

УДК 621.372; 616.12-073.7

Н. О. ТУЛЯКОВА¹, А. Н. ТРОФИМЧУК², А. Е. СТРИЖАК²¹ *Институт прикладной физики НАНУ, Украина*² *Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины*

АДАПТИВНЫЕ МИРИАДНЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ С ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ

Предложены локально-адаптивные мириадные фильтры для обработки сигналов ЭКГ, регистрируемых с высокой частотой дискретизации. Разработан локально-адаптивный мириадный фильтр, в котором адаптивно изменяются размер скользящего окна и параметр линейности мириадной оценки, в результате достигаются высокие интегральные показатели эффективности фильтрации. Для тестовых сигналов ЭКГ в широком диапазоне изменения дисперсии аддитивного гауссова шума и при наличии выбросов по критериям среднеквадратической ошибки и отношения сигнал-шум получены статистические оценки качества неадаптивных и адаптивных нелинейных фильтров. Показано существенное преимущество локально-адаптивной мириадной фильтрации. На основании оценок эффективности и обработки модельных и реальных сигналов, с учетом уменьшения вычислительных затрат на программную реализацию, разработанный локально-адаптивный мириадный фильтр рекомендуется для применения в задачах подавления шума в ЭКГ.

Ключевые слова: электрокардиограмма, нелинейные устойчивые фильтры, мириадная фильтрация, локально-адаптивные мириадные фильтры, статистические оценки эффективности.

Введение

Один из приоритетов разработки биомедицинской информационно-измерительной системы заключается в получении максимально свободной от помех информации об исследуемом физиологическом объекте. Данная задача в основном решается методами цифровой фильтрации, так как шум в биомедицинских системах трудно устранить на этапе первичных оценок параметров сигнала на выходе измерительного преобразователя, поскольку помехи могут быть вызваны не только внешними факторами, но и внутренними физиологическими процессами и мышечной активностью.

Параметры системы дискретной обработки сигнала электрокардиограммы (ЭКГ) во многом определяются частотой дискретизации, выбор которой напрямую связан со спектральными характеристиками исходного аналогового сигнала. Высокая частота дискретизации улучшает точность измерения параметров непрерывной ЭКГ по ее цифровым отсчетам: точнее передаются амплитудные параметры, мелкие зубцы, расщепления и другие высокочастотные нерегулярности записи, тогда как низкая частота может привести к заметным искажениям сигнала и диагностическим ошибкам. Во многих методиках диагностики, в частности при регистрации ЭКГ де-

тей или при инвазивных исследованиях, используют частоту отсчетов 800-1000 Гц и выше. В то же время, чем выше частота дискретизации сигнала, тем большую долю шума содержит наблюдаемый на выходе аналого-цифрового преобразователя процесс. Задача обеспечения высокой степени подавления шума методами цифровой фильтрации чрезвычайно важна, так как от качества сигнала в дальнейшем зависит точность измерений его информативных параметров, анализ формы, эффективность алгоритмов распознавания и классификации.

Среди алгоритмов цифровой фильтрации для подавления шума в биомедицинских сигналах достаточно аргументирован выбор методов нелинейной устойчивой (робастной) фильтрации не только по причине негауссового характера шума, но и в связи с высокими динамическими свойствами нелинейных фильтров – минимальными ошибками, вносимыми при обработке [1]. Также, существуют гибкие нелинейные фильтры, которые при определенной настройке параметров обеспечивают как существенную нелинейность свойств – сохраняют точки разрыва производной и другие резкие изменения сигнала и устраняют выбросы, так и линейные свойства, не уступая усредняющим алгоритмам по степени подавления гауссова шума. К таким фильтрам относится оценка мириады, которая в зависимости от

параметра линейности K_{myr} в одном из граничных случаев имеет более нелинейные, чем медиана, свойства и оптимальна для плотности распределения вероятностей (ПРВ) Коши, описывающей импульсный шум, а в другом – преобразуется в среднее выборки [2]. Способность мириады изменять свойства в зависимости от параметра K_{myr} послужило основанием для разработки ряда адаптивных мириадных фильтров, в частности алгоритмов, изменяющих параметр K_{myr} в зависимости от оценок локальной сигнально-помеховой ситуации, получаемых на основе вычисляемых для скользящего окна данных параметров локальной адаптации [3, 4].

Предложены мириадные локально-адаптивные фильтры (ЛАФ), в которых в зависимости от динамики сигнала и уровня шума в окрестности текущего отсчета входного сигнала изменяется размер окна и параметр мириады K_{myr} . Данные фильтры обеспечивают высокую эффективность фильтрации ЭКГ при частоте дискретизации 400-500 Гц, не требуют предварительной оценки дисперсии, время на настройку параметров фильтра, применимы в реальном времени [4]. Использование в данных ЛАФ параметров локальной адаптации – Z-параметров [5] позволяет для каждого i -го положения скользящего окна осуществлять переключение одного из выходных сигналов трех компонентных фильтров, наиболее подходящего для обработки окрестности текущего отсчета: нелинейного фильтра, имеющего высокие динамические свойства, фильтра, хорошо подавляющего шум, или промежуточного фильтра со средними свойствами. Мириадные ЛАФ на основе Z-параметров в широком диапазоне изменения дисперсии шума обеспечивают высокое качество фильтрации процессов с различным характером поведения информативной компоненты, однако в данных алгоритмах обычно используются небольшие окна (максимум 13-15 отсчетов) [4, 5]. В случае же фильтрации сигналов при большей частоте отсчетов желательно увеличить размер окна с целью обеспечения более высокой степени подавления шума. В связи с этим, возникает задача разработки мириадных ЛАФ, высокоэффективных применительно к процессам, регистрируемых с высокой частотой дискретизации, в частности ЭКГ.

1. Адаптивные алгоритмы мириадной фильтрации

Возьмем за основу разработки мириадного ЛАФ параметры локальной адаптации, используемые фильтром Хэмпела (Hampel) [6], являющимся представителем класса нелинейных робастных фильтров на основе принятия решений [1]. В отличие от медианного фильтра, имеющего один настро-

енный параметр – размер скользящего окна, число степеней свободы фильтра Хэмпела включает также пороговый параметр t , что улучшает гибкость фильтра. Алгоритм Хэмпела заключается в следующем: центральный отсчет скользящего окна фильтра w_i считается выбросом и заменяется медианным значением в случае, если абсолютное отклонение центрального отсчета от медианы в t раз превышает оценку масштаба рассеяния случайной величины, вычисляемую как абсолютное медианное отклонение (Mad – median absolute deviation):

$$y_i^{\text{Hamp}} = \begin{cases} x_i, & \text{если } r_i \leq tS_i^{\text{Mad}}, \\ m_i, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (1)$$

где y_i^{Hamp} – выходной сигнал фильтра Хэмпела;

x_i – центральный элемент скользящего окна данных w_i размером $N=2K+1$;

$r_i = |x_i - m_i|$ – абсолютное отклонение i -го отсчета входного сигнала от медианы окна данных w_i ;

t – пороговый параметр;

$S_i^{\text{Mad}} = 1,4826 \text{ median}_{j \in [-K, K]} \{|x_{i-j} - m_i|\}$ – робастная (не чувствительная к выбросам) оценка масштаба данных в выборке, 1,4826 – коэффициент, используемый для гауссовой ПРВ;

m_i – медиана выборки данных в окне w_i .

Фильтр Хэмпела можно считать локально-адаптивным алгоритмом, так как в зависимости от вычисляемых для каждого i -го положения скользящего окна параметров локальной адаптации r_i и tS_i^{Mad} осуществляется изменение процедуры обработки окрестности текущего i -го отсчета сигнала. Фильтр Хэмпела так же, как медианный, устраняет выбросы, однако сохраняет низкоамплитудные детали, в частности синусоидальную компоненту, тогда как искажения, вносимые медианным фильтром в такой сигнал, существенны [6]. В рекурсивном фильтре симметричное окно w_i заменяется на рекурсивное $r_i = \{y_{i-K}, y_{i-K+1}, \dots, x_i, \dots, x_{i+K-1}, x_{i+K}\}$, где y_{i-j} – предыдущие $i-j$ отсчетов выходного сигнала фильтра, примененного для обработки последовательности $\{x_i\}$ входного сигнала [1, 6].

Предложим мириадный ЛАФ, который соответственно выражению (1) обработку окрестности i -го отсчета будет проводить адаптивным мириадным фильтром (АМФ) в одном случае с небольшим размером окна и нелинейными свойствами, а в другом – с большим окном и настройкой режима линейности свойств путем увеличения параметра K_{myr} :

$$y_i^{\text{AMH}} = \begin{cases} y_i^{\text{AM}(N_1, b_1)}, & \text{если } r_i^f \leq th_i^f; \\ y_i^{\text{AM}(N_2, b_2)}, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2)$$

где y_i^{AMH} – i -й отсчет адаптивного мириадного

фільтра Хемпела (АМН – adaptive myriad Hampel);

$y_i^{AM(N_1, b_1)}$ – выходной сигнал адаптивного мириадного фильтра (АМ – adaptive myriad) с настройками параметрами N_1 – размером окна и b_1 – коэффициентом, влияющим на параметр линейности;

$y_i^{AM(N_2, b_2)}$ – выходной сигнал адаптивного мириадного фильтра с аналогичными параметрами N_2 и b_2 , $N_1 < N_2$, $N_1 = 2K_1 + 1$, $N_2 = 2K_2 + 1$, $b_1 < b_2$;

$r_i^f = \text{mean}_{j \in [-K_2, K_2]} \{r_{i-j}\}$ – сглаженные линейным усредняющим (mean) фильтром значения $r_i = |x_i - m_i|$, где x_i – центральный элемент, m_i – медиана окна w_i размером $N_2 = 2K_2 + 1$;

$th_i^f = \text{mean}_{j \in [-K_2, K_2]} \{th_{i-j}\}$ – сглаженные значения $\{th_i = tS_i^{Mad}\}$, где t – пороговый параметр, $S_i^{Mad} = 1,4826 \text{ median}_{j \in [-K_2, K_2]} \{|x_{i-j} - m_i|\}$ – локальные оценки масштаба данных, полученные для каждого i -го положения скользящего окна, x_{i-j} – элемент выборки данных в окне размером $N_2 = 2K_2 + 1$, m_i – медиана выборки.

АМФ описывается следующим выражением:

$$y_i^{AM} = \text{myriad}_{j \in [-K, K]} \{x_{i-j}, bK_i^A\} = \arg \min_{\beta} \sum_{j \in [-K, K]} \log[(bK_i^A)^2 + (x_{i-j} - \beta)^2], \quad (3)$$

где y_i^{AM} – i -отсчет выходного сигнала;

x_{i-j} – элементы выборки данных в пределах окна на мириадного фильтра;

$K_i^A = \max_{j, k \in [-K, K], j \neq k} \{|x_{i-j} - x_{i-k}|\}$ – максимум абсолютных разностей элементов выборки, характеризующий крутизну сигнала;

b – настроечный коэффициент для вычисления параметра линейности мириадного фильтра по формуле $K_{myr} = bK_i^A$;

β – получаемая по выборке значений случайной величины оценки местоположения функции ПРВ;

$N = 2K + 1$ – размер скользящего окна.

АМФ (3) обеспечивает такую же, как оптимальный усредняющий фильтр, эффективность подавления шума на линейно изменяющихся участках сигнала, тогда как стандартный мириадный фильтр для данного типа сигналов имеет низкую эффективность, а при высокой крутизне сигнала может совсем не подавлять и даже усиливать шум [3]. Настроечный коэффициент b влияет на степень нелинейности мириадной оценки.

Следует ожидать, что мириадный ЛАФ (2) хорошо сохранит сигнал ЭКГ на участках его быстрого изменения за счет высоких динамических свойств

АМФ в нелинейном режиме работы и небольшого размера окна и подавит шум при обработке участков медленного изменения сигнала благодаря настройке параметра K_{myr} в линейный режим и увеличению размера окна. Как следует из (2), робастность (способность устранять выбросы) данного ЛАФ будет невысокой, поэтому при не близкой к нулю вероятности импульсных помех лучше предварительно обработать сигнал робастным мириадным фильтром с малым размером окна. Для нахождения мириады выборки данных в скользящем окне в ЛАФ (2) наиболее подходит алгоритм на основе численного метода Ньютона [7], так как для задания точности итераций при поиске минимума мириадной функции потерь можно использовать вычисляемые в (2) MAD- оценки масштаба данных S_i^{Mad} .

Рассмотрим мириадный ЛАФ, в алгоритме которого в результате сравнения вычисляемых для каждого i -го положения окна Z -параметров с порогом осуществляется переключение выходных сигналов трехкомпонентных АМФ (3) [4]:

$$y_i^{AMZ} = \begin{cases} y_i^{AM(N_3, b_3)}, & \text{если } Z_i < Z_1^t; \\ y_i^{AM(N_2, b_2)}, & \text{если } (Z_i \geq Z_1^t) \wedge (Z_i < Z_2^t); \\ y_i^{AM(N_1, b_1)}, & \text{если } (Z_i \geq Z_2^t) \vee (QZ_i > Z_2^t); \end{cases} \quad (4)$$

где y_i^{AMZ} – выходной сигнал мириадного ЛАФ на основе Z -параметров;

$y_i^{AM(N_j, b_j)}$, $j = 1 \dots 3$, – выходной сигнал j -го

АМФ (3) с размером окна N_j и настроечным коэффициентом b_j ; $N_3 > N_2 > N_1$, $b_3 > b_2 > b_1$;

$$Z_i = \frac{\sum_{j \in [-K, K]} (y_{i-j}^f - x_{i-j})}{\sum_{j \in [-K, K]} |y_{i-j}^f - x_{i-j}|} \quad \text{– параметр локаль-}$$

ной адаптации, вычисляемый для окна w_i размером $N = 2K + 1$, где y_{i-j}^f – отсчеты выходного сигнала предварительного фильтра (компонента ЛАФ с промежуточными свойствами); x_{i-j} – входной сигнал;

$QZ_i = Z^{(q)} - Z^{(p)}$ – квазиразмах Z -параметра, вычисляемый как разность q -й и p -й порядковых статистик упорядоченного множества $\{Z^{(j)}\}_{j \in [1, 2K+1]}$ в окне данных, $q - p \approx K$, данный параметр служит детектором скачка функции сигнала [5];

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

Мириадный ЛАФ (4) в отличие от ЛАФ (2) переклучает не два, а три компонентных фильтра, при этом за счет применения промежуточного компонента со средними динамическими и статистическими свойствами улучшается эффективность фильтрации при невысоком уровне шума, в частно-

сти, при обработке параболических кривых [4]. Однако реализация трехкомпонентного ЛАФ требует больше вычислительных ресурсов, что при больших окнах заметней влияет на время обработки.

2. Тестовые модели сигналов и помех. Критерии эффективности

Для получения статистических оценок качества фильтров использовались тестовые сигналы ЭКГ при частоте дискретизации 800 Гц и 4 кГц (рис. 1). Моделировались условия различного уровня аддитивного гауссова шума с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_a^2 и ситуации наличия выбросов с вероятностью P_s и амплитудой p_s . В качестве критериев эффективности вычислялись пока-

затели среднеквадратической ошибки (СКО) χ и отношения сигнал-шум (ОСШ) q по формулам:

$$\chi = \sum_{i=1:I} [y_i^f - s_i]^2 / I, \quad (5)$$

$$q = 10 \lg(p_s/p_n), \quad (6)$$

где y_i^f – i -й отсчет сигнала на выходе фильтра;

s_i – сигнал в отсутствие помех;

I – длительность реализации сигнала;

$p_s = \sum_{i=1:I} (s_i - \bar{s})^2 / I$ – мощность сигнала;

$\bar{s} = \sum_{i=1:I} s_i / I$ – среднее значение сигнала;

$p_n = \sum_{i=1:I} (y_i^f - s_i)^2 / I$ – мощность шума.

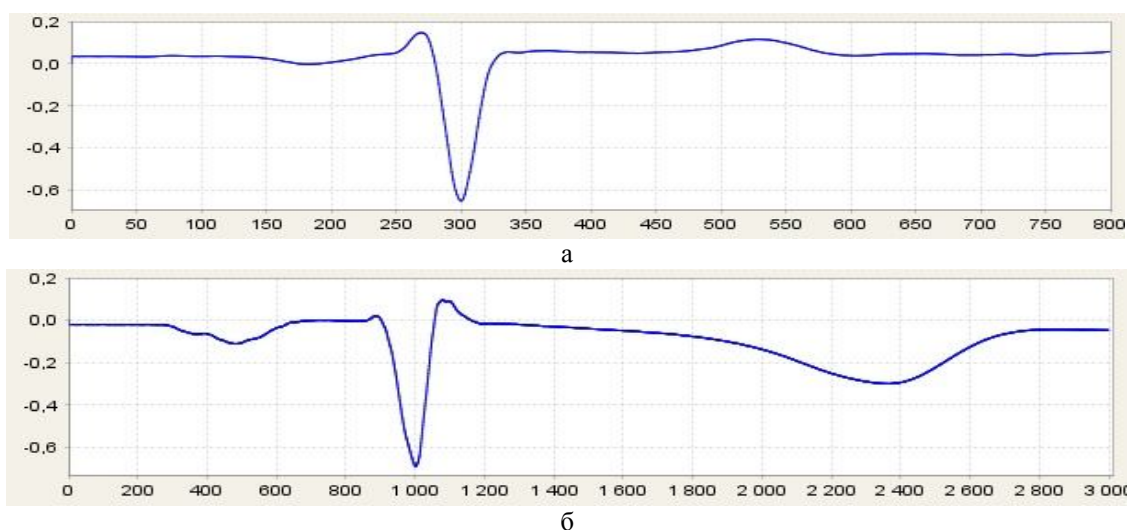


Рис. 1. Тестовые сигналы электрокардиограммы в отсутствие шума: а – сигнал электрокардиограммы при частоте дискретизации 800 Гц; б – сигнал электрокардиограммы при частоте дискретизации 4 кГц

3. Анализ результатов исследования

Проанализируем эффективность нелинейных фильтров на основании усредненных для большого числа реализаций $N_R=200$ и $N_R=500$ (при наличии импульсных помех) оценок СКО (5) и ОСШ (6) для тестовых моделей ЭКГ, регистрируемых с частотой дискретизации 800 Гц (табл. 1) и 4 кГц (табл. 2). Моделировались условия низкого (ситуации 1 - 3), среднего (ситуации 4 - 5) и высокого (ситуации 6 - 7) уровня шума, и условия различной вероятности импульсных помех (ситуации 8 - 10).

Исследуем медианный фильтр (Med) при различных размерах апертуры N , мириадный фильтр (Mug) при различных значениях N и параметра линейности $K_{\text{муг}}$, фильтр Хэмпела (Ham) при различных N и фиксированном пороговом параметре t . Для сравнения приведем оценки качества рекурсивных вариантов медианного фильтра (Med_{rec}) и фильтра Хэмпела (Ham_{rec}) [6].

Проанализируем эффективность предложенного мириадного ЛАФ (2), обозначим как АМН, при значениях параметров $N_1=9$, $b_1=1$, $N_2=31$, $b_2=10$, $t=0,6$ для частоты дискретизации 800 Гц и $N_1=9$, $b_1=1$, $N_2=55$, $b_2=10$, $t=0,6$ для частоты 4 кГц. Так как робастные свойства данного ЛАФ невысокие, при наличии выбросов будем использовать предварительный мириадный фильтр с параметрами $K_{\text{муг}}=0,2$, $N=5$, обозначим данный алгоритм как АМН'.

Исследуем мириадный ЛАФ на основе Z -параметров [4], обозначим как АМЗ, со следующими параметрами: $N_1=9$, $b_1=1$, $N_2=25$, $b_2=5$, $N_3=31$, $b_3=10$ для частоты дискретизации 800 Гц и $N_1=9$, $b_1=1$, $N_2=35$, $b_2=5$, $N_3=55$, $b_3=10$ для частоты 4 кГц, как предварительный фильтр для вычисления Z -параметров используется промежуточный компонент со средними свойствами. При наличии выбросов рассмотрим вариант данного ЛАФ с детектором импульсных помех на основе анализа параметра Z и знакового параметра Z^S [5], обозначим как АМЗ'.

Таблиця 1
Статистические оценки эффективности нелинейных фильтров по критериям среднеквадратической ошибки (ppm) и отношения сигнал-шум для сигнала электрокардиограммы при частоте дискретизации 800 Гц

Фильтр	СКО	ОСШ	СКО	ОСШ	СКО	ОСШ	СКО	ОСШ	СКО	ОСШ
1) $\sigma_a^2=0,00002$;			2) $\sigma_a^2=0,00005$;		3) $\sigma_a^2=0,0001$;		4) $\sigma_a^2=0,0005$;		5) $\sigma_a^2=0,001$;	
Исходный	20	27,61	50	23,63	100	20,62	500	13,63	1001	10,62
Med5	7	32,09	17	28,26	34	25,35	158	18,69	309	15,74
Med _{rec} 5	7	32,10	16	28,65	29	25,98	127	19,61	243	16,79
Med9	6	33,11	12	29,71	23	27,00	100	20,65	190	17,84
Med _{rec} 9	10	30,70	20	27,67	34	25,38	117	20,02	202	17,65
Med13	9	31,23	15	29,02	23	27,00	83	21,50	151	18,92
Med _{rec} 13	16	28,58	29	26,02	48	23,86	165	18,57	282	16,26
Myr5(0,2)	5	33,86	11	30,32	21	27,46	101	20,59	202	17,59
Myr9(0,2)	9	31,29	12	29,84	18	28,18	63	22,68	120	19,89
Myr9(1)	11	30,38	14	29,29	19	27,85	63	22,68	118	19,96
Myr13(0,2)	23	27,04	26	26,54	30	25,90	63	22,70	102	20,63
Myr13(1)	36	25,16	38	24,91	41	24,50	72	22,15	110	20,30
Ham5(0,6)	8	31,68	19	27,88	37	24,95	176	18,18	343	15,28
Ham _{rec} 5(0,6)	7	31,96	17	28,45	31	25,73	137	19,29	261	16,48
Ham9(0,6)	7	32,33	15	28,85	29	26,09	131	19,48	253	16,63
Ham _{rec} 9(0,6)	9	31,06	19	27,94	32	25,58	117	20,03	205	17,59
AMH	8	31,76	10	30,72	13	29,63	31	25,93	53	23,64
AMZ	8	31,76	10	30,92	12	30,00	32	25,82	55	23,48
6) $\sigma_a^2=0,003$;			7) $\sigma_a^2=0,006$;		8) $\sigma_a^2=0,0001$; $P_s=0,003$; $n_s=0,5$;		9) $\sigma_a^2=0,001$; $P_s=0,01$; $n_s=0,5$;		10) $\sigma_a^2=0,003$; $P_s=0,03$; $n_s=0,5$;	
Исходный	3003	5,85	6006	2,84	856	12,26	3540	5,27	10504	0,45
Med9	537	13,35	1056	10,46	24	26,82	199	17,68	597	12,91
Med _{rec} 9	494	13,79	888	11,26	39	25,08	221	17,35	594	13,10
Med13	404	14,64	771	11,83	25	26,82	158	18,72	449	14,18
Med _{rec} 13	656	12,63	1125	10,31	64	23,29	336	15,66	860	11,64
Med17	349	15,30	643	12,65	37	25,09	151	18,96	391	14,82
Myr9(0,2)	352	15,21	716	12,13	20	27,62	131	19,49	414	14,51
Myr9(1)	338	15,38	669	12,42	83	22,11	344	15,44	1116	10,25
Myr13(0,2)	273	16,35	533	13,42	32	25,65	111	20,26	316	15,72
Myr13(1)	263	16,50	493	13,78	81	21,84	260	16,68	836	11,55
Myr17(0,2)	245	16,86	447	14,25	59	22,97	125	19,77	293	16,10
Myr17(1)	266	16,50	439	14,32	130	19,64	269	16,52	741	12,09
Ham5(0,6)	994	10,66	1967	7,69	38	24,83	357	15,10	1144	10,08
Ham _{rec} 5(0,6)	741	11,96	1444	9,06	32	25,59	270	16,34	831	11,50
Ham9(0,6)	707	12,17	1356	9,32	29	26,02	259	16,52	765	11,84
Ham _{rec} 9(0,6)	501	13,72	898	11,20	34	25,48	219	17,35	587	13,12
Ham13(0,6)	608	12,84	1135	10,13	29	26,02	227	17,13	655	12,52
Ham _{rec} 13(0,6)	587	13,08	990	10,83	44	24,29	270	16,47	706	12,45
AMH	134	19,59	255	16,80	41	25,23	162	18,92	601	13,14
AMH'	151	19,09	285	16,32	19	28,03	69	22,46	194	18,03
AMZ	142	19,33	272	16,51	40	25,29	165	18,80	619	13,00
AMZ'	147	19,17	282	16,35	33	26,21	146	19,39	577	13,32

Таблица 2

Статистические оценки эффективности нелинейных фильтров по критериям среднеквадратической ошибки (ppm) и отношения сигнал-шум для сигнала электрокардиограммы при частоте дискретизации 4 кГц

Фильтр	СКО	ОСШ	СКО	ОСШ	СКО	ОСШ	СКО	ОСШ	СКО	ОСШ
1) $\sigma_a^2=0,00001$;			2) $\sigma_a^2=0,00006$;		3) $\sigma_a^2=0,0001$;		4) $\sigma_a^2=0,0006$;		5) $\sigma_a^2=0,001$;	
Исходный	10	31,42	60	23,64	100	21,42	599	13,64	999	11,42
Med9	2	38,03	12	30,82	19	28,73	104	21,24	172	19,06
Med13	2	38,86	9	31,99	14	29,97	75	22,65	124	20,50
Med15	2	39,07	8	32,42	13	30,45	66	23,22	108	21,09
Med17	2	39,17	7	32,75	12	30,81	60	23,67	97	21,56
Myr9(0,2)	1	40,32	7	33,05	11	30,88	67	23,14	113	20,91
Myr13(0,2)	1	40,06	5	34,28	8	32,27	47	24,76	77	22,55
Myr17(0,2)	2	38,28	5	34,44	7	32,77	37	25,79	61	23,60
Ham9(0,6)	3	36,95	15	29,65	24	27,54	134	20,14	220	17,99
Ham15(0,6)	3	37,29	12	30,51	20	28,45	104	21,25	169	19,16
AMH	1	41,66	4	35,46	6	34,02	18	28,95	28	27,11
AMZ	1	42,40	3	37,00	4	35,31	19	28,70	30	26,73
6) $\sigma_a^2=0,003$;			7) $\sigma_a^2=0,006$;		8) $\sigma_a^2=0,0001$; $P_s=0,003; n_s=0,5$;		9) $\sigma_a^2=0,001$; $P_s=0,01; n_s=0,5$;		10) $\sigma_a^2=0,003$; $P_s=0,03; n_s=0,5$;	
Исходный	2996	6,65	5993	3,64	858	12,25	3528	5,98	10599	1,17
Med9	513	14,32	1024	11,32	19	28,70	177	18,95	558	13,96
Med13	365	15,81	725	12,83	14	29,95	126	20,43	393	15,49
Med15	317	16,42	630	13,45	13	30,37	112	20,96	347	16,03
Med17	283	16,92	560	13,95	12	30,74	100	21,46	308	16,56
Myr9(0,2)	343	16,08	704	12,95	14	30,10	122	20,54	401	15,40
Myr13(0,2)	235	17,73	482	14,60	10	31,55	86	22,11	280	16,97
Myr17(0,2)	184	18,80	376	15,69	9	32,15	66	23,25	213	18,15
Myr17(10)	178	18,93	354	15,95	55	24,27	234	17,80	843	12,20
Ham9(0,6)	655	13,26	1305	10,27	25	27,51	227	17,86	709	12,91
Ham13(0,6)	515	14,31	1020	11,34	21	28,21	183	18,81	558	13,96
Ham17(0,6)	446	14,93	876	12,01	19	28,58	162	19,33	482	14,61
AMH	78	22,60	151	19,72	22	28,23	100	21,57	430	15,19
AMH'	85	22,23	158	19,52	7	32,75	40	25,51	111	21,06
AMZ	81	22,44	154	19,63	22	28,29	105	21,37	455	14,94
AMZ'	80	22,45	153	19,66	16	29,68	99	21,64	441	15,09

Среди неадаптивных нелинейных фильтров во всех моделируемых условиях помех (см. табл. 1 - 2) наиболее эффективен мириадный фильтр с малым значением параметра линейности в связи с высокими динамическими свойствами и устойчивостью к выбросам. Только при высоком уровне шума увеличение параметра линейности мириадного фильтра приводит к улучшению эффективности. Данный фильтр в нелинейном режиме работы при очень низком уровне шума среди всех рассмотренных алгоритмов имеет наилучшую эффективность.

Как показано в [6] и подтверждается численными оценками, рекурсия улучшает эффективность

медианного фильтра и фильтра Хэмпела при малом размере окна $N=5$ в условиях низкого уровня шума, среднем размере окна $N=9$ для медианного фильтра при большом уровне шума, окнах $N=9-13$ при среднем - высоком уровне помех для фильтра Хэмпела.

Даже при низком уровне шума мириадные ЛАФ AMZ (4), AMH (2) имеют преимущество в эффективности, что говорит об их высоких динамических свойствах. А с ростом дисперсии помех выигрыш в эффективности увеличивается: при среднем - высоком уровне шума в сравнении с наилучшим неадаптивным фильтром для мириадных ЛАФ показатели СКО меньше, более чем в 2 раза, а ОСШ вы-

ше на 3 - 3,5 дБ. В сравнении с оценками по исходному сигналу для частоты дискретизации 800 Гц (см. табл. 1) при низком - среднем уровне шума показатели СКО уменьшаются в 5 - 19 раз, а ОСШ возрастает на 7 - 13 дБ, а при высоком уровне шума СКО уменьшается в 22 - 23,5 раз, а ОСШ возрастает на 14 дБ. Для частоты дискретизации 4 кГц (см. табл. 2) эффективность мириадных ЛАФ выше: при низком - среднем уровне шума СКО уменьшается в 10 - 33,3 раз, а ОСШ увеличивается на 11 - 16 дБ, а при высоком уровне шума показатели СКО меньше в 38,4 - 39,7 раз, а ОСШ возрастает на 16 дБ и более.

Таким образом, предложенный в [4] для обработки ЭКГ при частоте дискретизации 400 Гц мириадный ЛАФ AMZ (4), при увеличении размера окон оказывается также высокоэффективным для сигналов ЭКГ, регистрируемых с высокой частотой дискретизации. Благодаря применению промежуточно-компонентного фильтра данный ЛАФ имеет лучшие динамические свойства, о чем свидетельствуют более высокие показатели эффективности при низком уровне шума. Мириадный ЛАФ AMH (2) имеет небольшое преимущество над AMZ по статистическим оценкам эффективности при среднем - высоком уровне шума (см. табл. 1-2). При этом, как сле-

дует из (2), его реализация проще.

При неблизкой к нулю вероятности выбросов среди неадаптивных фильтров наиболее эффективен мириадный фильтр при малом значении параметра линейности, а робастные свойства мириадных ЛАФ AMZ, AMH недостаточно высоки. Использование же предварительного робастного мириадного фильтра с малым размером окна – вариант ЛАФ AMH' позволяет в сложных условиях помех достичь наиболее высокие показатели эффективности. Для моделируемых условий при частоте дискретизации 800 Гц СКО на выходе AMH' уменьшается в 45 - 54,4 раз, а ОСШ возрастает на 15,8 - 17,6 дБ (см. табл. 1), а при частоте 4 кГц СКО уменьшается в 122,6 - 95,5 раз, а ОСШ возрастает на 20,5 - 17 дБ (см. табл. 2).

Как видим из анализа выходных сигналов мириадных ЛАФ, ими обеспечивается высокое качество подавления сетевой наводки (рис. 2) и различного уровня аддитивного гауссова шума (рис. 3-4), а в условиях наличия импульсных помех применение мириадного ЛАФ AMH' позволяет не только подавить шум, но и устранить выбросы практически без искажений сигнала (рис. 5).

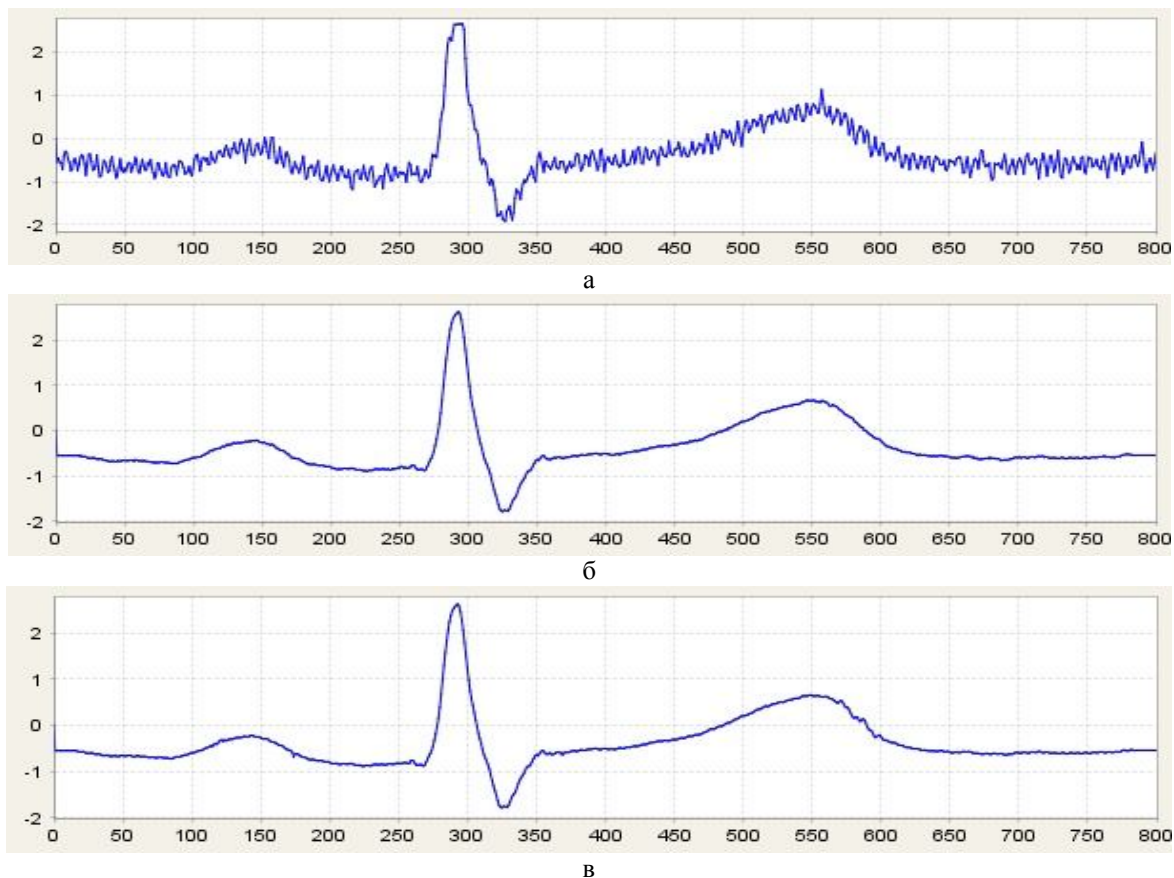


Рис. 2. Применение локально-адаптивной мириадной фильтрации для сигнала ЭКГ при частоте дискретизации 1 кГц: а – входной сигнал с сетевой наводкой; б – выходной сигнал локально-адаптивного мириадного фильтра AMZ; в – выходной сигнал локально-адаптивного мириадного фильтра AMH

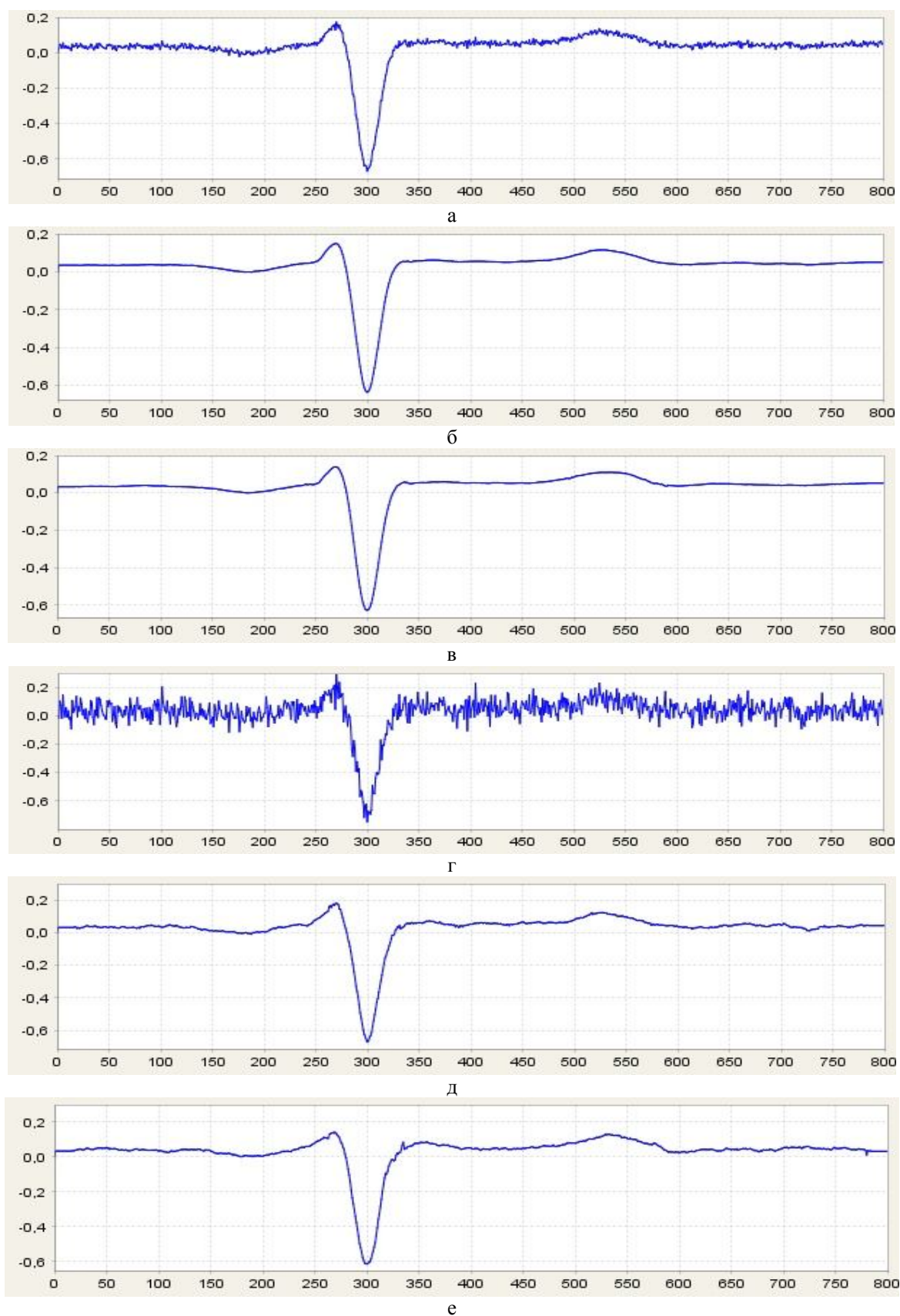


Рис. 3. Применение локально-адаптивной мириадной фильтрации для модельного сигнала ЭКГ при частоте дискретизации 800 Гц: а, г – входные сигналы при низком ($\sigma_a^2=0,0001$) и высоком ($\sigma_a^2=0,003$) уровне аддитивного гауссова шума; б, д – выходные сигналы локально-адаптивного мириадного фильтра AMZ; в, е – выходные сигналы локально-адаптивного мириадного фильтра AMH

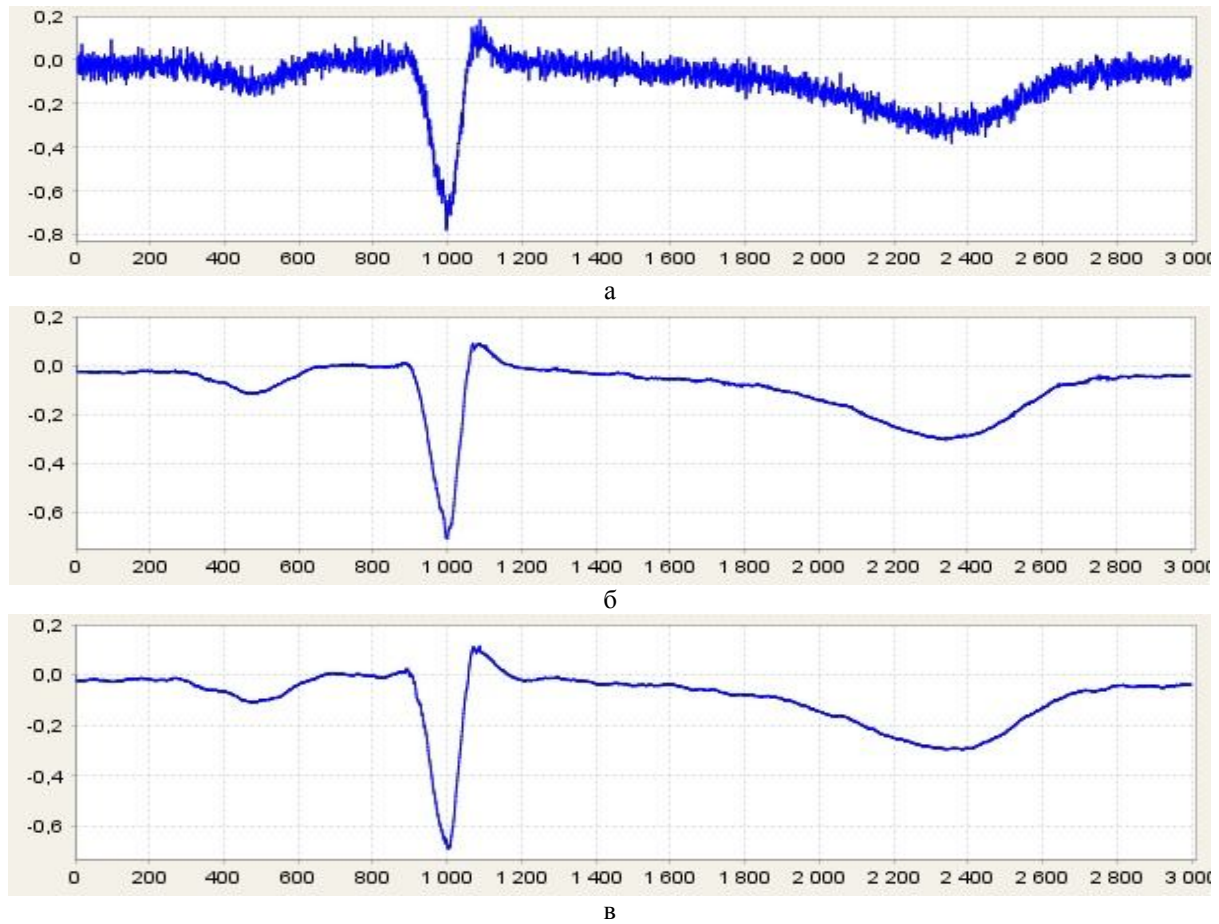


Рис. 4. Применение локально-адаптивной мириадной фильтрации для модельного сигнала ЭКГ при частоте дискретизации 4 кГц: а – входной сигнал при среднем ($\sigma_a^2=0,001$) уровне аддитивного гауссова шума; б – выходной сигнал локально-адаптивного мириадного фильтра AMZ; в – выходной сигнал локально-адаптивного мириадного фильтра AMH

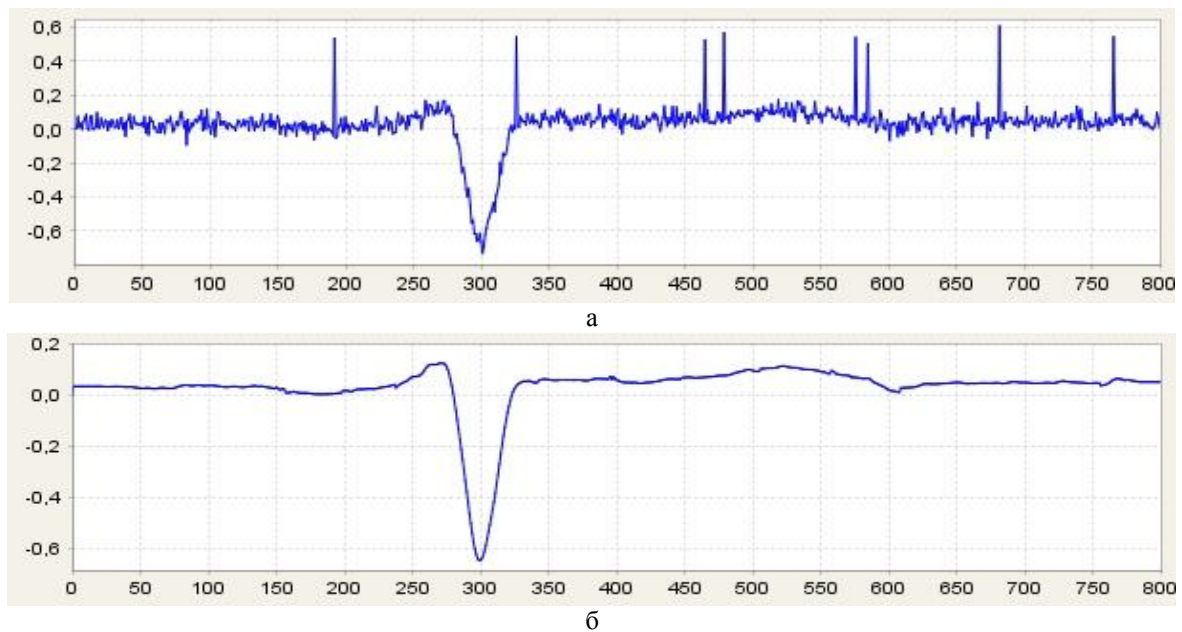


Рис. 5. Применение локально-адаптивной мириадной фильтрации для модельного сигнала ЭКГ при частоте дискретизации 800 Гц: а – входной сигнал при среднем ($\sigma_a^2=0,001$) уровне аддитивного гауссова шума и наличии выбросов ($P_s=0,01$; $n_s=0,5$); б – выходной сигнал локально-адаптивного мириадного фильтра AMH'

Заклучение

На основании полученных статистических оценок качества по критериям среднеквадратической ошибки и отношения сигнал-шум для обработки сигналов электрокардиограммы, регистрируемых с высокой частотой дискретизации, в моделируемых условиях воздействия различного уровня аддитивного гауссова шума и ситуаций наличия выбросов показано существенное преимущество применения локально-адаптивных мириадных фильтров. Высокое качество данных адаптивных нелинейных фильтров подтверждается визуальным анализом выходных сигналов при обработке модельных и реальных сигналов.

В предложенных мириадных локально-адаптивных фильтрах осуществляется адаптация размера скользящего окна, настроечного коэффициента, влияющего на степень нелинейности свойств фильтра, и параметра мириадной оценки при обработке окрестностей быстрого (QRS- комплекс ЭКГ) и медленного (P-, T- волны, ST-сегмент) изменения сигнала, в результате достигаются высокие интегральные показатели эффективности. Большое число настроечных параметров улучшает гибкость рассмотренных адаптивных алгоритмов и позволяет их оптимизировать к конкретным сигналам.

В предложенном мириадном локально-адаптивном фильтре, использующем пороговый параметр фильтра Хэмпела, в зависимости от динамики изменения сигнала в окрестности i -го отсчета, осуществляется обработка адаптивным мириадным фильтром с одним из двух наборов настроечных параметров, более подходящим для локальной сигнально - помеховой ситуации. При этом при среднем - высоком уровне шума обеспечиваются лучшие, чем трехкомпонентным локально-адаптивным мириадным фильтром, показатели эффективности. Таким образом, повышается степень подавления шума при уменьшении вычислительных затрат на программную реализацию алгоритма адаптивной мириадной фильтрации.

В условиях наличия импульсных помех вследствие невысокой робастности предложенных мириадных локально-адаптивных фильтров целесообразно применять предварительную обработку сигнала мириадным фильтром с близким к нулю параметром линейности и малым размером окна.

Литература

1. Astola, J. *Fundamentals of Nonlinear Digital Filtering* [Text] / J. Astola, P. Kuosmanen. – USA : CRC Press LLC, 1997. – 276 p.
2. 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, № 1. – P. 4-20. doi: 10.1155/S1110865702000483.

3. 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.*

4. Тулякова, Н. О. *Локально-адаптивная мириадная фильтрация сигнала электрокардиограммы* [Текст] / Н.О. Тулякова // *Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Вып. 180. – X., 2015. – С. 152-162.*

5. Лукин, В. В. *Анализ поведения показателей локальной активности для нелинейных адаптивных фильтров* [Текст] / В. В. Лукин // *Радиофизика и электроника : сб. науч. тр. НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. – X., 1998. – Вып. 3, № 2. – С. 80-89.*

6. Pearson, R. K. *The Class of Generalized Hampel Filters* [Text] / R. K. Pearson, Y. Neuvo, J. Astola // *Proc. of the 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. – 2015. – P. 2546-2550. doi: 10.1109/EUSIPCO.2015.7362835.

7. 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.*

References

1. Astola, J. *Fundamentals of Nonlinear Digital Filtering*. New York, CRC Press Publ., 1997. 276 p.
2. 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.
3. Abramov, S. K., Lukin, V. V., Astola, J. *Adaptive myriad filter*. *CD-ROM Proc. of NSIP'2001*, Baltimore, USA, 2001. 5 p.
4. Tulyakova, N. O. *Lokal'no-adaptivnaya miriadnaya fil'tratsiya signala elektrokardiogrammy* [Locally-adaptive myriad filtering of electrocardiogram signal]. *Radiotekhnika: All-Ukr. Sci. Interdep. Mag.*, 2015, vol. 180, pp. 152-162.
5. 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. nauch. tr. NAN Ukrainy. In-t radiofiziki i elektroniki im. A. Ya. Usikova*, 1998, vol. 3, no. 2, pp. 80-89.
6. Pearson, R. K., Neuvo, Y., Astola, J. *The Class of Generalized Hampel Filters*. *Proc. of the 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2015, pp. 2546-2550. doi: 10.1109/EUSIPCO.2015.7362835
7. Tulyakova, N. O., Trofimchuk, A. N., Strizhak A. E. *Algoritmy miriadnoy fil'tratsii* [Algorithms of myriad filtering]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer systems*, 2014, no. 4(68), pp. 76-83.

Поступила в редакцію 15.11.2016, рассмотрена на редколлегии 09.12.2016

АДАПТИВНІ МІРІАДНІ ФІЛЬТРИ ДЛЯ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАМИ, ЩО РЕЄСТРУЮТЬСЯ З ВИСОКОЮ ЧАСТОТОЮ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ

Н. О. Тулякова, О. М. Трофимчук, О. Є. Стрижак

Запропоновано локально-адаптивні міріадні фільтри для обробки сигналів ЕКГ, що реєструються з високою частотою дискретизації. Розроблено локально-адаптивний міріадний фільтр, в якому адаптивно змінюються розмір ковзного вікна та параметр лінійності міріадної оцінки, в результаті досягаються високі інтегральні показники ефективності фільтрації ЕКГ. Для тестових сигналів ЕКГ у широкому діапазоні зміни дисперсії адитивного гаусова шуму та при наявності викидів за критеріями середньоквадратичної помилки та відношення сигнал-шум отримані статистичні оцінки якості неадаптивних та адаптивних нелінійних фільтрів. Показана істотна перевага локально-адаптивної міріадної фільтрації. На підставі оцінок ефективності та обробки модельних і реальних сигналів, з урахуванням зменшення обчислювальних витрат на програмну реалізацію, розроблений локально-адаптивний міріадний фільтр рекомендується для застосування в задачах придушення шуму в сигналах ЕКГ.

Ключові слова: електрокардіограма, нелінійні стійкі фільтри, міріадна фільтрація, локально-адаптивні міріадні фільтри, статистичні оцінки ефективності.

ADAPTIVE MYRIAD FILTERS FOR PROCESSING SIGNALS OF ELECTROCARDIOGRAM REGISTERED WITH HIGH SAMPLING FREQUENCY

N. O. Tulyakova, A. N. Trofimchuk, A. Ye. Strizhak

Locally adaptive myriad filters for processing ECG signals registered with high sampling frequency are proposed. A locally adaptive myriad filter with adaptively changed window size and myriad estimate linearity parameter is designed. As a result, good global performance criteria of filtering efficiency are reached. For test ECG signals corrupted by additive and impulse noise with parameters varying in wide limits, statistical estimates of filtering efficiency for non-adaptive and adaptive filters are obtained for MSE and SNR criteria. Sufficient benefit of locally adaptive myriad filtering is demonstrated. The designed filter is recommended for practical use for noise suppression in ECG signals based on estimation of its efficiency and processing model and real signals and taking into account required computations.

Keywords: electrocardiogram, nonlinear robust filters, myriad filtering, locally-adaptive myriad filters, statistical estimates of efficiency.

Тулякова Наталя Олександрівна – канд. техн. наук, науч. сотр. научно-исследовательского центра учебно-научных приборов, Институт прикладной физики НАНУ, Сумы, Украина, e-mail: natashatu@ukr.net.

Трофимчук Александр Николаевич – д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАНУ, зам. директора по научной работе, Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАНУ, Киев.

Стрижак Александр Евгеньевич – д-р техн. наук, вед. науч. сотр. отдела онтологических систем и прикладной алгебраической комбинаторики, Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАНУ, Киев, e-mail: sae953@gmail.com.

Tulyakova Nataliya Olegovna – Candidate of Technical Science, 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.

Trofymchuk Oleksandr Mykolayovych – Doctor of Technical Science, Prof., Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Deputy Director for Science, Institute of Telecommunications and Global Information Space, NAS of Ukraine, Kiev.

Stryzhak Oleksandr Yevgeniyovych – Doctor of Technical Science, 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.