

УДК 621.372; 616.12-073.7

Н. О. ТУЛЯКОВА¹, Р. Ю. ЛОПАТКИН¹, А. Н. ТРОФИМЧУК², А. Е. СТРИЖАК²

¹ *Институт прикладной физики НАНУ, Украина*

² *Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАНУ, Украина*

ПРИМЕНЕНИЕ ЛОКАЛЬНО-АДАПТИВНОЙ МИРИАДНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ОДНОМЕРНОГО СИГНАЛА

Предложены локально-адаптивные алгоритмы мириадной фильтрации с адаптивным изменением параметра линейности мириадного фильтра K в зависимости от локальных оценок масштаба данных и “жестким” переключением параметров размера окна и коэффициента, влияющего на параметр K . Получены статистические оценки качества фильтров по критерию минимума среднеквадратической ошибки для комплексной модели одномерного сигнала, включающей элементарные сигналы различного типа, в условиях аддитивного гауссова шума и возможного наличия выбросов. В результате применения предложенных мириадных локально-адаптивных фильтров показано улучшение интегральных и локальных показателей эффективности в сравнении с высокоэффективными для данного тестового сигнала нелинейными локально-адаптивными алгоритмами. Имея высокую эффективность для всех фрагментов комплексного сигнала, один из предложенных алгоритмов обеспечивает практически оптимальное подавление шума на участках линейного изменения сигнала, другой – более высокое качество обработки скачка. Показано, что для лучшего устранения выбросов целесообразно предварительное применение робастного мириадного фильтра.

Ключевые слова: *мириадная фильтрация, нелинейные локально-адаптивные фильтры, комплексная модель одномерного сигнала, критерий минимума среднеквадратической ошибки, статистические оценки эффективности.*

Введение

Нелинейные устойчивые (робастные) оценки успешно применяются в различных областях цифровой обработки сигналов, в частности в алгоритмах фильтрации помех. В основном это связано с наличием негауссовых помех, выбросов, импульсного шума, описываемого плотностью распределения вероятностей (ПРВ) с “тяжелыми” хвостами, для устранения таких помех нелинейные устойчивые фильтры оптимальны [1 - 4]. Воздействие негауссовых помех обусловило необходимость применения робастных оценок и в задачах полосовой фильтрации, когда в спектре сигнала необходимо выделить или подавить определенную полосу частот, для чего предложены адаптивные взвешенные медианные и мириадные фильтры с отрицательными весами [5 - 8] и робастные формы дискретных ортогональных преобразований [9 - 11]. Адаптивные алгоритмы фильтрации на основе дискретных ортогональных (косинусных и вейвлетных) преобразований также обеспечивают наиболее высокую эффективность подавления гауссова шума, в частности при обработке сигнала электрокардиограммы (ЭКГ) [12 - 14], однако имеют сравнительно высокую вычислительную сложность и не применяются в реальном времени. Кроме того, несмотря на практически оптимальную точность для определенных типов сигнала,

данные адаптивные фильтры не всегда обеспечивают высокое качество обработки при непрогнозируемых изменениях сигнала [14].

На основе оптимального алгоритма Савицкого-Голея [15] разработаны простые и высокоэффективные адаптивные аппроксимирующие фильтры [16 - 21], которые могут применяться в реальном времени [19 - 21]. Данные адаптивные фильтры обеспечивают высокую эффективность подавления гауссова шума в сигнале ЭКГ, однако, как и большинство линейных фильтров, более подходят для обработки сигналов, описываемых аналитическими функциями, и мало пригодны для обработки скачков и других точек разрыва производной [1, 2, 22 - 24].

Мириадная робастная оценка обычно применяется в алгоритмах фильтрации импульсного шума [3 - 5, 7, 25], в частности для устранения электромиографической помехи в ЭКГ [26 - 28]. Однако при настройке параметра линейности мириадного фильтра K можно достичь и высокой степени подавления гауссова шума, поскольку при больших K мириадный фильтр преобразуется в линейный усредняющий. А при малых K мириадный фильтр имеет более нелинейные, чем медианная оценка, свойства и, соответственно, высокую робастность (устойчивость к выбросам) [3, 4, 25, 29]. Алгоритмы фильтрации, характеризующиеся высокой нелинейностью, как правило, имеют высокие динамические

свойства – хорошо сохраняют скачки и другие резкие изменения сигнала [1, 22, 23, 29]. Таким образом, изменяя K , можно гибко настраивать свойства мириадного фильтра от линейных до нелинейных, и в зависимости от сигнала и условий помех можно добиться, как высокой степени подавления шума, так и высоких динамических свойств [5, 26 - 31].

Помимо сигнально-зависимого изменения параметра линейности K , предложено [32, 33] адаптивно изменять размер окна мириадного фильтра и коэффициент, влияющий на параметр K , чем достигается улучшение динамических и статистических свойств алгоритма обработки. Данные локально-адаптивные мириадные фильтры обеспечивают высокое качество подавления шума в сигнале ЭКГ и хорошее сохранение его высокочастотных фрагментов [27, 34 - 37]. За счет распараллеливания вычислений данные фильтры так же, как и другие локально-адаптивные алгоритмы с “жестким” переключением параметров [38 - 41], могут осуществлять обработку сигнала с небольшой задержкой получения выходного сигнала относительно входного, т.е. практически в реальном времени. Благодаря использованию показателей локальной активности, определяющих локальную сигнально-помеховую ситуацию, для адаптивного переключения типа и параметров фильтра [38, 39, 42] можно достичь устойчивого функционирования алгоритма обработки при различном и априорно неизвестном поведении информационной составляющей процесса и нестационарных помехах, что важно для многих практических условий. Принимая во внимание указанные достоинства, возникает задача проанализировать эффективность применения локально-адаптивной мириадной фильтрации для комплексной модели одномерного процесса с различным типом поведения информационной компоненты в условиях воздействия различного уровня аддитивного гауссова шума и возможного наличия выбросов.

1. Локально-адаптивные мириадные фильтры в скользящем окне данных

Мириада выборки значений случайной величины является оптимальной оценкой максимума правдоподобия (М-оценкой) для распределения Коши [3, 4] и определяется по формуле

$$\hat{\beta} \cong \text{myriad}\{x_1, x_2, \dots, x_i, x_N; K\} = \arg \min_{\beta} \sum_{i=1}^N \log [K^2 + (x_i - \beta)^2], \quad (1)$$

где $\hat{\beta}$ - оценка местоположения β функции ПРВ Коши (выходной сигнал мириадного фильтра);

x_i - дискретная последовательность отсчетов входного сигнала в пределах окна данных;

N - размер скользящего окна (объем выборки);

$K > 0$ - параметр масштабирования, называемый параметром линейности мириадного фильтра.

Параметр K влияет на нелинейность мириадного фильтра: малые значения K задают нелинейный режим, при котором мириадный фильтр имеет высокие динамические и робастные свойства (хорошо сохраняет резкие изменения сигнала, устраняет выбросы), а при больших K мириадная фильтрация аналогична усреднению [4, 5, 7, 25, 29, 31].

Предложены [32 - 37] мириадные локально-адаптивные фильтры (ЛАФ), в которых в результате вычисления для каждого i -го положения скользящего окна показателей локальной активности (ПЛА) и сравнения их с порогами осуществляется переключение выходного сигнала одного из адаптивных мириадных фильтров (АМФ), параметры которого более подходят для обработки текущего фрагмента сигнала. Выходной сигнал АМФ описывается как

$$y_i^{\text{АМФ}} = \text{myriad}\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N, K_a\}, \quad (2)$$

где K_a - изменяемый для каждого i -го скользящего окна параметр линейности мириады выборки.

Адаптация параметра линейности в АМФ осуществляется по формулам

$$K_a = bK_i \text{ или } K_a = bK_i^f, \\ K_i = \max_{k \neq j} |x_k - x_j|, \quad (3)$$

где b - постоянный коэффициент;

K_i - локальные оценки масштаба сигнала;

K_i^f - отфильтрованные значения K_i ;

N - размер скользящего окна фильтра.

Параметр K_a (3) является случайной величиной, поэтому перед применением мириадной операции (2), возможно, целесообразна его фильтрация.

Один вариант мириадного ЛАФ [32 - 35] использует ПЛА - Z-параметры [38, 39], позволяющие в зависимости от локального поведения сигнала и уровня шума адаптивно переключать выходные сигналы трех компонентов: применять или фильтр, хорошо сохраняющий резкие изменения сигнала, или фильтр, обеспечивающий высокую степень подавления шума, или компонент с промежуточными свойствами. Выходной сигнал данного фильтра (обозначим его как АМЗ) описывается как

$$y_i^{\text{АМЗ}} = \begin{cases} y_i^{\text{АМФ}(N_3, b_3)}, & \text{if } Z_i^f < Z_1^t, \\ y_i^{\text{АМФ}(N_2, b_2)}, & \text{if } (Z_i^f \geq Z_1^t) \wedge (Z_i^f < Z_2^t); \\ y_i^{\text{АМФ}(N_1, b_1)}, & \text{if } (Z_i^f \geq Z_2^t) \vee (Q_{Z_i}^f > Z_2^t); \end{cases} \quad (4)$$

где $y_i^{\text{АМФ}(N_j, b_j)}$, $j=1 \dots 3$, - выходной сигнал компонентного j -го АМФ (3) с заданными параметрами

размера окна N_j и настроечного коэффициента b_j , $N_3 > N_2 > N_1$, $b_3 > b_2 > b_1$;

Z_i^f , $Q_{Z_i}^f$ - обработанные медианным фильтром значения ПЛА Z_i и квазиранга Q_{Z_i} ;

$Z_1^t \approx 0,2$, $Z_2^t \approx 0,4$ - пороговые значения.

ПЛА в ЛАФ АМЗ вычисляются по формулам

$$Z_i = \sum_{j=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} (y_{i-j}^f - x_{i-j}) / \sum_{j=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} |y_{i-j}^f - x_{i-j}|,$$

$$Q_{Z_i} = Z_i^{(q)} - Z_i^{(p)}, \quad q - p \approx (N-1)/2, \quad (5)$$

где y_{i-j}^f , x_{i-j} - соответствующие отсчеты предварительно отфильтрованного и входного сигналов;

$Z_i^{(q)}$, $Z_i^{(p)}$ - q-я и p-я порядковые статистики упорядоченного ряда ($Z^{(1)} \leq Z^{(2)} \leq \dots \leq Z^{(N)}$);

N - размер скользящего окна предварительного фильтра, в качестве которого обычно используется промежуточный компонент ЛАФ [32 - 42].

Использование трех компонентов в ЛАФ улучшает динамические и статистические свойства алгоритма обработки [33 - 37], однако и требует более сложной реализации в сравнении с двухкомпонентными ЛАФ, что увеличивает задержку обработки при фильтрации в реальном времени.

Другой вариант мириадного ЛАФ [36, 37] осуществляет адаптивный выбор выходного сигнала одного из двух АМФ: в одном случае АМФ с малым размером окна и нелинейными свойствами вследствие задания малого коэффициента b (3), в другом - АМФ с большим размером окна и настройкой режима линейной фильтрации за счет выбора большего коэффициента b . В данном ЛАФ используются ПЛА, подобные пороговому параметру фильтра Хэмпела [42]. Выходной сигнал данного мириадного ЛАФ (обозначим как АМН) описывается как

$$y_i^{\text{АМН}} = \begin{cases} y_i^{\text{АМФ}(N_1, b_1)}, & \text{if } r_i^f \leq th_i^f; \\ y_i^{\text{АМФ}(N_2, b_2)}, & \text{else,} \end{cases} \quad (6)$$

где $y_i^{\text{АМФ}(N_1, b_1)}$, $y_i^{\text{АМФ}(N_2, b_2)}$ - выходные сигналы АМФ (2) с заданными значениями размера окна $N_1 < N_2$ и коэффициента $b_1 < b_2$;

$$r_i^f = \text{mean} \{ r_1, r_2, \dots, r_1, \dots, r_{N_3} \},$$

$$th_i^f = \text{mean} \{ th_1, th_2, \dots, th_i, \dots, th_{N_4} \} - \text{ПЛА } r_i,$$

th_i , сглаженные линейными фильтрами с размерами окон N_3 , N_4 соответственно.

ПЛА в ЛАФ АМН вычисляются по формулам:

$$r_i = |x_i - m_i|, \quad th_i = t S_i^{\text{Mad}}, \quad (7)$$

где x_i , m_i - центральный отсчет и медиана выборки отсчетов сигнала $\{x_j\}_{j=1}^{N_2}$ в окне размером N_2 ;

$S_i^{\text{Mad}} = 1,4826 \text{ median} \{ |x_1 - m_i|, |x_2 - m_i|, \dots, \dots, |x_{N_2} - m_i| \}$ - локальные оценки масштаба данных (Mad - median absolute deviation), где 1,4826 - коэффициент для гауссовой ПРВ; t - фиксированный порог.

2. Алгоритм исследования. Критерий эффективности

Эффективность алгоритмов нелинейной устойчивой фильтрации обычно исследуют с помощью численного моделирования, так как аналитически описать их свойства сложно или невозможно [1, 2]. Алгоритм вычислительного эксперимента заключается в формировании тестового сигнала и помех, выполнении фильтрации, вычислении и запоминании показателей эффективности, повторении данных шагов заданное количество раз и вычислении усредненных показателей качества фильтра [1].

В качестве тестового сигнала выбрана комплексная модель одномерного процесса (рис. 1), позволяющая по локальным показателям качества анализировать эффективность фильтров для определенных типов элементарных сигналов, а по интегральным - судить об эффективности алгоритма в целом. Кроме того, интегральные оценки эффективности характеризуют устойчивость алгоритма обработки к априорной неопределенности модели сигнала, так как комплексная модель содержит практически все виды элементарных сигналов [24, 38].

Моделировались ситуации различного уровня аддитивного шума, описываемого гауссовой ПРВ с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_a^2 , и наличия с заданной вероятностью P_{sp} точечных выбросов амплитудой $A_{sp} \gg 3\sigma_a^2$.

Для оценок эффективности алгоритмов фильтрации использовался критерий минимума среднеквадратической ошибки (СКО), вычисляемый как

$$\chi_{i_1-i_2} = \sum_{j=1}^{N_R} [\sum_{i=i_1:i_2} [y_i^f - s_i]^2 / [i_2 - i_1 + 1]] / N_R, \quad (8)$$

где y_i^f - выходной сигнал фильтра;

s_i - истинное значение сигнала в i -м отсчете;

i_1 , i_2 - индексы отсчетов, задающие интервал оценки эффективности;

N_R - количество реализаций для усреднения.

Для получения устойчивых статистических оценок качества усреднение проводилось для количества реализаций $N_R=200$, а при наличии импульсных помех $N_R=500$.

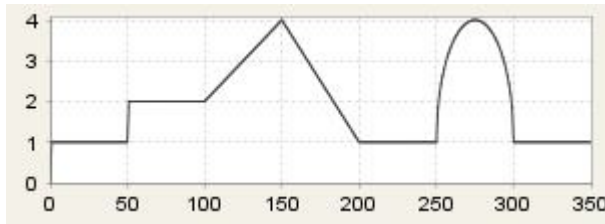


Рис. 1. Тестовый сигнал

3. Исследуемые алгоритмы фильтрации

Проанализируем эффективность мириадных ЛАФ АМЗ (4) и АМН (6). Параметры данных алгоритмов подобраны численным моделированием для заданной комплексной модели сигнала (рис. 1), исходя из критерия минимума интегральных значений СКО при среднем уровне аддитивного гауссова шума ($\sigma_a^2=0,01$). Для ЛАФ АМЗ параметры следующие: $N_1=7$, $b_1=0,3$, $N_2=13$, $b_2=0,5$, $N_3=17$, $b_3=1$. В качестве предварительного фильтра для вычисления Z-параметров (5) использовался АМФ (2) с параметрами $N=15$, $b=1$. Z-параметры обрабатывались медианным фильтром с размером окна $N=5$. Для АМН подобраны следующие параметры: $N_1=7$, $b_1=0,5$, $N_2=17$, $b_2=1$, $t=0,6$; ПЛА r_i , th_i , сглаживались линейными фильтрами с размерами окон $N_3=21$, $N_4=15$. В данном ЛАФ использовалась фильтрация адаптируемого параметра K_a (3) по алгоритму АМФ (2), параметры которого $N=17$, $b=0,5$.

Для сравнения использовались ЛАФ на основе Z-параметров [38 - 41] (обозначим как АЗ), переключающий выходные сигналы медианного и α -урезанных фильтров, и мириадный ЛАФ на основе ПЛА – квазиранга [31] (обозначим как АМQ), в котором адаптивно изменялся параметр линейности мириадного фильтра по формуле $K_a = bQ_i^f$, где b – фиксированный коэффициент, Q_i^f – отфильтрованные значения квазиранга $Q_i = X^{(p)} - X^{(q)}$, вычисляемого для каждого i -го скользящего окна как разность q -й и p -й порядковых статистик упорядоченного ряда отсчетов ($X^{(1)} \leq X^{(2)} \leq \dots \leq X^{(N)}$) в пределах окна размером N , $q - p \approx (N - 1)/2$.

В ЛАФ АЗ [38 - 41] в качестве компонента с высокими динамическими свойствами использовался медианный фильтр с размером окна $N_1=5$, а в качестве промежуточного компонента и компонента, обеспечивающего высокую степень подавления шума, – α -урезанные фильтры с размерами окон $N_2=9$ (параметр урезания $[\alpha N_2=2]$) и $N_3=13$ ($[\alpha N_3=3]$). Как предварительный фильтр для вычисления Z-параметров (5) применялся промежуточный компонент. ЛАФ АЗ имеет более высокое быстродействие, так

как использует простые операции сортировки, определения медианы и другие действия над порядковыми статистиками, к достоинствам данного ЛАФ также относятся высокие динамические свойства при низком уровне шума [33, 38].

Для мириадного ЛАФ АМQ [31] заданы средние значения размера окна $N=9$ и коэффициента $b=0,7$. Для фильтрации квазиранга применялся АМФ (2) с параметрами $N=9$, $b=0,5$. В данном алгоритме не используется жесткое переключение параметров, поэтому его быстродействие в сравнении с ЛАФ АМЗ (4) и АМН (6) выше. Достоинствами ЛАФ АМQ являются высокое качество обработки скачка и способность устранять выбросы [31, 33].

Для вычисления мириады выборки (1) в мириадных ЛАФ АМQ, АМЗ, АМН использовался алгоритм поиска минимума функции стоимости на основе численного метода Ньютона [43]. Данный мириадный фильтр при малых значениях параметра K обеспечивает высокое качество обработки скачка и устранения выбросов [29, 30].

При неблизкой к нулю вероятности импульсных помех целесообразно применение предварительного робастного мириадного фильтра с малым размером окна $N=5$ (обозначим соответствующие ЛАФ АЗ, АМQ, АМЗ, АМН алгоритмы как AZ_{prel} , AMQ_{prel} , AMZ_{prel} , AMN_{prel}). Параметр линейности K предварительного мириадного фильтра подобран численным моделированием для среднего уровня шума ($\sigma_a^2=0,01$) и невысокой вероятности импульсных помех ($P_{sp}=0,01$; $A_{sp}=1$): для ЛАФ AZ_{prel} , AMQ_{prel} параметр $K=0,35$, для ЛАФ AMZ_{prel} $K=0,4$, для ЛАФ AMN_{prel} $K=0,45$.

Заметим, что для других сигналов параметры мириадных ЛАФ могут быть другими [32 - 37].

4. Анализ результатов исследования

Из результатов численного моделирования (табл. 1) следует, что предложенные мириадные ЛАФ АМЗ (4) и АМН (6) имеют лучшие интегральные показатели эффективности для всех моделируемых ситуаций воздействия различного уровня аддитивного гауссова шума и наличия выбросов.

Мириадный ЛАФ АМЗ (4) во всех моделируемых условиях (табл. 1) практически оптимально подавляет шум на линейно изменяющихся участках. При среднем - высоком уровне шума (табл. 1, ситуации 2 - 3) данный ЛАФ также обеспечивает наименьшие интегральные значения СКО.

Мириадный ЛАФ АМН (6) обеспечивает наилучшее качество обработки скачка и подавления шума на “плоском” участке во всех ситуациях различного уровня шума (табл. 1, ситуации 1 - 3).

Таблица 1

Статистические оценки эффективности нелинейных локально-адаптивных фильтров, ppm

Фильтр	χ_t	χ_{10-40}	χ_{40-60}	χ_{90-110}	$\chi_{110-140}$	$\chi_{140-160}$	$\chi_{160-190}$	$\chi_{190-210}$	$\chi_{240-260}$	$\chi_{265-285}$
1) низкий уровень аддитивного гауссова шума: $\sigma_a^2=0,005$; $N_R=200$;										
Исх.	4990	5113	5123	4888	4749	4931	5203	5118	4789	4959
AZ	1093	635	2032	905	658	1370	717	1091	2541	1114
AMQ	1561	757	1167	1085	1167	2164	1363	1271	5056	1179
AMZ	1110	355	2245	894	326	1703	330	1132	3378	1423
AMH	1070	326	1011	883	968	1457	1077	1027	3302	1048
2) средний уровень аддитивного гауссова шума: $\sigma_a^2=0,01$; $N_R=200$;										
Исх.	9980	10226	10245	9776	9497	9861	10406	10236	9578	9917
AZ	2204	1268	5855	1557	1270	2336	1451	1879	4930	1923
AMQ	2541	1515	2440	1877	2008	3036	2460	2230	6794	2119
AMZ	1848	692	3751	1494	631	2378	655	1787	5358	2585
AMH	1857	652	2095	1625	1810	2301	2027	1813	5073	2060
3) высокий уровень аддитивного гауссова шума: $\sigma_a^2=0,03$; $N_R=200$;										
Исх.	29939	30677	30735	29329	28492	29583	31218	30708	28734	29752
AZ	6438	3752	20798	3993	3520	5357	4072	4503	14350	4613
AMQ	6283	4544	9579	4758	4962	6057	6118	5484	12835	5537
AMZ	4647	2018	12969	3087	1837	5215	1973	3735	11990	5633
AMH	5030	1956	8955	4027	4763	6668	5638	4809	11186	5799
4) средний уровень аддитивного шума и импульсных помех: $\sigma_a^2=0,01$; $P_{sp}=0,01$; $A_{sp}=1$; $N_R=500$.										
Исх.	19935	20527	18007	19945	19496	21843	18554	21657	19467	20946
AZ	2798	1481	8082	1895	1606	2954	1785	2272	7110	2051
AZ _{prel}	2220	1411	4375	1620	1468	2198	1522	1780	5446	1772
AMQ	2866	1513	4348	1960	2014	3275	2480	2269	8288	1946
AMQ _{prel}	2476	1103	3604	1589	1777	2773	1948	1757	8384	1570
AMZ	2562	870	8450	2016	894	2767	1115	2633	6952	2288
AMZ _{prel}	2279	938	5075	1578	1120	2459	1239	1762	7155	1786
AMH	2676	898	8799	2190	1833	2860	2036	2276	6807	1881
AMH _{prel}	2218	864	3524	1551	1633	2343	1706	1709	7805	1532
5) высокий уровень аддитивных и импульсных помех: $\sigma_a^2=0,03$; $P_{sp}=0,03$; $A_{sp}=1$; $N_R=500$.										
Исх.	59748	61156	56145	57649	59071	62111	59630	63040	61144	60334
AZ	8997	5544	26075	5985	5549	7487	5982	7052	20529	6333
AZ _{prel}	6831	4883	12472	5190	5015	6438	5061	5606	15000	5261
AMQ	7466	4690	14200	5384	5285	6900	6147	5865	18458	5145
AMQ _{prel}	6483	3713	10247	4819	5316	6470	6052	5386	16729	4581
AMZ	7426	3100	26323	5498	3271	6460	3592	7288	18716	4812
AMZ _{prel}	6013	3126	11922	4395	3415	6080	3699	5114	16083	5192
AMH	7482	3174	22650	6079	5318	7601	6030	7624	16716	4845
AMH _{prel}	6024	2875	10470	4775	5284	6089	5554	5235	16513	4507

При невысоком уровне шума (табл. 1, ситуация 1) ЛАФ АМН имеет наименьшие показатели СКО для всего тестового сигнала и в области особых точек вида скачка и излома, что говорит о высоких динамических свойствах данного алгоритма.

В сравнении с базовым ЛАФ АЗ [38 - 41] по интегральным значениям СКО при среднем – высоком уровне шума мариандный ЛАФ АМЗ улучшает эффективность на $(\chi_t^{AMZ} - \chi_t^{AZ}) / \chi_t^{AZ} = 21 - 28 \%$. Аналогично, мариандный ЛАФ АМН улучшает эффективность ЛАФ АЗ на 16 – 22 %.

По локальным критериям существенно преимущество ЛАФ АМЗ в сравнении с АЗ на линейно изменяющемся участке, примерно на 50%. А ЛАФ АМН в сравнении с АЗ более качественно обрабатывает скачок: СКО при низком уровне шума меньше на 50%, при среднем – на 64%, при высоком – на 57%. На “плоском” участке эффективность АМН выше, чем у АЗ, на 49%.

Визуальный анализ выходных сигналов рассмотренных нелинейных ЛАФ при низком (рис. 2), среднем (рис. 3) и высоком (рис. 4) уровне гауссова шума подтверждает выводы на основе статистических оценок качества: высокую степень подавления

шума на линейно изменяющихся участках сигнала мириадным ЛАФ АМЗ (4), и наилучшее качество обработки скачка мириадным ЛАФ АМН (6).

При наличии выбросов (табл. 1, ситуации 4 - 5) интегральные показатели эффективности предложенных мириадных ЛАФ АМЗ (4) и АМН (6) также выше в сравнении с ЛАФ АЗ [38 - 41] и АМЗ [31].

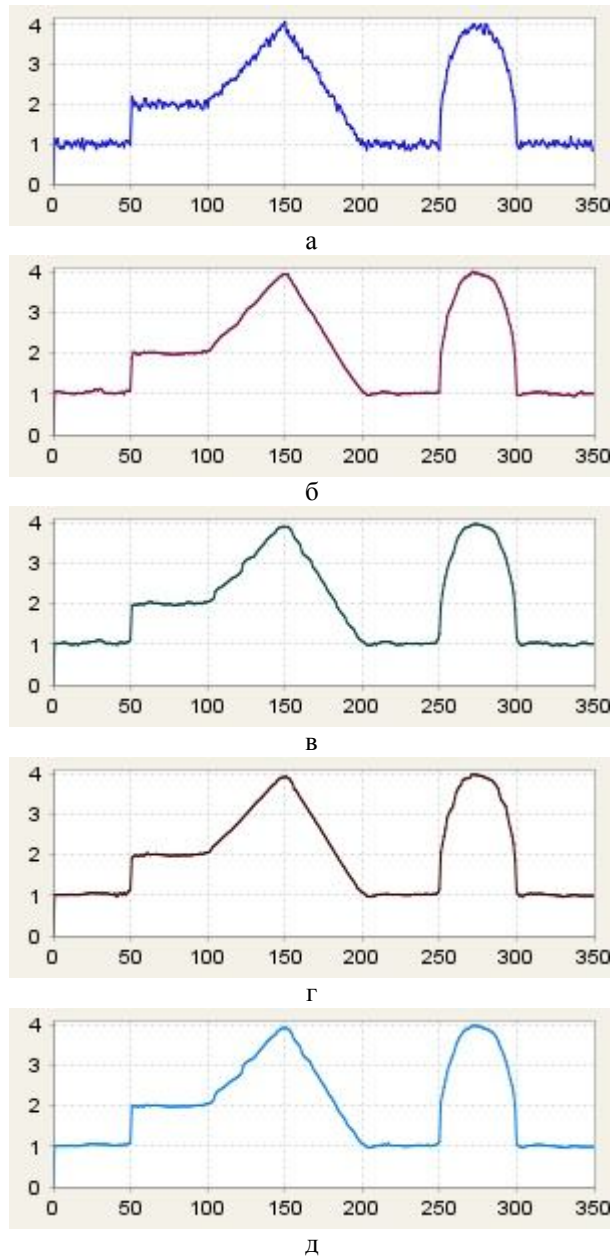


Рис. 2. Применение нелинейной локально-адаптивной фильтрации для тестового сигнала при низком уровне гауссова шума ($\sigma_a^2=0,005$):
 а – исходный сигнал;
 б – сигнал на выходе ЛАФ АЗ;
 в – сигнал на выходе мириадного ЛАФ АМ;
 г – сигнал на выходе ЛАФ АМЗ;
 д – сигнал на выходе ЛАФ АМН.

Применение предварительной обработки сигнала мириадным фильтром (1) на основе численного метода Ньютона [43] с малым размером окна и подобранным для каждого адаптивного алгоритма значением параметра К заметно улучшает робастность соответствующих ЛАФ AZ_{prel} , AMQ_{prel} , AMZ_{prel} , AMN_{prel} (табл. 1, ситуации 4 - 5).

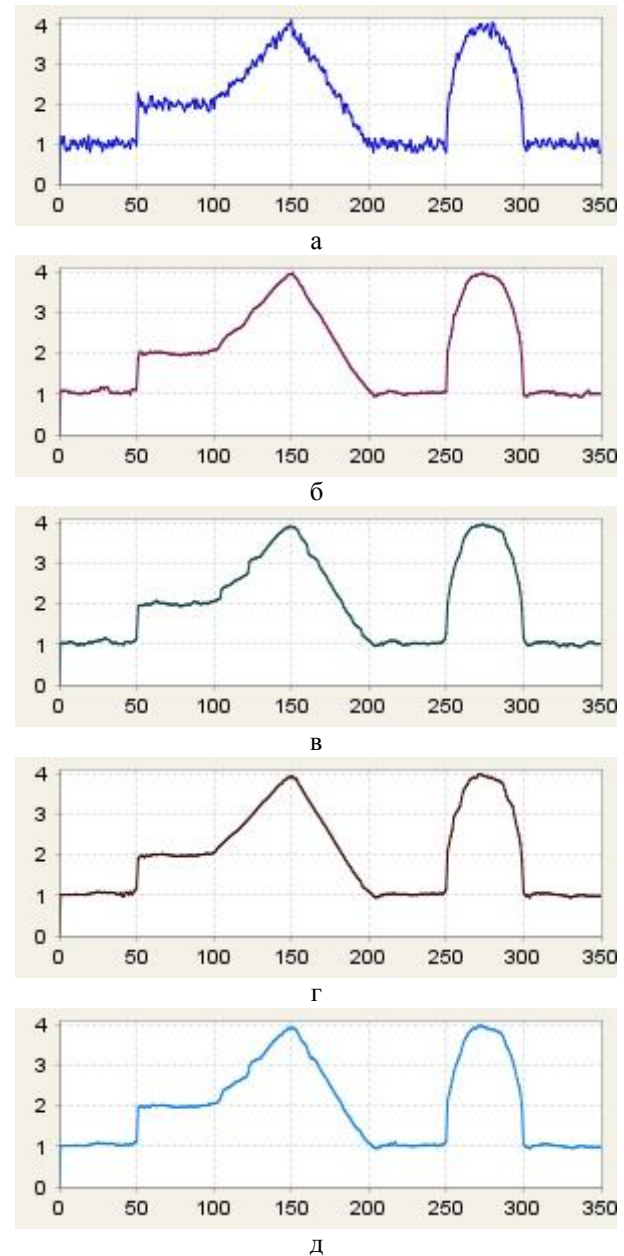


Рис. 3. Применение нелинейной локально-адаптивной фильтрации для тестового сигнала при среднем уровне гауссова шума ($\sigma_a^2=0,01$):
 а – исходный сигнал;
 б – сигнал на выходе ЛАФ АЗ;
 в – сигнал на выходе мириадного ЛАФ АМ;
 г – сигнал на выходе ЛАФ АМЗ;
 д – сигнал на выходе ЛАФ АМН.

Как видим (рис. 5), нелинейными ЛАФ AZ_{prel} , AMQ_{prel} , AMZ_{prel} , AMH_{prel} устраняются выбросы практически без искажений сигнала.

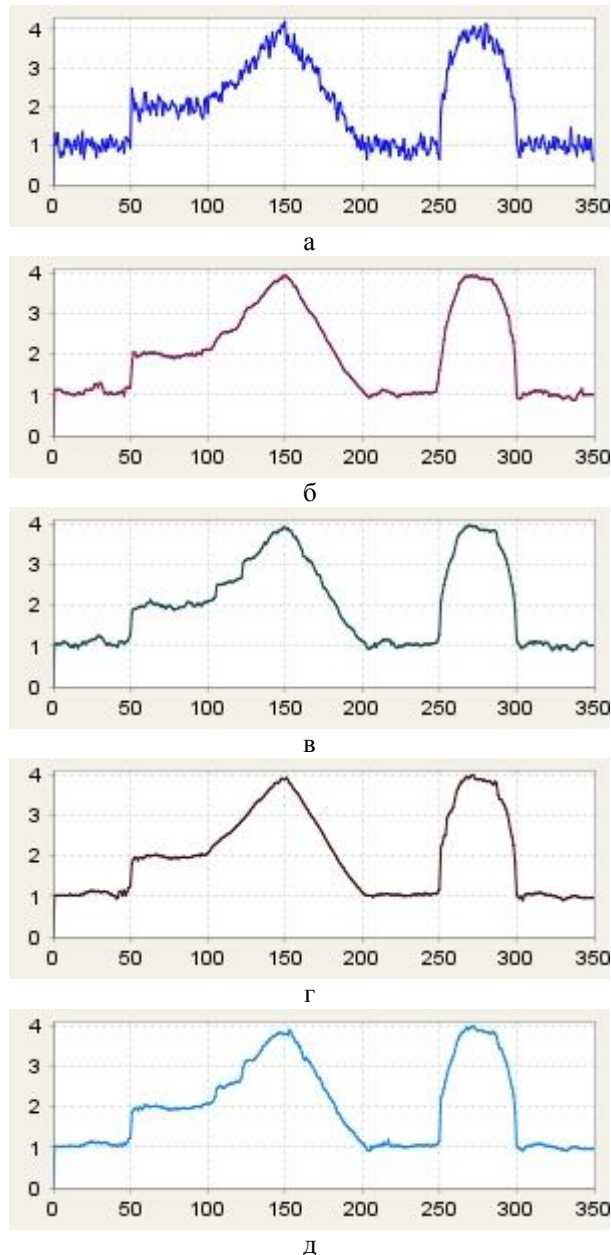


Рис. 4. Применение нелинейной локально-адаптивной фильтрации для тестового сигнала при высоком уровне гауссова шума ($\sigma_a^2=0,03$):

- а – исходный сигнал;
- б – сигнал на выходе ЛАФ AZ ;
- в – сигнал на выходе ЛАФ AM ;
- г – сигнал на выходе ЛАФ AMZ ;
- д – сигнал на выходе ЛАФ AMH .

Алгоритм вычисления мириады сложнее, чем операции над порядковыми статистиками, однако при небольших окнах разница в быстродействии не существенна. Поэтому можно считать предложенные мириадные ЛАФ более эффективными.

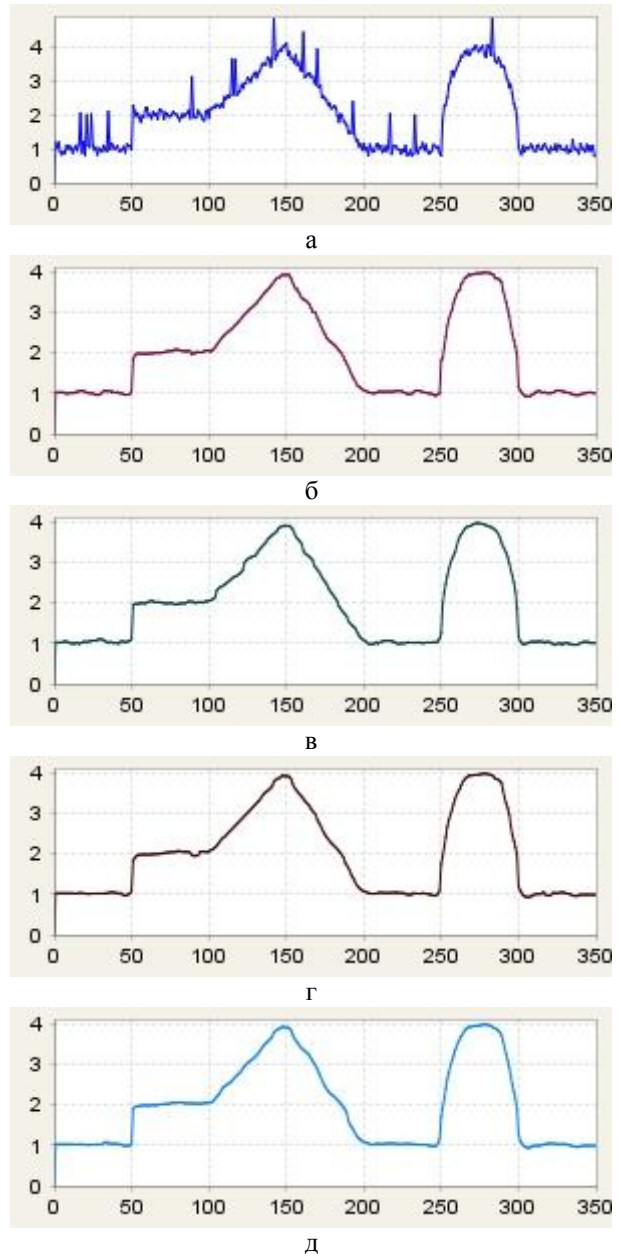


Рис. 5. Применение нелинейной локально-адаптивной фильтрации для тестового сигнала при среднем уровне гауссова шума ($\sigma_a^2=0,01$) и высокой вероятности выбросов ($P_{\text{sp}}=0,05$; $A_{\text{sp}}=1$):

- а – исходный сигнал;
- б – сигнал на выходе ЛАФ AZ_{prel} ;
- в – сигнал на выходе ЛАФ AM_{prel} ;
- г – сигнал на выходе ЛАФ AMZ_{prel} ;
- д – сигнал на выходе ЛАФ AMH_{prel} .

Выводы

На основе статистических оценок эффективности по критерию СКО для комплексной модели одномерного сигнала, содержащей различные типы элементарных сигналов, показано повышение качества фильтрации в результате применения предложенных мириадных ЛАФ AMZ (4), AMH (6) при

различном уровне гауссова шума и при наличии выбросов. Улучшены интегральные и локальные показатели эффективности в сравнении с базовым ЛАФ [38 - 41], характеризующимся высоким качеством обработки для выбранной модели сигнала.

Для трехкомпонентного мириадного ЛАФ AMZ (4) особенно наглядно преимущество по эффективности сглаживания шума на линейно изменяющихся участках сигнала. Данный ЛАФ за счет адаптации параметра линейности K преодолевает недостаток мириадного фильтра, который заключается в низкой эффективности подавления помех для данного типа сигналов [29 - 31], и обеспечивает практически оптимальную степень подавления гауссова шума на линейно изменяющемся участке. AMZ характеризуется высоким качеством обработки элементарных сигналов вида излома, пика, скачка, параболы, в целом обеспечивая наилучшие интегральные показатели эффективности для комплексного сигнала при среднем - высоком уровне шума.

Мириадный ЛАФ AMH (6) характеризуется высокими динамическими свойствами при невысоком уровне шума, для всех моделированных условий помех обеспечивает наилучшее качество фильтрации скачка и сигнала постоянного уровня.

При неблизкой к нулю вероятности выбросов для лучшего их устранения целесообразно применение предварительного мириадного фильтра.

Литература

1. Astola, J. *Fundamentals of Nonlinear Digital Filtering [Text]* / J. Astola, P. Kuosmanen. – USA: CRC Press LLC, 1997. – 276 p.
2. Pitas, I. *Nonlinear Digital Filters: Principles and Application [Text]* / I. Pitas, A. N. Venetsanopoulos. – USA: Kluwer Academic Publisher, 1990. – 324 p.
3. Gonzalez, J.G. *Zero-Order Statistics: A Mathematical Framework for the Processing and Characterization of Very Impulsive Signals [Text]* / J.G. Gonzalez, J.L. Paredes, G.R. Arce // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2006. – Vol.54, No.10. – P.3839-3851. doi: 10.1109/TSP.2006.880306.
4. Carrillo, R.E. *A Generalized Cauchy Distribution Framework for Problems Requiring Robust Behavior [Text]* / R.E. Carrillo, T.C. Aysal, K.E. Barner // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. – 2010. – Vol.2010. – 19 p. doi: 10.1155/2010/312989.
5. Kalluri, S. *Adaptive weighted myriad filter algorithms for robust signal processing in α -stable noise environments [Text]* / S. Kalluri, G.R. Arce // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 1998. – Vol.46, No.2. – P.322-334. doi: 10.1109/78.655418.
6. Shmulevich, I. *Spectral design of weighted median filters admitting negative weight [Text]* / I. Shmulevich, G.R. Arce // *IEEE Signal Processing Letters*. – 2001. – Vol.8, No.12. – P.313-316.
7. Gonzalez, J.G. *Statistically-Efficient Filtering in Impulsive Environments: Weighted Myriad Filters [Text]* / J.G. Gonzalez, G.R. Arce // *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*. – 2002. – Vol.1, No.1. – P.4-20. doi: 10.1155/S1110865702000483.
8. Arce, G.R. *Nonlinear Signal Processing: A Statistical Approach [Text]* / G.R. Arce. – Wiley-Interscience Publ., 2005.
9. Djurović, I. *Robust L-estimation based forms of signal transforms and timefrequency representations [Text]* / I. Djurović, L. Stanković, J.F. Böhme // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2003. – Vol.51, No.7. – P.1753-1761. doi: 10.1109/TSP.2003.812739.
10. Djurović, I. *Myriad filter based form of the DFT [Text]* / I. Djurović, L. Stanković, J.F. Böhme // *EUSIPCO '02: Proc. of the 11th European Signal Processing Conference, 3-6 Sept. 2002. – Toulouse (France), 2002. – P.433-436.*
11. Roenko, A.A. *An Overview of the Adaptive Robust DFT [Text]* / A.A. Roenko, V.V. Lukin, I. Djurović // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. – 2010. – 17 p. doi: 10.1155/2010/595071
12. *Wavelet domain Wiener filtering for ECG denoising using improved signal estimate [Text]* / N. Nikolaev, Z. Nikolov, A. Gotchev, K. Egiazarian // *ICASSP'00: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 5-9 June 2000. – Istanbul (Turkey), 2000. – Vol.6. – P.3578-3581. doi: 10.1109/ICASSP.2000.860175.*
13. Gotchev, A. *Denoising of electrocardiogram from electromyogram artifacts by combined transform-domain and dynamic approximation method [Text]* / A. Gotchev, I. Christov, K. Egiazarian // *ICASSP'2002: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 13-17 May 2002. – Orlando (USA), 2002. – P.3872-3875. doi: 10.1109/ICASSP.2002.5745502*
14. Gotchev, A. *Spline and Wavelet Based Techniques for Signal and Image Processing [Text]: Thesis for the degree of Doctor of Technology: 5th September / Atanas Gotchev; Tampere University of Technology (Finland). – 2003. – 171 p.*
15. Savitzky, A. *Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures [Text]* / A. Savitzky, M. Golay // *Analytical Chemistry*. – 1964. – Vol.36. – P.1627-1639. doi: 10.1021/ac60214a047.
16. Christov, I. *Filtering of electrocardiogram artifacts from the electrocardiogram [Text]* / I. Christov, I. Daskalov // *Medical Engineering & Physics*. – 1999. – Vol.21. – P.731-736.
17. Bortolan, G. *Dynamic Filtration of High-Frequency Noise in ECG Signal [Text]* / G. Bortolan, I. Christov // *Computing in Cardiology, 7-10 Sept. 2014. – Cambridge (USA), 2014. – Vol.41. – P.1089-1092.*
18. *Noise processing in exercise ECG stress test for the analysis and the clinical characterization of QRS and T wave alternans [Text]* / G. Bortolan, I. Christov, I. Simova, I. Dotsinsky // *Biomedical Signal Processing and Control*. – 2015. – Vol.18. – P.378-385.
19. Christov, I. *Fine tuning of the dynamic low-pass filter for electromyographic noise suppression in*

- electrocardiograms [Text] / I. Christov, T. Neycheva, R. Schmid // *Computing in Cardiology*, 24-27 Sept. 2017. – Rennes (France), 2017. – Vol.43.
20. Dotsinsky, I. Simple Approach for Tremor Suppression in Electrocardiograms [Text] / I. Dotsinsky, G. Mihov // *International Journal Bioautomation*. – 2010. – Vol.14, No.2. – P.129-138.
21. Pseudo real-time low-pass filter in ECG, self-adjustable to the frequency spectra of the waves [Text] / I. Christov, T. Neycheva, R. Schmid, T. Stoyanov, R. Abächerli // *Medical & Biological Engineering & Computing*. – 2017. – Vol. 55, No. 9, P.1579-1588.
22. Lukin, V.V. Dynamic characteristics of some nonlinear 1-D filters [Text] / V.V. Lukin, S.K. Abramov, N.O. Tulyakova // *FINSIG '99: Proc. of the Finnish Signal Processing Symposium*, 31 May 1999. – Oulu (Finland), 1999. – P.184-188.
23. Лукин, В.В. Динамические и статистические свойства алгоритмов нелинейной фильтрации одномерных информационных сигналов [Текст] / В.В. Лукин // *Авиационная и ракетно-космическая техника и технология: сб. науч. тр.* – X., 1998. – Вып.7. – С.134-141.
24. Лукин, В.В. Анализ свойств алгоритмов нелинейной фильтрации одномерных информационных сигналов [Текст] / В.В. Лукин, Н.О. Тулякова, М.О. Дорожук // *Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр.* – X., 1999. – Вып.12. – С.109-113.
25. Gonzalez, J.G. Optimality of the myriad filter in practical impulsive-noise environments [Text] / J.G. Gonzalez, G.R. Arce // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2001. – Vol.49, No.2. – P.438-441. doi: 10.1109/78.902126.
26. Pander, T. An application of weighted myriad filter to suppression an impulsive type of noise in biomedical signals [Text] / T. Pander // *TASK Quarterly*. – 2004. – Vol.2, No.8. – P.199-216.
27. Pander, T. Impulsive Noise Filtering In Biomedical Signals With Application of New Myriad Filter [Text] / T. Pander // *Biosignal' 2010: Proc. of the Int. Conf.* – 2010. – Vol.20. – P.94-101.
28. Тулякова, Н.О. Адаптивные алгоритмы устранения электромиографического шума в сигнале электрокардиограммы [Текст] / Н.О. Тулякова, А.Н. Трофимчук, А.Е. Стрижак // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – X., 2017. – Вып.188. – С.70-78.
29. Abramov, S. Myriad Filter Properties and Parameter Selection [Text] / S. Abramov, V. Lukin, J. Astola // *UkrOBRAZ'2000: Proc. of the Fifth All-Ukrainian Int. Conf.*, 27 Nov. - 1 Dec. 2000. – Kiev (Ukraine), 2000. – P.59-62.
30. Тулякова, Н.О. Алгоритмы мириадной фильтрации [Текст] / Н.О. Тулякова, А.Н. Трофимчук, А.Е. Стрижак // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. – 2014. – №4 (68). – С.76-83.
31. Abramov, S.K. Adaptive myriad filter [Электронный ресурс] / S.K. Abramov, V.V. Lukin, J. Astola // *CD-ROM Proc. of NSIP'2001*. – Baltimore (USA), 2001. – 5 p.
32. Тулякова, Н.О. Локально-адаптивные мириадные фильтры [Текст] / Н.О. Тулякова // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – X., 2014. – Вып.179. – С.50-59.
33. Сравнительный анализ локально-адаптивных нелинейных фильтров для комплексной модели одномерного сигнала [Текст] / Н.О. Тулякова, А.Н. Трофимчук, Н.Н. Будник, А.Е. Стрижак // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. – 2015. – №2 (72). – С.97-111.
34. Тулякова, Н.О. Локально-адаптивная мириадная фильтрация сигнала электрокардиограммы [Текст] / Н.О. Тулякова // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – X., 2015. – Вып.180. – С.152-162.
35. Тулякова, Н.О. Алгоритмы фильтрации электрокардиограммы с динамически изменяемым размером окна [Текст] / Н.О. Тулякова, А.Н. Трофимчук, А.Е. Стрижак // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. – 2016. – №2 (76). – С.4-14.
36. Тулякова, Н.О. Адаптивные мириадные фильтры для обработки сигналов электрокардиограммы, регистрируемых с высокой частотой дискретизации [Текст] / Н.О. Тулякова, А.Н. Трофимчук, А.Е. Стрижак // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. – 2016. – №4 (78). – С.97-107.
37. Tulyakova, N. Locally-Adaptive Myriad Filters for Processing ECG Signals in Real Time [Text] / N. Tulyakova // *International Journal Bioautomation*. – 2017. – Vol.21, No.1. – P.5-18.
38. Лукин, В.В. Анализ поведения показателей локальной активности для нелинейных адаптивных фильтров [Текст] / В.В. Лукин // *Радиофизика и электроника: сб. научн. тр. НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова*. – X., 1998. – Вып.3., №2. – С.80-89.
39. Local Activity Indicators: Analysis and Application to Hard-Switching Adaptive Filtering of Images [Text] / V.P.Melnik, V.V.Lukin, A.A.Zelensky, J.T.Astola, P. Kuosmanen // *Optical Engineering Journal*. – 2001. – Vol.40, No.8. – P.1441-1455. doi:10.1117/1.1385815.
40. Locally-adaptive processing of 1-D signals using Z-parameters and filter banks [Text] / V. Lukin, A. Zelensky, N. Tulyakova, V. Melnik, S. Peltonen, P. Kuosmanen // *NORSIG'2000: Proc. of the Nordic Signal Processing Symposium*, 13-15 June 2000. – Kolmarden (Sweden), 2000. – P.195-197.
41. Adaptive method for 1-D signal processing based on nonlinear filter bank and Z-parameter [Text] / V.V. Lukin, A.A. Zelensky, N.O. Tulyakova, V.P. Melnik // *NSIP'99: Proc. of the IEEE/EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*, 20-23 June 1999. – Antalya (Turkey), 1999. – Vol.1, P.287-291.
42. Pearson, R.K. The Class of Generalized Hampel Filters [Text] / R. K. Pearson, Y. Neuvo, J. Astola // *EUSIPCO: Proc. of the 23rd European Signal Pro-*

cessing Conf., 21 Aug.-4 Sept. 2015. – Nice (France), 2015. – P. 2546-2550.

doi:10.1109/EUSIPCO.2015.7362835

43. Абрамов, С.К. Алгоритм реализации мирной фильтрации [Текст] / С.К. Абрамов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2000. – Вып.21. – С.143-147.

References

1. Astola, J., Kuosmanen, P. *Fundamentals of Nonlinear Digital Filtering*. New York, CRC Press, 1997. 276 p.

2. Pitas, I., Venetsanopoulos, A.N. *Nonlinear Digital Filters: Principles and Application*. USA: Kluwer Academic Publisher, 1990. 324 p.

3. Gonzalez, J.G., Paredes, J.L., Arce, G.R. Zero-Order Statistics: A Mathematical Framework for the Processing and Characterization of Very Impulsive Signals. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, vol.54, no.10, pp.3839-3851. doi: 10.1109/TSP.2006.880306.

4. Carrillo, R.E., Aysal, T.C., Barner K.E. A Generalized Cauchy Distribution Framework for Problems Requiring Robust Behavior. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, vol.2010, 19 p. doi: 10.1155/2010/312989.

5. Kalluri, S., Arce, G.R. Adaptive weighted myriad filter algorithms for robust signal processing in α -stable noise environments. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, vol.46, no.2, pp.322-334. doi: 10.1109/78.655418

6. Shmulevich, I., Arce, G.R. Spectral design of weighted median filters admitting negative weight. *IEEE Signal Processing Letters*, 2001, vol.8, no.12, pp.313-316.

7. Gonzalez, J.G., Arce, G.R. Statistically-Efficient Filtering in Impulsive Environments: Weighted Myriad Filters. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2002, vol.1, no.1, pp.4-20. doi: 10.1155/S1110865702000483.

8. Arce, G.R. *Nonlinear Signal Processing: A Statistical Approach*. Wiley-Interscience Publ., 2005.

9. Djurović, I., Stanković, L., Böhme, J.F. Robust L-estimation based forms of signal transforms and time-frequency representations. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, vol.51, no.7, pp.1753-1761. doi: 10.1109/TSP.2003.812739.

10. Djurović, I., Stanković L., Böhme J.F. Myriad filter based form of the DFT. *EUSIPCO '02: Proc. of the 11th European Signal Processing Conference*. 3-6 Sept. 2002, Toulouse (France), 2002, pp.433-436.

11. Roenko, A.A., Lukin V.V., Djurović, I. An Overview of the Adaptive Robust DFT. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, 17 p. doi: 10.1155/2010/595071.

12. Nikolaev, N., Nikolov, Z., Gotchev, A., Egiazarian, K. Wavelet domain Wiener filtering for ECG denoising using improved signal estimate. *ICASSP'00: Proceedings of the IEEE International*

Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 5-9 June 2000, Istanbul (Turkey), 2000, vol.6, pp.3578-3581. doi: 10.1109/ICASSP.2000.860175

13. Gotchev, A., Christov, I., Egiazarian, K. Denoising of electrocardiogram from electromyogram artifacts by combined transform-domain and dynamic approximation method. *ICASSP'2002: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 13-17 May 2002, Orlando (USA), 2002, pp.3872-3875. doi: 10.1109/ICASSP.2002.5745502

14. Gotchev, A. *Spline and Wavelet Based Techniques for Signal and Image Processing*. Thesis for the degree of Doctor of Technology, 5th September, Tampere (Finland), Tampere University of Technology Publ., 2003, 171 p.

15. Savitzky, A., Golay, M. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 1964, vol.36, pp.1627-1639. doi: 10.1021/ac60214a047.

16. Christov, I., Daskalov I. Filtering of electrocardiogram artifacts from the electrocardiogram. *Medical Engineering & Physics*, 1999, vol.21, pp.731-736.

17. Bortolan, G., Christov, I. Dynamic Filtration of High-Frequency Noise in ECG Signal. *Computing in Cardiology*, 7-10 Sept. 2014, Cambridge (USA), 2014, vol.41, pp.1089-1092.

18. Bortolan, G., Christov, I., Simova, I., Dotsinsky, I. Noise processing in exercise ECG stress test for the analysis and the clinical characterization of QRS and T wave alternans. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2015, vol.18, pp.378-385.

19. Christov, I., Neycheva, T., Schmid, R. Fine tuning of the dynamic low-pass filter for electromyographic noise suppression in electrocardiograms. *Computing in Cardiology*, 24-27 Sept. 2017, Rennes (France), 2017, vol.43.

20. Dotsinsky, I., Mihov, G. Simple Approach for Tremor Suppression in Electrocardiograms. *International Journal Bioautomation*, 2010, vol.14, no.2, pp.129-138.

21. Christov, I., Neycheva, T., Schmid, R., Stoyanov, T., Abächerli, R. Pseudo real-time low-pass filter in ECG, self-adjustable to the frequency spectra of the waves. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 2017, vol. 55, no. 9, pp.1579-1588.

22. Lukin, V.V., Abramov, S.K., Tulyakova, N.O. Dynamic characteristics of some nonlinear 1-D filters. *FINSIG '99: Proceedings of the Finnish Signal Processing Symposium*, 31 May 1999, Oulu (Finland), 1999, pp.184-188.

23. Lukin, V.V. Dinamicheskie i statisticheskie svoystva algoritmov nelineinoi fil'tratsii odnomernykh informatsionnykh signalov [Dynamic and statistical properties of algorithms of nonlinear filtering of one-dimensional information signals]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology*, 1998, vol.7, pp.134 -141.

24. Lukin, V.V., Tulyakova, N.O., Doroshchuk, M.O. Analiz svoystv algoritmov nelineinoi fil'tratsii odnomernykh informatsionnykh signalov [Property analy-

sis of algorithms of nonlinear filtering of one-dimensional information signals]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology*, 1999, vol.12, pp.109-113.

25. Gonzalez, J.G., Arce, G.R., Optimality of the myriad filter in practical impulsive-noise environments. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, vol.49, no.2, pp.438-441. doi: 10.1109/78.902126.

26. Pander, T. An application of weighted myriad filter to suppression an impulsive type of noise in biomedical signals. *TASK Quarterly*, 2004, vol.2, no.8, pp.199-216.

27. Pander, T. Impulsive Noise Filtering In Biomedical Signals With Application of New Myriad Filter. *Biosignal' 2010: Proc. of the Int. Conf.*, 2010, vol.20, pp.94-101.

28. Tulyakova, N.O., Trofimchuk, A.N., Strizhak, A.E. Adaptivnye algoritmy ustraneniya elektromiograficheskogo shuma v signale elektrokardiogrammy [Adaptive algorithms for elimination of electromyographic noise in the signal of the electrocardiogram]. *Radiotekhnika: All-Ukr. Sci. Interdep. Mag.*, Kharkiv, 2017, no.188, pp.70-78.

29. Abramov, S., Lukin, V., Astola, J. Myriad Filter Properties and Parameter. *UkrOBRAZ'2000: Proc. of the Fifth All-Ukrainian Int. Conf.*, 27 Nov. - 1 Dec. 2000, Kiev (Ukraine), 2000, pp.59-62.

30. Tulyakova, N.O., Trofimchuk, A.N., Strizhak, A.E. Algoritmy miriadnoy fil'tratsii [Algorithms of myriad filtering]. *Radio-elektronnye i komp'yuternye sistemy – Radioelectronic and computer systems*, 2014, no.4 (68), pp.76-83.

31. Abramov, S.K., Lukin, V.V., Astola, J. Adaptive myriad filter. *CD-ROM Proc. of NSIP'2001*, Baltimore (USA), 2001, 5 p.

32. Tulyakova, N.O. Lokal'no-adaptivnye miriadnye fil'try [Locally-adaptive myriad filters]. *Radiotekhnika: All-Ukr. Sci. Interdep. Mag.*, Kharkiv, 2014, no.179, pp.50-59.

33. Tulyakova, N.O., Trofimchuk, A.N., Budnik, N.N., Strizhak, A.E., Sravnitel'nyi analiz lokal'no-adaptivnykh nelineynykh fil'trov dlya kompleksnoi modeli odnomernogo signala [Comparative analysis of locally-adaptive nonlinear filters for complex model of one-dimensional signal]. *Radio-elektronnye i komp'yuternye sistemy – Radioelectronic and computer systems*, 2015, no.2 (72), pp.97-111.

34. Tulyakova, N.O. Lokal'no-adaptivnaya miriadnaya fil'tratsiya signala elektrokardiogrammy [Locally-adaptive myriad filtering of electrocardiogram sig-

nal]. *Radiotekhnika: All-Ukr. Sci. Interdep. Mag.*, Kharkiv, 2015, no.180, pp.152-162.

35. Tulyakova, N.O., Trofimchuk, A.N., Strizhak, A.E. Algoritmy fil'tratsii elektrokardiogrammy s dinamicheski izmenyaemym razmerom okna [Algorithms of ECG filtering with dynamically variable window size]. *Radio-elektronnye i komp'yuternye sistemy – Radioelectronic and computer systems*, 2016, no.2 (76), pp.4-14.

36. Tulyakova, N.O., Trofimchuk, A.N., Strizhak, A.E. Adaptivnye miriadnye fil'try dlya obrabotki signalov elektrokardiogrammy, registriruemyykh s vysokoi chastotoi dis-kretizatsii [Adaptive myriad filters for processing signals of electrocardiogram registered with high sampling frequency]. *Radio-elektronnye i komp'yuternye sistemy – Radioelectronic and computer systems*, 2016, no.4 (78), pp.97-107.

37. Tulyakova, N. Locally-Adaptive Myriad Filters for Processing ECG Signals in Real Time. *International Journal Bioautomation*, 2017, vol.21, no.1, pp.5-18.

38. Lukin, V.V. Analiz povedeniya pokazatelei lokal'noi aktivnosti dlya nelineynykh adaptivnykh fil'trov [Analysis of local activity indicator behaviour for nonlinear adaptive filters]. *Radiofizika i elektronika: sb. nauchn. tr. NAN Ukrainy. In-t radiofiziki i elektroniki im. A.Ya. Usikova*, 1998, vol.3, no.2, pp.80-89.

39. Melnik, V.P., Lukin, V.V., Zelensky, A.A., Astola, J.T., Kuosmanen, P. Local Activity Indicators: Analysis and Application to Hard-Switching Adaptive Filtering of Images. *Optical Engineering Journal*, 2001, vol.40, no.8, pp.1441-1455. doi: 10.1117/1.1385815.

40. Lukin, V., Zelensky, A., Tulyakova, N., Melnik, V., Peltonen, S., Kuosmanen, P. Locally-adaptive processing of 1-D signals using Z-parameters and filter banks. *NORSIG'2000: Proc. of the Nordic Signal Processing Symposium*, 13-15 June 2000, Kolmarden (Sweden), 2000, pp.195-197.

41. Lukin, V.V., Zelensky, A.A., Tulyakova, N.O., Melnik, V.P. Adaptive method for 1-D signal processing based on nonlinear filter bank and Z-parameter. *NSIP'99: Proc. of the IEEE/EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*, 20-23 June 1999, Antalya (Turkey), 1999, vol.1, pp.287-291.

42. Pearson, R. K., Neuvo, Y., Astola, J. The Class of Generalized Hampel Filters. *EUSIPCO: Proc. of the 23rd European Signal Processing Conference*, 21 Aug.-4 Sept. 2015, Nice (France), 2015, pp.2546-2550. doi: 10.1109/EUSIPCO.2015.7362835.

43. Abramov, S.K. Algoritm realizatsii miriadnoi fil'tratsii [Myriad filtering realization algorithm]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya– Aerospace technic and technology*, 2000, vol.21, pp.143-147.

Поступила в редакцію 7.09.2017, рассмотрена на редколлегии 14.09.2017

ЗАСТОСУВАННЯ ЛОКАЛЬНО-АДАПТИВНОЇ МІРІАДНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ МОДЕЛІ ОДНОМІРНОГО СИГНАЛУ

Н. О. Тулякова, Р. Ю. Лопаткін, О. М. Трофимчук, О. Є. Стрижак

Запропоновано локально-адаптивні алгоритми міріадної фільтрації з адаптивним змінням параметру лінійності міріадного фільтра К залежно від локальних оцінок масштабу даних і “жорстким” перемиканням

параметрів розміру вікна та коефіцієнту, що впливає на параметр K . Отримано статистичні оцінки якості фільтрів за критерієм мінімуму середньоквадратичної помилки для комплексної моделі одномірного сигналу, що містить елементарні сигнали різного типу, в умовах адитивного гаусова шуму та можливої наявності викидів. У результаті застосування запропонованих міриадних локально-адаптивних фільтрів показано покращення інтегральних і локальних показників ефективності в порівнянні з високоефективними для даного тестового сигналу нелінійними локально-адаптивними алгоритмами. Маючи високу ефективність для всіх фрагментів комплексного сигналу, один із запропонованих алгоритмів забезпечує практично оптимальне придушення шуму на ділянках лінійної зміни сигналу, інший – більш високу якість обробки стрибка. Показано, що для кращого усунення викидів доцільно попереднє застосування робастного міриадного фільтру.

Ключові слова: міриадна фільтрація, нелінійні локально-адаптивні фільтри, комплексна модель одномірного сигналу, критерій мінімуму середньоквадратичної помилки, статистичні оцінки ефективності.

APPLICATION OF LOCAL-ADAPTIVE MIRIAD FILTRATION FOR THE COMPLEX MODEL OF ONE-DIMENSIONAL SIGNAL

N. O. Tulyakova, R. Yu. Lopatkin, O. M. Trofymchuk, O. Ye. Stryzhak

Local adaptive algorithms of myriad filtering with adaptation of a sample myriad linearity parameter K depending upon local estimates of signal scale and "hard" switching of parameters of sliding window lengths and coefficients that influence on parameter K are proposed. Statistical estimates of filters quality are obtained using criterion of minimum mean-square error for a complex model of one-dimensional signal that includes elementary signals such as a constant signal, step edge, piecewise linear fragments, linearly increasing and decreasing signals, a peak-like maximum, a piecewise function that consists of constant signal and polynomial curve, a parabolic maximum under conditions of additive Gaussian noise with zero mean and different variances and possible spikes presence. It is shown that the proposed myriad locally-adaptive filters can preserve fragments of rapid changing of signal as step edge and other discontinues due to high dynamic properties in nonlinear mode of myriad filtering and small length of the sliding window and can effectively suppress noise while processing fragments of linear signal behavior and polynomial curves by adjusting the parameter K to a linear mode and increasing the window length. Having high efficiency for all fragments of the complex signal, one of the proposed algorithms provides practically optimal noise suppression at the fragment of linear change of the signal, the other one provides higher quality of step-like and constant signals processing. As a result of application of the proposed myriad locally-adaptive filters, improvement of integral and local performance indicators is shown in comparison to the high effective non-linear locally adaptive algorithm that adaptively switches the output signals between median filter with small window length and alpha-trimmed filters with middle and large windows and local-adaptive myriad algorithm with adaptation of the linearity parameter K which are used for the considered test complex signal. Due to the use of multithreading in programing for parallel calculations, all the considered nonlinear algorithms have possibility to be implemented in real time. The more appropriate algorithm for calculating a sample myriad is the algorithm of minimization of myriad cost function based on a numerical Newton technique because of its best performance in step-like signal fragments and best robustness. In order to ensure better spike removal, it is expedient to pre-process the signal by robust myriad filter.

Key words: myriad filtering, nonlinear locally adaptive filters, complex one-dimensional signal model, minimum mean square error criterion, statistical estimates of efficiency.

Тулякова Наталія Олегівна – канд. техн. наук, науч. сотр. науково-дослідницького центру учебно-наукових приборів, Інститут прикладної фізики НАНУ, Суми, Україна, e-mail: natashatu@ukr.net.

Лопаткін Роман Юрійович – канд. фіз.-мат. наук, зав. науково-дослідницького центру учебно-наукових приборів, Інститут прикладної фізики НАНУ, Суми, Україна, e-mail: rlopatkin@gmail.com.

Трофимчук Олександр Николаєвич – д-р техн. наук, проф., член-кор. НАНУ, директор, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, Київ, e-mail: itelua@kv.ukrtel.net.

Стрижак Олександр Євгенєвич – д-р техн. наук, ведуч. науч. сотр. отдела онтологічних систем і прикладної алгебраїчної комбінаторики, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, Київ, e-mail: sae953@gmail.com.

Tulyakova Nataliya Olegovna – Ph.D., research assistant of Research Center of Equipment for Education and Research, Institute of Applied Physics, NAS of Ukraine, Sumy, Ukraine, e-mail: natashatu@ukr.net.

Lopatkin Roman Yurievich – Ph.D., Head of the Dept. of Research Center of Equipment for Education and Research, Institute of Applied Physics, NAS of Ukraine, e-mail: rlopatkin@gmail.com.

Trofymchuk Oleksandr Mykolayovych – Doctor of Science on Engineering, Prof., Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Director, Institute of Telecommunications and Global Information Space, NAS of Ukraine, Kiev, e-mail: itelua@kv.ukrtel.net.

Stryzhak Oleksandr Yevgeniyovych – Doctor of Science on Engineering, Senior research assistant of Department of the ontological systems and applied algebraic combinatorics, Institute of Telecommunications and Global Information Space, NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: sae953@gmail.com.