

УДК 616.12

А.И. БЫХ, Н.О. ТУЛЯКОВА

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

МЕТОДЫ ЛОКАЛЬНО-АДАПТИВНОЙ УСТОЙЧИВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С ЛИНЕЙНЫМИ СУБАПЕРТУРАМИ С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Усовершенствован метод локально-адаптивной нелинейной фильтрации с “жестким” переключением за счет включения в его структуру нелинейных гибридных фильтров, использующих экстраполирующие КИХ-субапертуры, что позволяет улучшить локальные и интегральные показатели качества фильтрации сигналов с различным поведением информативной компоненты в широком диапазоне изменения дисперсии гауссова шума, смешанного (аддитивного и мультипликативного) шума, при малой вероятности выбросов. В результате анализа статистических оценок качества для модельного одномерного сигнала, включающего различные элементарные сигналы, показано достижение высоких показателей эффективности по критериям среднеквадратической ошибки и отношения сигнал-шум. Применение для обработки электрокардиографических сигналов показывает высокое качество подавления различного уровня шума и сохранения информативной компоненты при обеспечении устойчивости к априорной неопределенности модели сигнала и дисперсии шума и высокого быстродействия.

Ключевые слова: локально-адаптивная устойчивая фильтрация, гибридные нелинейные фильтры с экстраполирующими КИХ-субапертурами, обработка электрокардиограмм в реальном времени.

Введение

В современных информационно-измерительных системах (ИИС) для повышения точности обработки, расширения динамического диапазона входных сигналов, устранения сложных помех, реализации алгоритмов анализа и классификации данных применяется цифровая обработка сигналов (ЦОС). Применение ЦОС позволяет реализовать не только цифровые варианты линейных аналоговых фильтров, но и принципиально другие методы фильтрации, относящиеся к классу нелинейных устойчивых, имеющие лучшие свойства [1, 2]. Методы нелинейной устойчивой фильтрации оптимальны (высокоэффективны) для случайных процессов с негауссовыми плотностями распределения вероятностей (ПРВ), обеспечивают высокую эффективность подавления смешанного аддитивного и мультипликативного шума, устраняют выбросы. Представители нелинейных устойчивых оценок характеризуются высокими динамическими свойствами – сохраняют характерные точки сигнала вида скачков, изломов, пиков, гладких экстремумов, обеспечивая высокую эффективность подавления помех в их окрестностях [1-5]. Цифровые методы локально-адаптивной устойчивой фильтрации имеют важные для практических условий преимущества: устойчивость к априорной неопределенности сигнала и помех, наилучшие интегральные показатели качества обработки

процессов с различным поведением информативной компоненты в широком диапазоне изменения дисперсии шума и при наличии выбросов [6-10].

В мире существует несколько научных школ, благодаря которым методы нелинейной устойчивой фильтрации успешно развиваются: финская (Я. Астота, П. Куосманен и др.), занимающаяся разработкой и анализом свойств нелинейных фильтров [1], греческая (И. Питас и др.) и канадская (А. Венецаноулос и др), ориентированная на разработку нелинейных фильтров на порядковых статистиках и методов векторной нелинейной фильтрации цветных изображений [2, 11, 12], американская (Г. Арсе и др.), разработавшая новые робастные оценки (мирада и меридиана выборки) и другие методы нелинейной фильтрации в условиях негауссовых помех с симметричными α -стабильными распределениями (ПРВ с “тяжелыми” хвостами) [13], черногорская (И. Джурович и др. [14]), предложившая робастные формы дискретного преобразования Фурье, украинская (А.А. Зеленский, В.В. Лукин и др. [6-10]), разрабатывающая методы локально-адаптивной нелинейной фильтрации при априорной неопределенности сигнала и характеристик помех. В то же время недостаточно исследованными остаются вопросы фильтрации нестационарного шума смешанного аддитивного и мультипликативного вида в области обработки одномерных сигналов, в частности биомедицинских, форма которых в течение времени

может меняться, и характер таких изменений неизвестен. В связи с этим актуальна задача повышения качества фильтрации в условиях априорной неопределенности модели поведения сигнала и дисперсии аддитивного, смешанного (аддитивного и мультипликативного) шума и наличия выбросов, т.е. разработки методов локально-адаптивной устойчивой фильтрации, имеющих лучшие свойства.

1. Метод локально-адаптивной фильтрации с “жестким” переключением

На практике большинство наблюдаемых сигналов ИИС отображают нестационарные процессы с различным типом поведения информативной компоненты. Допущения стационарности и гауссовой ПРВ помех также не всегда приемлемы, причем во многих ситуациях характеристики помех априорно неизвестны. В таких условиях, когда объем сведений о модели локального поведения сигнала и свойствах помех ограничен, целесообразен выбор устойчивых – способных достаточно успешно функционировать для широкого класса сигналов и помех методов ЦОС. К таким методам относятся нелинейные локально-адаптивные фильтры (ЛАФ) с “жестким” переключением, осуществляющие адаптацию типа и параметров фильтра к локальной сигнально-помеховой ситуации [6-9].

В [7-9] предложены методы локально-адаптивной устойчивой фильтрации использующие параметры локальной адаптации (ПЛА), называемые Z-параметрами. Данные ПЛА функционируют в условиях, когда сигнал нестационарный, присутствует шум аддитивного и смешанного аддитивного и мультипликативного вида с априорно неизвестной дисперсией и возможно наличие выбросов. Выражения для вычисления Z-параметров следующие:

$$Z(n) = \frac{\sum_{k=n-(N-1)/2}^{n+(N-1)/2} (y^f(k) - x(k))}{\sum_{k=n-(N-1)/2}^{n+(N-1)/2} |y^f(k) - x(k)|}, \quad (1)$$

$$Z^s(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=n-(N-1)/2}^{n+(N-1)/2} \text{sign}(y^f(k) - x(k)), \quad (2)$$

$$Q_Z(n) = Z^{(q)}(n) - Z^{(p)}(n), \quad (3)$$

где $x(k)$ - k -й отсчет входного дискретного сигнала в скользящем окне размером N ;

$y^f(k)$ - k -й отсчет выходного сигнала предварительного фильтра со средними свойствами;

n – индекс центрального элемента в окне;

q, p - номера порядковых статистик упорядочен-

ной выборки $\{Z(n-k), \dots, Z(n+k)\}$, $k = \overline{1, N/2}$, в пределах окна размером N , $q > p$, $q - p \approx N/2$.

В отличие от известных ПЛА, используемых адаптивными алгоритмами обработки изображений и одномерных сигналов [6, 10], Z-параметры обладают следующими достоинствами [8-10]: различают локально-активные (резкие изменения информативной компоненты) и локально-пассивные (линейное поведение) области сигнала; не требуют предварительной оценки дисперсии шума; не чувствительны к масштабу амплитуды сигнала; детектируют скачки сигнала и импульсные помехи.

Метод локально-адаптивной нелинейной устойчивой фильтрации, использующий Z-параметры, можно представить структурной схемой (рис.1), включающей предварительную фильтрацию сигнала, расчет ПЛА для текущего n -го положения скользящего окна, в результате сравнения которых с пороговыми значениями осуществляется адаптивное переключение различных нелинейных фильтров.

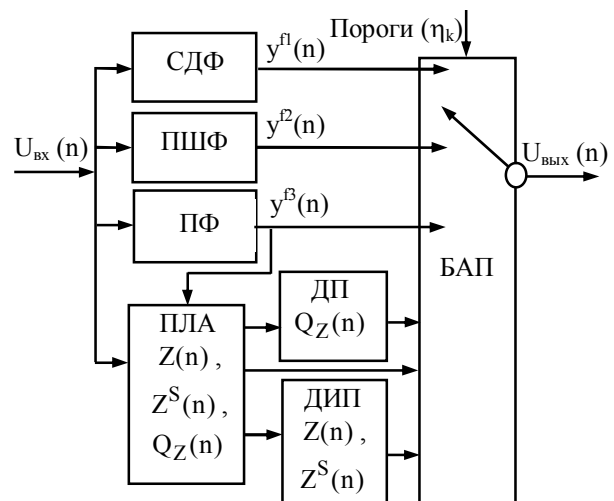


Рис. 1. Структурная схема метода локально-адаптивной нелинейной фильтрации:

$U_{вх}(n)$ – n -й отсчет входного сигнала; $U_{вых}(n)$ – n -й отсчет выходного сигнала; СДФ – “сохраняющий детали” фильтр; ПШФ – “подавляющий шум” фильтр; ПФ – “промежуточный” фильтр со средними свойствами; ПЛА – блок расчета Z-параметров; η_k – пороговые значения ПЛА; ДП – детектор перепада; ДИП – детектор импульсных помех; БАП – блок адаптивного переключения

Таким образом, достигается достаточный компромисс противоречивых динамических и статистических свойств нелинейных фильтров [1, 3-5] посредством получения оценок локальной (для n -го положения скользящего окна предварительного фильтра) сигнально-помеховой ситуации и выбора выходного сигнала $y^f(n)$ фильтра, наиболее подходящего для обработки текущего участка сигнала.

Структура нелинейных ЛАФ с ПЛА на основе Z-параметров является универсальной с точки зрения возможного применения для широкого класса сигналов при воздействии нестационарного шума с априорно неизвестной дисперсией [6, 7, 9], что присуще многим сигналам и затрудняет применение линейных фильтров [1, 2]. Иными словами, данные нелинейные ЛАФ робастны в широком смысле. В то же время при выборе фильтров – компонент ЛАФ следует учитывать специфику сигналов конкретных ИИС. При выборе нелинейных фильтров с высокими динамическими свойствами (СДФ) – сохраняющих резкие изменения сигнала, необходимо принимать во внимание виды характерных точек обрабатываемых сигналов, приблизительно оценивать их параметры. Выбор фильтров с высокими статистическими свойствами (ПШФ), обеспечивающими высокую степень подавления шума и устранения импульсных помех, опирается на знания о среднем уровне шума, вероятности выбросов.

2. Локально-адаптивные нелинейные фильтры с экстраполирующими КИХ-субапертурами

На основании анализа свойств различных нелинейных фильтров [3, 4] с целью улучшения динамических и статистических свойств методов локально-адаптивной нелинейной фильтрации: лучшего сохранения пиков и полиномиальных сигналов, повышения качества обработки скачков предлагаются ЛАФ (рис.1) на основе гибридных нелинейных фильтров, использующие линейные субапертуры с конечной импульсной характеристикой (КИХ). К таким фильтрам относятся экстраполирующий КИХ-гибридный медианный фильтр (ЭКГМФ), обеспечивающий высокие динамические свойства в области пика и высокое качество обработки скачка [4, 15-17]; α -урезанный КИХ-гибридный фильтр (АКГФ), имеющий высокие динамические и статистические свойства в области полиномиальных сигналов [4, 18]; КИХ-гибридный фильтр на основе порядковых статистик (КГФОС) с различными значениями параметра нелинейности, позволяющими изменять свойства фильтра в зависимости от приоритета противоречивых требований обработки по сохранению резких изменений сигнала и обеспечению высокой степени подавления шума [19].

Сигнал на выходе ЭКГМФ (рис. 2) [17] описывается по формуле

$$y^{\text{ЭКГМФ}}(n) = \text{med} \{ \hat{x}_{\text{fw}}^1(n), \hat{x}_{\text{fw}}^0(n), x(n), \hat{x}_{\text{bw}}^0(n), \hat{x}_{\text{bw}}^1(n) \}, \quad (4)$$

где $\hat{x}_{\text{fw}}^0(n) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x(n-i)$, $\hat{x}_{\text{bw}}^0(n) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x(n+i)$,

$$\hat{x}_{\text{fw}}^1(n) = \sum_{i=1}^k h(i)x(n-i), \hat{x}_{\text{bw}}^1(n) = \sum_{i=1}^k h(i)x(n+i) -$$

выходные значения КИХ-субапертур 0 и 1-го порядка, экстраполирующие сигнал $y(n)$ по k предыдущим (forward) и k последующим (backward) за текущим n -м отсчетом значениям сигнала в скользящем окне данных;

$h(i) = (4k - 6i + 2) / (k(k - 1))$ – коэффициенты экстраполяции 1-го порядка;

k – размер КИХ-субапертур фильтра.

Использование в (4) КИХ-субапертур 0-го порядка \hat{x}_{fw}^0 , \hat{x}_{bw}^0 повышает эффективность подавления шума в области скачка [16]. Введением экстраполирующих КИХ-субапертур 1-го порядка \hat{x}_{fw}^1 , \hat{x}_{bw}^1 расширяется набор стабильных точек (root signals) фильтра: в отсутствии помех ЭКГМФ помимо наклонного и резкого перепадов сигнала (“step edge”, “ramp edge”) полностью сохраняет пик [17].

Данный нелинейный фильтр относится к широкому классу КИХ-гибридных медианных фильтров, разработанных исходя из цели одновременного использования достоинств линейных (КИХ) операций и нелинейных оценок и преодоления недостатков стандартного медианного фильтра, которым при наличии помех утрачиваются высокие динамические свойства в области резких изменений сигнала: скачков, изломов, экстремумов [1, 2, 16, 17].

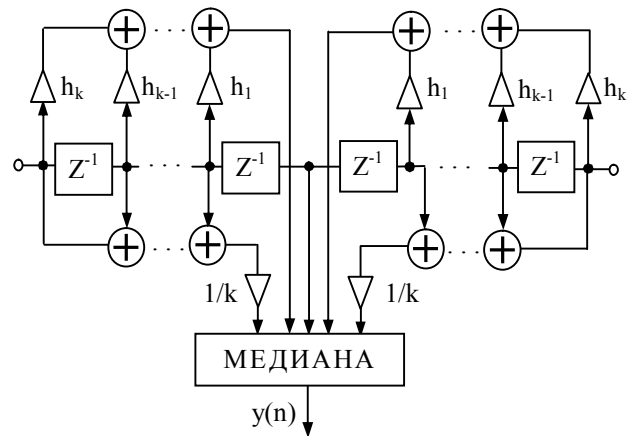


Рис. 2. Структурная схема ЭКГМФ:
 Z^{-1} – задержка в один отсчет;
 $N=2k+1$ – размер апертуры фильтра

Выходной сигнал медианного фильтра (МФ) определяется выбором центрального элемента из упорядоченной выборки входных значений в скользящем окне и описывается как

$$y^{\text{МФ}}(n) = \text{med} \{ x(n - (N - 1) / 2), x(n - (N - 1) / 2 + 1), \dots, x(n), \dots, x(n + (N - 1) / 2 - 1), x(n + (N - 1) / 2) \}, \quad (5)$$

где n – индекс центрального отсчета окна данных;

N – размер аперттуры скользящего окна фильтра.

МФ эффективно подавляет помехи, описываемые ПРВ с "тяжелыми хвостами" (экспоненциальной или засоренной выбросами и значениями из выборок с другими ПРВ). К стабильным точкам МФ относятся резкий и наклонный перепады [1, 2].

Сигнал на выходе АКГФ (рис. 3) задается выражением [4, 19]

$$y^{\text{АКГФ}}(n) = \frac{1}{N - 2[\alpha N]} \sum_{j=[\alpha N]+1}^{N-[\alpha N]} X^{(j)},$$

$$X = \{\hat{x}_{\text{fw}}^1(n), 2 \diamond \hat{x}_{\text{fw}}^0(n), x(n), 2 \diamond \hat{x}_{\text{bw}}^0(n), \hat{x}_{\text{bw}}^1(n)\} \quad (6)$$

где $X^{(1)} \leq X^{(2)} \leq \dots \leq X^{(j)} \leq \dots \leq X^{(N)}$ – упорядоченные элементы множества X в окне размером N ;

\diamond – оператор повторения соответствующего элемента заданным весом количество раз;

$[\alpha N]$ – параметр урезания, определяющий количество отбрасываемых порядковых статистик $X^{(j)}$, $j = \overline{1, N}$, в пределах аперттуры фильтра размером N , $\alpha < 0,5$.

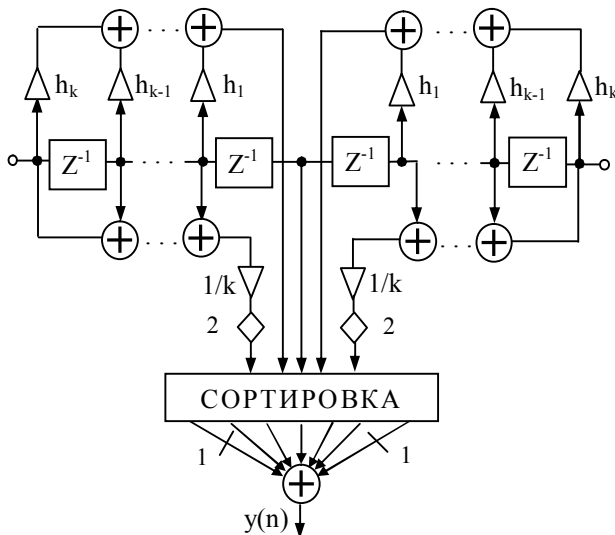


Рис. 3. Структурная схема АКГФ

Данный нелинейный фильтр сглаживает скачок, однако характеризуется минимальными ошибками и высокой степенью подавления шума в области гладких кривых [4,15]. Однако при неблизкой к нулю вероятности импульсных помех вместо АКГФ рекомендуется робастный α -урезанный фильтр (АУФ), незначительно уступающий АКГФ по динамическим и статистическим свойствам, однако эффективней устраняющий выбросы [4, 15].

Выходной сигнал АУФ [1, 2] описывается как

$$y^{\text{АУФ}}(n) = \frac{1}{N - 2 \cdot [\alpha N]} \sum_{j=[\alpha N]+1}^{N-[\alpha N]} X^{(j)}, \quad (7)$$

где $X^{(j)}$, $j = \overline{1, N}$ – порядковые статистики выборки

элементов $\{x(n - (N-1)/2), \dots, x(n + (N-1)/2)\}$ в пределах скользящего окна размером N .

АУФ устраняет выбросы, обеспечивает высокую степень подавления шума на линейно изменяющихся участках. К его достоинствам также относятся высокие динамические и статистические свойства при обработке полиномиальных сигналов. Недостаток данного фильтра – большие динамические ошибки в области скачка функции [3-5].

КГФОС (рис. 4) использует операцию взвешенного усреднения порядковых статистик упорядоченной выборки выходных значений линейных КИХ-субапертур. Выходной сигнал данного нелинейного фильтра описывается формулой [19]

$$y^{\text{КГФОС}}(n) = \sum_{m=1}^M c_m X^{(m)},$$

$$X = \{\hat{x}_{\text{fw}}^1(n), \hat{x}_{\text{fw}}^0(n), x(n), \hat{x}_{\text{bw}}^0(n), \hat{x}_{\text{bw}}^1(n)\}, \quad (8)$$

где M – размер упорядоченного множества X , включающего центральный элемент $x(n)$ окна и выходные значения КИХ-субапертур, $M=5$;

c_m – весовые коэффициенты, $\sum_{m=1}^M c_m = 1$.

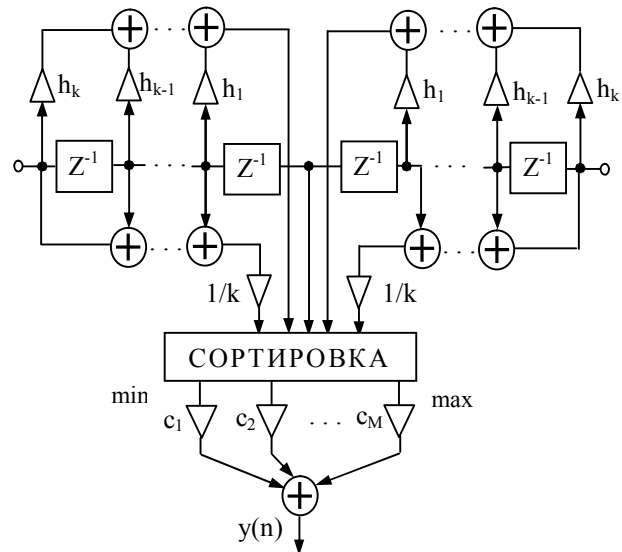


Рис. 4. Структурная схема КГФОС

Оптимальные весовые коэффициенты в зависимости от параметра $p \in [0; 1]$ определяются как

$$c_m(p) = \frac{c'_m(p)}{\sum_{j=1}^M c'_j(p)},$$

$$c'_m(p) = \begin{cases} \xi = 2p \{(M+1)/2 - |(M+1)/2 - m|\} + \\ + 4p + M(1 - 2p) - 3, & \text{если } \xi > 0, \\ 0, & \text{если } \xi \leq 0. \end{cases}$$

При $p=0$ все весовые коэффициенты $c_m=1/M$, что соответствует линейной операции усреднения; при $p=1$ имеем $c_{(M+1)/2}=1$, остальные коэффициенты $c_m=0$, – получаем нелинейную медианную оценку.

Параметр p расширяет количество степеней свободы фильтра. Варьированием p изменяют степень нелинейности свойств КГФОС, стремясь достичь приемлемого компромисса по сохранению резких изменений сигнала, с одной стороны, и обеспечению высокой степени подавления шума, с другой [1, 13, 19].

В результате анализа свойств КИХ-гибридных нелинейных фильтров [4] предлагаются следующие ЛАФ: $A1'$ на основе ЭКГМФ (4) и АКГФ (6), $N=13$, $[\alpha N]=1$; $A1''$ на основе КГФОС (8) со значениями параметра нелинейности $p=1$ и $p=0,4$, $N=13$ и АКГФ (6), $N=13$, $[\alpha N]=1$. Предложенные ЛАФ будем сравнивать с базовым методом $A1$ на основе МФ (5), $N=5$ и АУФ (7), $N=9$, $[\alpha N]=2$, АУФ, $N=13$, $[\alpha N]=3$, имеющим наилучшие интегральные показатели качества обработки сигналов с различным типом поведения информативной компоненты в условиях смешанного аддитивного и мультипликативного шума и малой вероятности выбросов [7-10].

Данные нелинейные ЛАФ, использующие Z -параметры (1-3), описываются выражениями

$$y^{A1}(n) = \begin{cases} y^{MФ5}(n), & (Z_2^t \leq Z(n) < 1) \vee (Q_Z > Q_Z^t); \\ y^{AУФ9}(n), & (Z_1^t \leq Z(n) < Z_2^t); \\ y^{AУФ13}(n), & (0 \leq Z(n) < Z_1^t), \end{cases} \quad (9)$$

$$y^{A1''}(n) = \begin{cases} y^{ЭКГМФ13}(n), & \\ (Z_2^t \leq Z(n) < 1) \vee (Q_Z > Q_Z^t); \\ y^{АКГФ13}(n), & \\ (0 \leq Z(n) < Z_2^t), \end{cases} \quad (10)$$

$$y^{A1''}(n) = \begin{cases} y^{КГФОС13(1)}(n), & \\ (Z_2^t \leq Z(n) < 1) \vee (Q_Z > Q_Z^t); \\ y^{КГФОС13(0,4)}(n), & \\ (Z_1^t \leq Z(n) < Z_2^t); \\ y^{АКГФ13}(n), & \\ (0 \leq Z(n) < Z_1^t), \end{cases} \quad (11)$$

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

Применение гибридных нелинейных фильтров ЭКГМФ (4), КГФОС (8) и АКГФ (6) в структуре ЛАФ с "жестким" переключением (рис.1) обусловлено адаптивным использованием как различных динамических, так и статистических (по степени подавления шума) свойств данных нелинейных фильтров. В зависимости от характера поведения сигнала используются либо высокие динамические свойства ЭКГМФ в области скачков, пиков, изломов либо "промежуточные" характеристики КГФОС ($p=0,4$) при среднем уровне шума и свойства АКГФ хорошо сохранять полиномиальные кривые. Одновременно адаптивно комбинируются достоинства

данных нелинейных фильтров по подавлению шума: ЭКГМФ в окрестности скачков и КГФОС и АКГФ в области пика, линейных и полиномиальных сигналов [4, 15, 20]. Таким образом, достигается приемлемый компромисс противоречивых требований по сохранению резких изменений сигнала вида скачков, пиков, изломов, с одной стороны, и гладких кривых, с другой, и одновременно обеспечению высокой степени подавления шума на этих участках.

В случае, когда обрабатываемые сигналы содержат скачки, следует использовать в качестве ПЛА квазиразмах Q_Z (3) [8-10], при $Q_Z > Q_Z^t$ обработка локального участка сигнала проводится СДФ-компонентом ЛАФ (рис.1), характеризующимся сохранением точек разрыва производной [1-5].

В условиях импульсных помех рекомендуется применение их детектора на основе совместного анализа параметров Z (1) и Z^S (2), которые в окрестности выброса ведут себя по-разному [8-10] (соответствующие ЛАФ обозначены как $A2$, $A2'$, $A2''$).

Детектор импульсных помех на основе Z -параметров (1-2) описывается формулой

$$\begin{cases} n_s > 0, & \text{если } (Z(n) > Z_2^t) \wedge (Z^S(n) < Z_2^t) \vee \\ & \vee (Z(n) > Z_2^t) \wedge (Z^S(n) < -Z_2^t); \\ n_s < 0, & \text{если } (Z(n) < -Z_2^t) \wedge (Z^S(n) > -Z_2^t) \vee \\ & \vee (Z(n) < -Z_2^t) \wedge (Z^S(n) > Z_2^t); \end{cases} \quad (12)$$

где $|n_s| > 3 \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\mu^2}$ - импульсная помеха;

σ_a^2 , σ_μ^2 - дисперсии аддитивного и мультипликативного шума;

$Z_2^t \approx 0,4$ - пороговое значение.

В условиях импульсных помех для расчета Z -параметров (1-3) следует использовать предварительный фильтр со средними динамическими и статистическими свойствами и высокой робастностью - АУФ (7), $N=9$, $[\alpha N]=2$ [8, 9], а при отсутствии или малой вероятности выбросов эффективней применение АКГФ (6), $N=13$, $[\alpha N]=1$ [15].

3. Модель сигнала и помех, критерии эффективности

Большинство сигналов ИИС отображают нестационарные процессы с отличающимся типом поведения информативной компоненты. В связи с этим для исследования эффективности нелинейных фильтров выбрана комплексная модель тестового воздействия (рис.5), включающая различные характерные для реальных систем элементарные сигналы.

Используя данную комплексную модель тестового сигнала [9], можно оценить качество фильтрации по локальным критериям для отдельных видов

сигналов и по интегральным показателям, в целом характеризую эффективность фильтра, в том числе при ограниченных сведениях о модели информативной компоненты, так как тестовый сигнал включает практически все характерные для одномерных процессов элементарные сигналы.

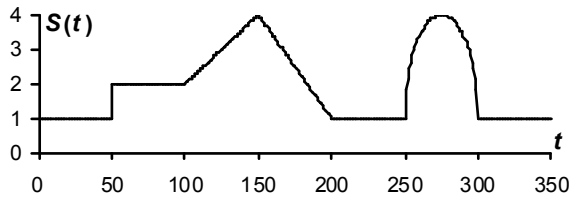


Рис. 5. Комплексная модель тестового сигнала

Для описания помехи использована модель

$$n(t_i) = n_a(t_i) + n_\mu(t_i) + n_s(t_i), \quad (13)$$

где $n_a(t_i)$ - аддитивный гауссов шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_a^2 ;

$n_\mu(t_i)$ - мультипликативный шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_μ^2 , зависящей от амплитуды сигнала $S(t_i)$ по закону $\sigma_\mu^2 = k_0(S^2(t_i))$, коэффициент $k_0 \in [0; 0,1]$;

$n_s(t_i)$ - импульсная помеха, с вероятностью P_s принимающая значения $n_s > 3\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\mu^2}$;

t_i - i -й отсчет наблюдаемой на входе ИИС последовательности $x(t_i) = S(t_i) + n(t_i)$.

Для получения статистических оценок качества фильтрации применены общепринятые критерии среднеквадратической ошибки (СКО) и отношения сигнал-шум (ОСШ) [1], вычисляемые по формулам

$$\chi_{i_1-i_2} = \sum_{i=i_1}^{i_2} (U_i^f - S_i)^2 / (i_2 - i_1 + 1), \quad (14)$$

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

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

$S_i = S(t_i)$ - истинное значение сигнала для i -го момента времени t_i ;

$$q = 10 \lg(P_S/P_n), \quad (15)$$

где $P_S = \sum_{i=1}^I (S_i - \bar{S})^2 / I$ - мощность сигнала;

$$P_n = \sum_{i=1}^I (U_i^f - S_i)^2 / I - \text{мощность шума};$$

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^I S_i / I - \text{среднее значение сигнала};$$

I - длительность реализации сигнала.

4. Анализ эффективности нелинейных локально-адаптивных фильтров

Рассмотрим ситуации воздействия аддитивного гауссова шума с различным уровнем дисперсии: низким ($\sigma_a^2=0,001$), средним ($\sigma_a^2=0,01$) и высоким

($\sigma_a^2=0,03$); различного уровня смешанного аддитивного и мультипликативного шума; смешанных аддитивных и импульсных помех (см. табл.1). Для устойчивости количественных результатов оценки эффективности вычислены усредненные показатели СКО (14) и ОСШ (15) для большого числа реализаций N_R . В отсутствие импульсных помех выбрано $N_R=200$, при их наличии - $N_R=500$.

На основе статистических оценок эффективности нелинейных ЛАФ сделаем практические рекомендации по их применению.

ЛАФ А1-А2 1) имеют высокие динамические свойства и наилучшее качество обработки локального участка точки стыка "плоского" участка и параболы при низком уровне шума; 2) обеспечивают высокую эффективность устранения выбросов.

ЛАФ А1'-А2': 1) имеют наименьшие значения СКО для линейных участков; 2) характеризуются высокими динамическими и статистическими свойствами при обработке скачка, излома, пика, параболы; 3) имеют наименьшие показатели СКО в области полиномиального сигнала в широком диапазоне изменения дисперсии шума; 4) в отсутствие выбросов обеспечивают наилучшие и близкие к наилучшим интегральные значения ОСШ и СКО.








ЛАФ А1''-А2'': 1) также как и А1'-А2' обеспечивают достаточный компромисс противоречия высоких динамических свойств в области резких изменений вида скачка, пика, излома, с одной стороны, и полиномиальных кривых, с другой, и высокой степени подавления шума; 2) в отсутствие выбросов имеют наилучшие свойства в области пика и скачка; 3) при возрастании дисперсии шума обеспечивают наименьшие интегральные показатели СКО.

Сравнение эффективности предложенных нелинейных ЛАФ (10-11) с базовым методом (9) показывает улучшение локальных и интегральных показателей качества при возрастании дисперсии шума. Уменьшение интегральных значений СКО составляет 15- 20 % , а увеличение ОСШ в широком диапазоне низкого- высокого уровня шума - на 0,5- 1,8 дБ. По локальным показателям СКО уменьшилась в области скачка в 1,5- 2 раза, пика и излома - на 20- 35 %, полиномиального сигнала - на 23-36 %.

На локальных интервалах сигнала (рис.5) показатели СКО в сравнении с исходным сигналом в диапазоне низкого- высокого уровня шума следующие. Для "плоского" участка СКО на выходе нелинейных ЛАФ уменьшилась примерно в 8,5- 11 раз, а для линейно возрастающего сигнала - в 6,7- 8,7 раз. В области скачка СКО уменьшилась в 1,5- 3,2 раза, излома - в 4- 8 раз, пика - в 2,3- 5,6 раз, точки стыка "плоского" участка и гладкой кривой - в 1,6- 2,2 раз, а окрестности параболы - в 3,6- 8,5 раз (табл. 1).

Таблиця 1

Статистические оценки эффективности нелинейных локально-адаптивных фильтров по критериям ОСШ и СКО для условий различного уровня шума, ppm.

Тип фильтра	q, дБ	χ_t	χ_{10-40} 	χ_{40-60} 	χ_{90-110} 	$\chi_{110-140}$ 	$\chi_{140-160}$ 	$\chi_{240-260}$ 	$\chi_{265-285}$ 
1) низкий уровень гауссова шума: $\sigma_a^2=0,001$; $N_R=200$;									
Входной	30,7	1010	1080	1020	1000	1010	970	1020	1010
A1	36,0	280	130	360	270	150	580	630	380
A1'	36,6	300	120	350	220	160	480	1010	280
A1''	35,6	300	130	330	240	180	430	960	310
2) средний уровень гауссова шума: $\sigma_a^2=0,01$; $N_R=200$;									
Исходный	20,7	10140	10820	10180	9990	10150	9660	10200	10130
A1	27,8	2390	1270	6820	1710	1470	2770	5320	1970
A1'	29,6	2100	970	4160	1320	1360	2680	5730	1620
A1''	27,9	2000	1090	3450	1440	1400	2260	5240	1970
3) высокий уровень гауссова шума: $\sigma_a^2=0,03$; $N_R=200$;									
Входной	15,9	30410	32470	30550	29970	30440	28970	30590	30400
A1	23,5	6840	3810	21380	4400	4210	6400	16370	4920
A1'	24,2	6080	2900	17610	3340	3520	5310	17980	3890
A1''	23,3	5810	3100	16000	3700	3620	5210	14200	4250
4) низкий уровень аддитивного и мультипликативного шума: $\sigma_a^2=0,003$, $k_0=0,001$, $N_R=200$;									
Входной	21,3	8090	4190	5340	7500	12050	16430	7350	19090
A1	28,6	1770	550	2380	1330	1640	3910	4190	2930
A1'	28,7	1800	400	1690	1080	1490	3470	6190	2360
A1''	29,1	1760	400	1770	1070	1680	3500	4920	2930
5) средний уровень аддитивного и мультипликативного шума: $\sigma_a^2=0,01$, $k_0=0,001$, $N_R=200$;									
Входной	18,3	15130	11530	12280	14480	19220	23170	14290	26410
A1	25,6	3440	1470	8830	2210	2540	5070	8040	3950
A1'	26,9	3130	1120	4920	1800	2220	4170	10250	3090
A1''	25,9	3000	1070	4450	1800	2440	4340	8590	3730
6) аддитивные и импульсные помехи: $\sigma_a^2=0,01$; $P_s=0,02$, $n_s=1,0$; $N_R=500$.									
Входной	-	30630	32420	31710	29080	30230	29350	30700	30760
A2	-	3260	1490	7740	1810	1510	3610	10720	2560
A2'	-	3210	1160	7890	1780	1500	4620	9880	3190
A2''	-	3180	1200	8240	1890	1600	4760	8720	2900

В целом, для обработки комплексного сигнала (рис. 5) в широком диапазоне изменения дисперсии аддитивного и смешанного аддитивного и мультипликативного шума нелинейными ЛАФ в сравнении с исходным сигналом обеспечивается увеличение ОСШ на 5 - 9 дБ, а СКО в 3,6- 5,2 раз.

В условиях импульсных помех эффективность нелинейных ЛАФ в сравнении с ситуациями отсутствия выбросов по локальным и интегральным значениям СКО возрастает в единицы раз (табл. 1).

Обработка модельного сигнала в условиях аддитивного и мультипликативного шума (рис. 6) не-

линейными ЛАФ показывает их высокие динамические и статистические свойства в области комплексных сигналов, содержащих фрагменты различных видов элементарных сигналов.

Применение нелинейных ЛАФ для обработки ЭКГ высокого разрешения (рис. 7) демонстрирует высокую эффективность подавления нестационарного электромиографического шума [20].

Обработка других ЭКГ-сигналов (рис. 8, 9) показывает высокое качество подавления различного уровня шума и сохранения информативной компоненты сигнала при обеспечении устойчиво-

сти к априорной неопределенности модели поведения сигнала и дисперсии шума. При этом нелинейные ЛАФ на основе Z-параметров не требуют предварительной оценки дисперсии, время на

адаптацию параметров, имеют простую реализацию, небольшой размер скользящего окна, позволяющие осуществлять оперативную обработку в реальном времени.

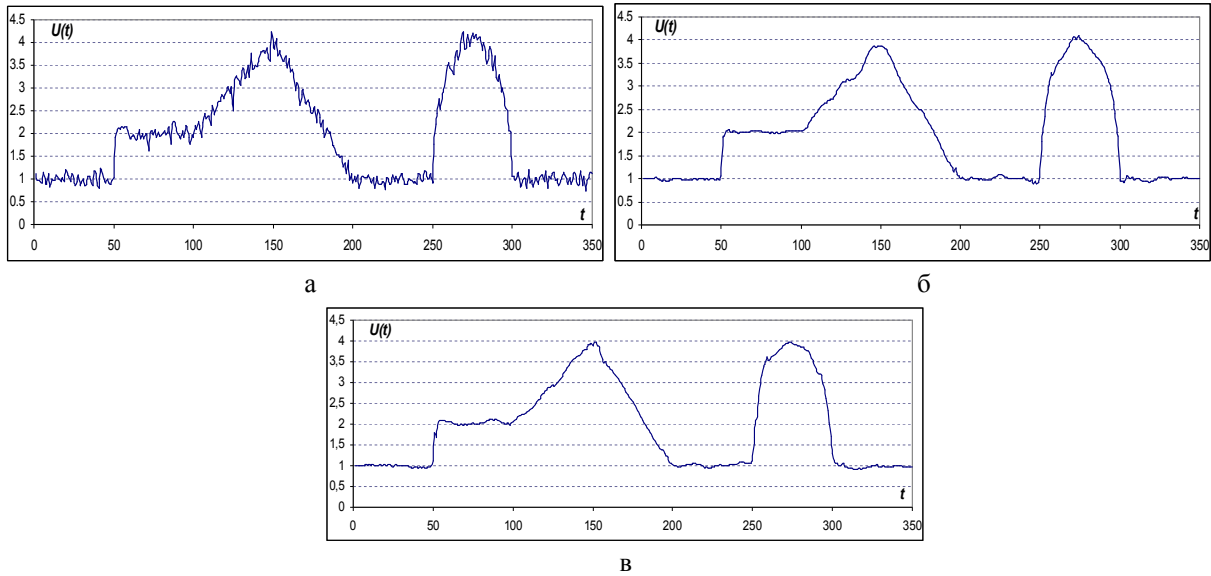


Рис. 6. Применение нелинейных ЛАФ на тестовом сигнале: а – входной сигнал с аддитивным и мультипликативным шумом; б – сигнал на выходе ЛАФ А1'; в – сигнал на выходе ЛАФ А1''

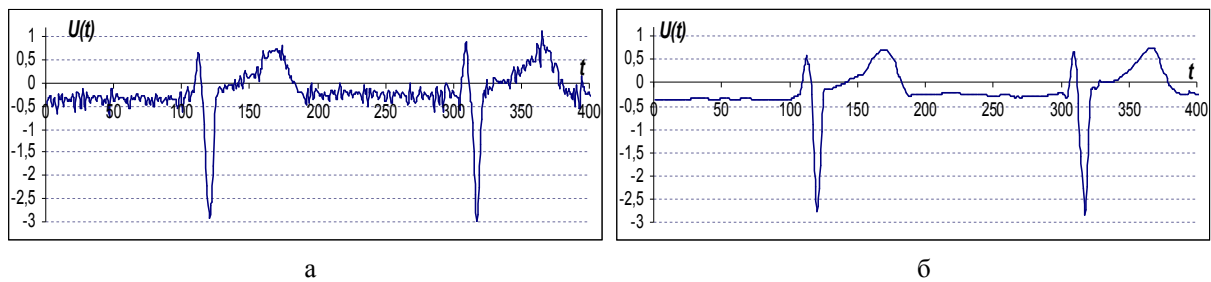


Рис. 7. Нелинейная локально-адаптивная фильтрация ЭКГ (разрешение сигнала 4,88 $\mu\text{В/б}$, частота дискретизации 200 Гц): а - входной сигнал с электрокардиографическим шумом; б – сигнал на выходе нелинейного ЛАФ А''

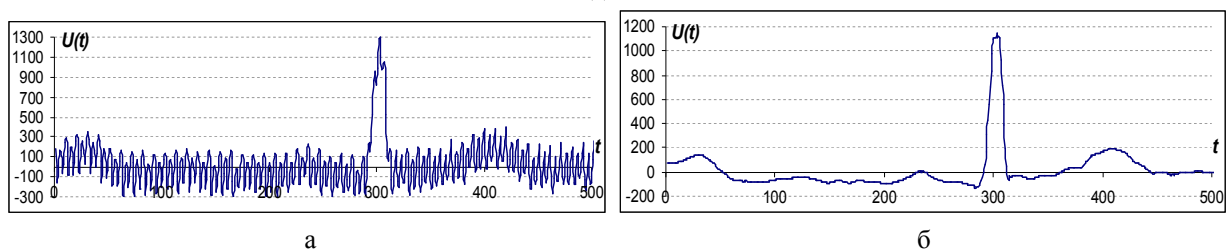


Рис. 8. Нелинейная локально-адаптивная фильтрация ЭКГ при среднем уровне шума (частота дискретизации 400 Гц): а – входной сигнал при; б – сигнал на выходе ЛАФ А''

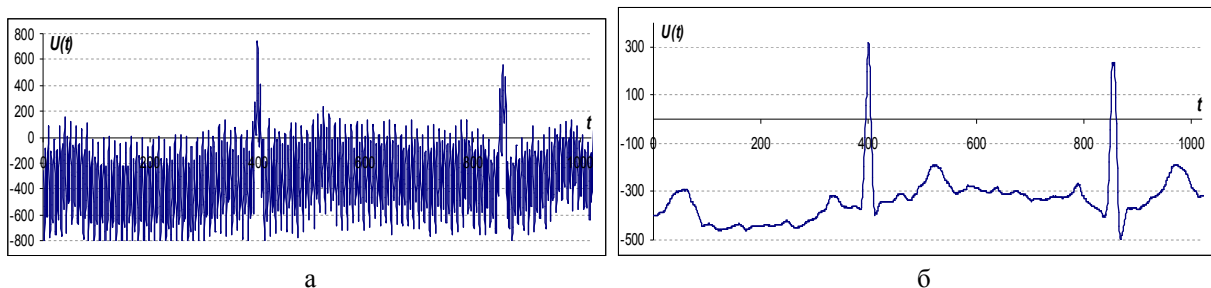


Рис. 9. Нелинейная локально-адаптивная фильтрация ЭКГ при высоком уровне шума: а – входной сигнал при частоте дискретизации 400 Гц; б – сигнал на выходе ЛАФ А'' (фильтрация выполнена дважды)

Выводы

В результате анализа эффективности предложенных методов локально-адаптивной нелинейной фильтрации на основе гибридных нелинейных фильтров, использующих экстраполирующие КИХ-субапертуры, можно сделать следующие выводы:

1. Методы ЛА нелинейной устойчивой фильтрации обеспечивают высокие интегральные показатели качества обработки одномерных сигналов с различным типом поведения информативной компоненты в широком диапазоне изменения дисперсии аддитивного и смешанного аддитивного и мультипликативного шума и при наличии выбросов и устойчивость к априорной неопределенности модели локального поведения сигнала и дисперсии шума.

2. Предложенные нелинейные ЛАФ обеспечивают достаточный компромисс противоречивых динамических и статистических свойств нелинейных фильтров: сохраняют характерные точки сигнала вида скачков, пиков, изломов, гладких экстремумов и обеспечивают высокую степень подавления различного уровня шума в их окрестностях.

3. Сравнение эффективности нелинейных ЛАФ с базовым методом, обеспечивающим наилучшие интегральные показатели качества в условиях смешанного аддитивного и мультипликативного шума и малой ($P < 0,03$) вероятности выбросов, для комплексной модели одномерного сигнала показывает улучшение локальных в области скачка, пика, излома и полиномиальной кривой и интегральных показателей качества. Улучшение в эффективности следующее: по критерию СКО в области скачка в 1,5- 2 раза; пика и излома – на 20- 35 %, параболы – 23- 36 %, по интегральным показателям СКО на 15- 20 %, ОСШ – на 0,6 - 1,8 дБ;

4. Рассмотренные нелинейные ЛАФ не требуют предварительной оценки дисперсии шума, время на обучение (адаптацию параметров фильтра), имеют высокое быстродействие в реальном времени.

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. Лукин, В.В. *Динамические и статистические свойства алгоритмов нелинейной фильтрации одномерных информационных сигналов [Текст]* / В.В. Лукин // *Авиационная и ракетно-космическая техника: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – Вып. 7.– X., 1998. – С. 134-141.*

4. 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. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – Вып. 12. – X., 1999. – С. 109-113.*

5. *Dynamic Characteristics of Some Nonlinear 1-D Filters [Text]* / S.K. Abramov, N.O. Tulyakova, V.V. Lukin, V.P. Melnik // *FINSIG'99: Proc. of the 1999 Finnish Signal Processing Symposium, May 31, 1999. – Oulu (Finland), 1999. – P. 184-188.*

6. *Локально-адаптивные устойчивые алгоритмы обработки радиоизображений / А.А. Зеленский, Г.П. Кулемин, В.В. Лукин, В.П. Мельник; ин-т радиозлектроники НАН Украины. – X., 1993. – 39 с. – Препр.: 93-143.*

7. Зеленский, А.А. *Локально-адаптивные алгоритмы устойчивой фильтрации информационных данных [Текст]* / А.А. Зеленский, В.В. Лукин, А.Б. Погребняк // *Функционирование радиотехнических систем в условиях негауссовых помех: сб. научно-техн. тр. – М.: МТИ, 1992 – С. 45-53.*

8. Лукин, В.В. *Анализ поведения показателей локальной активности для нелинейных адаптивных фильтров [Текст]* / В.В. Лукин // *Радиофизика и электроника. – 1998. – Вып. 3, № 2. – С. 80-89.*

9. *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. Melni // *NSIP'99: Proc. of the IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, June 20-23, 1999. – Antalya (Turkey), 1999. – Vol.I. – P. 287-291.*

10. Лукин, В.В. *Цели, методы и алгоритмы локально-адаптивной устойчивой фильтрации радиокационных изображений [Текст]* / В.В. Лукин // *Космічна наука і технологія. – №2/3. – Киев, 1998. – С. 39-50.*

11. Pitas, I. *Order statistics in digital image processing [Text]* / I. Pitas, Venetsanopoulos // *Proc. IEEE. – Dec. 1992. – Vol.80, No.12. – P. 1892-1919.*

12. Plataniotis, K. *Vector processing // Color Image Processing [Text]* / K. Plataniotis, A.N. Venetsanopoulos; ed. S. Sangwine. – London: Chapman & Hall, 1998. – P. 188-209.

13. *Nonlinear Signal and Image Processing: Theory, Methods, and Applications (Electrical Engineering & Applied Signal Processing Series) [Text]* / Ed. by K. Barner and G. Arce. – CRC Press. – 2003. – 560 p.

14. Djurović, I. *Robast L-estimation based forms of signal transforms and time-frequency representations [Text]* / I. Djurović, L. J. Stanković // *IEEE Trans. Sig. Proc. – July 2003. – Vol.51, No.7. – P. 1753-1761.*

15. Тулякова, Н.О. *Применение КИХ-гибридных нелинейных фильтров в локально-адаптивных алгоритмах на основе Z-параметров / Н.О. Тулякова // Вісник Сумського державного університету. – 2002. – № 1 (34). – С. 41-50.*

16. Heinonen, P. *Median-type filters with linear substructures [Text]* / P. Heinonen, J. Astola, Y. Neuvo //

Proc.IEEE ISCAS-86.–Tampa, FL, March, 1986. – P. 357-360.

17. *Heinonen, P. Median type filters with predictive FIR substructures [Text]/ P. Heinonen, Y. Neuvo // IEEE Trans. Acoust. Speech and Signal Process. – 1988. – Vol. 36, № 6. – P. 892-899.*

18. *Weighted FMH filters [Text] / J. Neejärvi, A. Vrri, S. Fotopoulos, Y. Neuvo // Signal Processing. – 1993. – Vol. 31. – P. 181-190.*

19. *Värri, A. Algorithms and Systems for the Analysis of Long-Term Physiological Signals [Text]:*

Thesis for the degree of Doctor of Technology / Alpo Varri. – Tampere University of Technology (Finland), May, 1992. – 60 p.

20. *Колодяжний, В.М. Методы локально-адаптивной нелинейной фильтрации сигнала электрокардиограммы [Текст] / В.М. Колодяжний, Н.О. Тулякова // Радиотехника: Всеукр. міжведом. науч.-техн. сб. Харківського національного університету радіоелектроніки. – Вып.164. – X., 2011. – С. 108-119.*

Поступила в редакцію 23.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. приема, передачи и обработки сигналов В.В. Лукин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

МЕТОДИ ЛОКАЛЬНО-АДАПТИВНОЇ СТІЙКОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ З ЛІНІЙНИМИ СУБАПЕРТУРАМИ З КІНЦЕВОЮ ІМПУЛЬСНОЮ ХАРАКТЕРИСТИКОЮ

А.І. Бух, Н.О. Тулякова

Удосконалений метод локально-адаптивної нелінійної фільтрації з “жорстким” перемиканням за рахунок включення в його структуру нелінійних гібридних фільтрів, що використовують екстраполюючі КІХ-субапертури, це дозволяє поліпшити локальні й інтегральні показники якості фільтрації сигналів з різною поведінкою інформативної компоненти в широкому діапазоні зміни дисперсії гаусова адитивного та змішаного (адитивного та мультиплікативного) шуму, при малій ймовірності викидів. У результаті аналізу статистичних оцінок якості для модельного одномірного сигналу, що включає різні елементарні сигнали, показано досягнення високих показників ефективності за критеріями середньоквадратичної помилки й відношення сигнал-шум. Застосування для обробки електрокардіографічних сигналів показує високу якість придушення різного рівня шуму і збереження інформативної компоненти при забезпеченні стійкості до апіорної невизначеності моделі сигналу та дисперсії шуму та високої швидкодії.

Ключові слова: локально-адаптивна стійка фільтрація, гібридні нелінійні фільтри з екстраполюючими КІХ- субапертурами, обробка електрокардіограм у реальному часі.

METHODS OF LOCALLY ADAPTIVE ROBUST FILTERING WITH LINEAR FINITE IMPULSE RESPONSE SUB-APERTURES

A.I. Bykh, N.O. Tulyakova

A method of locally adaptive nonlinear filtering with hard switching is modified with introducing nonlinear hybrid filters using predictive FIR sub-apertures. This allows improving local and integral indicators of processing quality for signals with different behavior of information component for a wide range of changing variance of additive Gaussian noise and mixed (additive and multiplicative) noise and small probability of outliers. As the result of statistical analysis of statistical criteria for model 1D signal that contains different elementary fragments, it is shown that high efficiency of filtering according to MSE and SNR criteria is reached. Application for processing ECG signals shows high efficiency of suppressing noise with different intensity and preservation of information component with insensitivity to a priori ambiguity on signal model and noise intensity with high efficiency.

Keywords: locally adaptive robust filtering, hybrid nonlinear filters with predictive FIR sub-apertures, ECG processing in real time.

Бух Анатолий Иванович – д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. биомедицинских электронных устройств и систем Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина, e-mail: bykh@kture.kharkov.ua

Тулякова Наталия Олеговна – мл. науч. сотр. каф. биомедицинских электронных устройств и систем Харьковского национального университета радиоэлектроники, e-mail: natashatu@ukr.net.