

УДК 534

Сравнительный анализ эффективности методов предварительной фильтрации в задачах корреляционной обработки сигналов для локализации и классификации источника звука

Лестенко Никита Александрович^()*

lestenko_na@voenmeh.ru

Олейников Алексей Юрьевич

oleinikov_aui@voenmeh.ru

Вальштейн Константин Владимирович

valshtein_kv@voenmeh.ru

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе выполнен сравнительный анализ пяти методов предварительной фильтрации сигналов (скользящая средняя, экспоненциальное сглаживание, гауссово ядро, медианная и адаптивная фильтрация) в задачах корреляционной обработки для локализации и классификации источника звука. Оценка проводилась по выходному отношению сигнал/шум, точности определения временной задержки и вероятности идентификации сигналов из банка эталонов при разных уровнях аддитивного белого гауссова шума. Результаты моделирования показали, что все методы повышают помехоустойчивость корреляционного приемника. Адаптивное сглаживание обеспечивает наибольший выигрыш в ОСШ и помехоустойчивость, медианная фильтрация оптимальна при импульсных помехах, а линейные методы уступают в точности определения задержки из-за расширения корреляционного пика.

Ключевые слова: предварительная фильтрация сигналов, корреляционная обработка, локализация источника звука, классификация сигналов, отношение сигнал/шум, адаптивное сглаживание, медианная фильтрация, гауссово ядро, экспоненциальное сглаживание, скользящая средняя

Comparative analysis of efficiency of pre-filtering methods in correlation signal processing for sound source localization and classification

Nikita A. Lestenko^()*

lestenko_na@voenmeh.ru

Alexey Yu. Oleynikov

oleinikov_aui@voenmeh.ru

Konstantin V. Valshtein

valshtein_kv@voenmeh.ru

BSTU "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, St. Petersburg, Russia

Abstract. The paper presents a comparative analysis of five signal pre-filtering methods (moving average, exponential smoothing, Gaussian kernel, median and adaptive filtering) in correlation processing tasks for sound source localization and classification. The evaluation was performed based on the output signal-to-noise ratio, time delay estimation accuracy, and signal identification probability from a reference bank under different levels of additive white Gaussian noise. Simulation results showed that all methods improve the noise immunity of the correlation receiver. Adaptive smoothing provides the highest SNR gain

and noise immunity, median filtering is optimal under impulse noise, while linear methods are inferior in time delay accuracy due to correlation peak broadening.

Keywords: signal pre-filtering, correlation processing, sound source localization, signal classification, signal-to-noise ratio, adaptive smoothing, median filtering, Gaussian kernel, exponential smoothing, moving average

Введение. В современных системах радиолокации, связи и гидроакустики задача обнаружения и идентификации сигналов на фоне интенсивных помех остается одной из наиболее приоритетных [1]. Основным инструментом решения данной задачи является корреляционная обработка, позволяющая выделить полезную составляющую за счет накопления энергии сигнала и его сравнения с эталонными образцами.

Однако на практике эффективность классического корреляционного способа существенно ограничена при низких значениях отношения сигнал/шум (ОСШ) на входе. Наличие импульсных помех, побочных шумов (обычно гауссовых) и нестационарных искажений приводит к деформации взаимной корреляционной функции (ВКФ), появлению ложных пиков и, как следствие, к ошибкам в определении временной задержки и типа сигнала [2, 3].

Для минимизации данных негативных факторов применяется предварительная фильтрация (сглаживание) входного процесса. Выбор конкретного метода фильтрации является нетривиальной задачей, так как каждый алгоритм обладает специфическим воздействием на структуру сигнала:

Линейные методы эффективно подавляют высокочастотный шум, но могут приводить к «размытию» фронтов полезного сигнала. Нелинейные методы успешно устраняют аномальные выбросы, сохраняя резкие перепады уровней. Адаптивные и экспоненциальные алгоритмы позволяют подстраиваться под динамику процесса.

Целью данной статьи является сравнительный анализ пяти различных методов фильтрации в составе единого программного комплекса корреляционной обработки. В ходе исследования оценивается устойчивость каждого метода к зашумлению и его влияние на результирующую способность системы правильно идентифицировать эталонный сигнал.

Модель и программная реализация. Для проведения эксперимента был разработан программный комплекс, реализующий полный цикл обработки: от формирования шума до принятия решения о наличии и задержке сигнала.

Моделирование входного процесса осуществляется путем сложения полезного эталонного сигнала S и аддитивного белого гауссова шума, нормированного по энергии относительно сигнала нормального распределения:

$$\xi \sim N(0,1). \quad (1)$$

Нормировка случайного шума по формуле

$$n_{norm} = \xi \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} S_i^2}{\sum_{i=0}^{N-1} \xi_i^2}}, \quad (2)$$

где ξ — случайный шум; S_i — отсчеты сигнала; N — число отсчетов;

Входная смесь с коэффициентом интенсивности шума k имеет вид $X = S + \sqrt{k} \cdot n_{norm}$

В качестве основного критерия качества обработки используется показатель отношения сигнал/шум (SSNID), рассчитываемый по мощности максимума корреляционного отклика A относительно средней мощности шума в области вне основного пика:

$$SNR = \frac{\max(A)}{\sqrt{EPP}}, \quad (3)$$

где A — квадрат модуля отсчетов исходного сигнала; $\max(A)$ — максимальная амплитуда сигнала; $\sqrt{EPP}$ — среднеквадратичное значение шума.

В свою очередь, EPP вычисляется как:

$$EPP = \frac{1}{N - (2 \cdot dn + 1)} \sum_{m \in \Omega} A_m, \quad (4)$$

где Ω — множество индексов отсчетов, не входящих в окрестность максимума $\pm dn$; N — общее число отсчетов; dn — обнуляемая окрестность максимума; A_m — значения вне сигнала (то есть шум).

Каждый из исследуемых методов сглаживания может быть представлен оператором, преобразующим зашумленный сигнал X в отфильтрованный сигнал $\tilde{X}$:

Скользящая средняя (Moving Average): Линейная фильтрация в окне шириной ks :

$$\tilde{x}_i = \frac{1}{ks} \sum_{j=0}^{ks-1} x_{i+j}, \quad (5)$$

где x_i — исходный сигнал; $\tilde{x}_i$ — сглаженный сигнал; ks — размер окна (количество точек усреднения)

Экспоненциальное сглаживание: Рекурсивный фильтр, где влияние прошлых отсчетов затухает по экспоненте:

$$\tilde{x}_i = \alpha \cdot x_i + (1 - \alpha) \cdot \tilde{x}_{i-1}, \quad (6)$$

где x_i — текущее значение сигнала; $\tilde{x}_i$ — сглаженный сигнал; $\tilde{x}_{i-1}$ — предыдущее сглаженное значение; $\alpha \in (0, 1)$ — коэффициент сглаживания;

Сглаживание гауссовым ядром: Свертка сигнала с функцией Гаусса, обеспечивающая высокую гладкость [4]:

$$\tilde{x}_i = \frac{\sum_j x_j \cdot K(i, j)}{\sum_j K(i, j)}, \quad (7)$$

где x_i — текущее значение сигнала; $\tilde{x}_i$ — сглаженный сигнал; $K(i, j)$ — веса.

В свою очередь, гауссово ядро вычисляется функцией, которая задает веса при сглаживании.

$$K(i, j) = \exp\left(-\frac{(i-j)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (8)$$

где i — точка, для которой считаем новое значение; j — соседние точки сигнала; σ — параметр ширины ядра, отвечающий за степень сглаживания.

Медианная фильтрация: Нелинейный оператор выбора центрального элемента в вариационном ряду выборки [5]:

$$\tilde{x}_i = \text{median}\{x_{i-k}, \dots, x_{i+k}\}, \quad (9)$$

где $\tilde{x}_i$ — это медиана значений в окне вокруг точки i .

Адаптивное сглаживание (Метод Фридмана): использует локальную линейную регрессию, где ширина окна h выбирается исходя из минимизации кросс-валидационной ошибки [3]:

$$\tilde{x}_i = \underset{a,b}{\operatorname{argmin}} \sum_{j=i-h}^{i+h} w_j (x_j - (a + b \cdot t_j))^2, \quad (10)$$

где $\tilde{x}_i$ — сглаженный сигнал в точке i ; a — сдвиг; b — наклон; t_j — время или индекс; x_j — исходные данные сигнала; w_j — веса.

Результирующая функция взаимной корреляции (ВКФ) между отфильтрованной смесью $\tilde{X}$ и эталоном из банка записей $Z^{(\text{ind})}$ вычисляется с применением быстрого преобразования Фурье (БПФ):

$$R^{(\text{ind})} = \left| \mathcal{F}^{-1} \left(\mathcal{F}(\tilde{X}) \cdot \overline{\mathcal{F}(Z^{(\text{ind})})} \right) \right|, \quad (11)$$

где $\tilde{x}$ — сглаженный сигнал; $Z^{(\text{ind})}$ — эталон; $F(Z)$ — комплексное сопряжение спектра эталона.

Решение об идентификации сигнала принимается по критерию максимума

$$\text{ind}_{\text{result}} = \underset{\text{ind}}{\operatorname{argmax}} (\max(R^{(\text{ind})})), \quad (12)$$

где $R^{(\text{ind})}$ — корреляционный отклик для каждого варианта индекса; $\max(R^{(\text{ind})})$ — максимальное значение для каждого индекса;

Результаты имитационного моделирования. Для оценки эффективности методов была проведена серия вычислительных экспериментов. В качестве тестового набора использовался банк из 32 эталонных записей.

Результатом эксперимента стала визуализация определения местоположения источника шума по трем опорным точкам, представленная на рис. 1.

На плоскости присутствуют три точки с приемниками сигнала с известными заранее координатами. Также присутствует источник сигнала. Для каждой точки вычисляется задержка сигнала (в отсчетах).

Вокруг каждой точки, принимающей сигналы, строится окружность. На пересечении трех окружностей находится источник сигнала.

По оси ОХ и ОУ откладываются координаты приемных устройств, а также определяется источник сигнала. В рамках математической модели все единицы измерения условны.

Оценивалось соответствие индекса максимума ВКФ индексу исходного эталона при различных уровнях шума. При малых и средних значениях шума удерживают стабильное распознавание шумов. При критическом зашумлении

наблюдается «рассыпание» результатов — система начинает ошибочно принимать шум за другие эталоны.

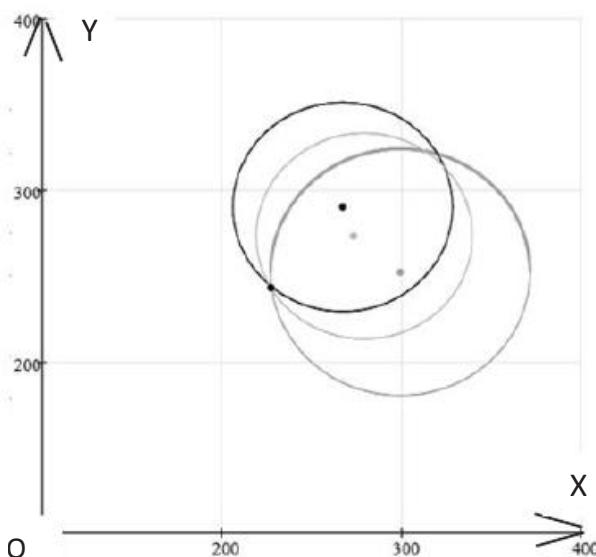


Рис 1. Визуализация определения источника шума по 3 точкам

Медианная фильтрация демонстрирует лучшую устойчивость к выбросам, а адаптивное сглаживание показывает наиболее протяженный участок стабильной идентификации, сохраняя ключевые признаки сигнала при глубоком подавлении шума.

Точность определения задержки напрямую коррелирует с остротой пика ВКФ. Использование гауссова ядра приводит к расширению основного лепестка ВКФ, что несколько снижает точность дальнометрии, но повышает общую устойчивость к ложным срабатываниям. Медианная фильтрация сохраняет крутизну пика, что критически важно для систем с высоким разрешением по времени. Экспоненциальное сглаживание может приводить к систематическому сдвигу оценки задержки из-за фазового запаздывания рекурсивного фильтра.

После обработки результатов, отношение сигнал/шум после обработки четко прослеживается преимущество предварительной фильтрации. Среднее значение выходного ОСШ при использовании экспоненциального и адаптивного сглаживания в среднем на 15...20 % выше, чем при прямой корреляционной обработке зашумленного сигнала без фильтрации. Данные приведены в таблице.

Заключение. В данной работе проведено исследование пяти методов предварительной фильтрации сигналов в составе программного комплекса корреляционной обработки. На основании результатов имитационного моделирования можно сделать следующие выводы/

Применение любого из рассмотренных методов сглаживания перед процедурой вычисления ВКФ повышает устойчивость системы к аддитивному белому гауссову шуму.

Результаты сравнения методов фильтрации

Метод фильтрации	Выходное ОСШ (среднее), %	Точность	Помехоустойчивость
Без фильтрации	Стандарт	Высокая	Низкая
Скользкая средняя	12	Средняя	Низкая
Гауссово ядро	18	Средняя	Средняя
Медианный фильтр	15	Высокая	Высокая
Адаптивный (AS)	22	Высокая	Средняя

Выбор предпочтительного метода определяется следующим образом:

Адаптивное сглаживание наиболее эффективным универсальным алгоритмом. Оно обеспечивает наилучшее подавление шума при минимальных искажениях структуры сигнала.

Медианная фильтрация является незаменимой в условиях наличия импульсных помех. Несмотря на нелинейный характер, она сохраняет крутизну фронтов сигнала, что критически важно для точного определения временной задержки.

Линейные методы демонстрируют хорошие результаты при умеренном уровне шума, однако могут снижать разрешающую способность системы за счет расширения корреляционного пика.

При использовании экспоненциального сглаживания необходимо учитывать возникающий фазовый сдвиг при расчете дистанции или времени прихода сигнала.

Список источников

- [1] Oppenheim A.V., Schaffer R.W. Discrete-Time Signal Processing. Pearson, 2010, 1108 p.
- [2] Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C. Time Series Analysis: Forecasting and Control. Wiley, 2008.
- [3] Friedman J.H. A variable span smoother. Laboratory for Computational Statistics, Department of Statistics, Stanford University: Technical Report, 1984.
- [4] Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Москва, Мир, 1990. 584 с.
- [5] Хуанг Т.С. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений (в части медианной фильтрации). Москва, Радио и связь, 1984, 221 с.