сигналов // Труды института радиоэлектроники. – 2022. – №2. – С. 45–56.

