

НЕЛИНЕЙНЫЕ АДАПТИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОДНОМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Лукин В. В., Зеленский А. А., Тулякова Н. О.

310070, г. Харьков, ул. Чкалова, 17,

Государственный Аэрокосмический Университет (ХАИ), каф. 507

тел./факс (0572) 44 11 86 , e-mail : lukin@xai.kharkov.ua

Abstract

Lukin V., Zelenskiy A., Tulyakova N. The novel nonlinear adaptive filters for processing the signals corrupted by noise with nonstationary characteristics are proposed and investigated. They are based on iterative procedure assuming preliminary filtering, Z-parameter calculation and analysis with further adaptive selection of nonlinear filter parameters for local processing of signals. It is shown that the proposed adaptive approach provides a good trade-off of filter properties: noise suppression and spike removal ability combined with edge preservation property and low level of residual dynamic errors. The efficiency of proposed techniques and algorithms is confirmed by example.

Введение

Типичной структурой информационно-измерительной системы, осуществляющей контроль параметров (состояний объектов), является первичный измерительный преобразователь физической величины (датчик), усилитель (может отсутствовать) и блок регистрации и обработки сигналов (процессов). На входе последнего часто используют АЦП, что позволяет реализовать сложные алгоритмы анализа и цифровой обработки сигналов (последовательности оценок параметров) [1].

При обработке сигналов рассматриваемого класса обычные линейные методы цифровой обработки можно использовать только, если верно априорное предположение о стационарном характере сигнала и помех. Однако часто информационные сигналы имеют нестационарную природу (изменчивость во времени спектральных и статистических характеристик, наличие резких скачков), а реальный характер распределения помех не соответствует Гауссовскому закону, возможно наличие выбросов (аномальных измерений)

[2]. В таких случаях применимы нелинейные фильтры, в частности те из них, которые основаны на порядковых статистиках [3].

Свойства нелинейных фильтров, локально-адаптивный подход

Разработано достаточное количество алгоритмов и методов нелинейной обработки сигналов, обладающих рядом преимуществ для различных моделей сигналов и помех. Выбор соответствующего нелинейного фильтра, использование которого наиболее целесообразно в конкретной ситуации, для эффективной обработки информационных сигналов является важной задачей. Нестационарность шума и специфическое поведение информационного сигнала обуславливают необходимость использования адаптивных нелинейных методов обработки, позволяющих идентифицировать различные ситуации и соответственно использовать наиболее оптимальный для данного участка фильтр [3]. Иными словами, желательно, чтобы алгоритм фильтрации учитывал особенности поведения обрабатываемых процессов и свойства помех в пределах скользящего окна.

Основная идея локальной адаптации заключается в следующем [3-5]: для окрестности каждого текущего отсчета "анализируется" поведение сигнала и характеристики помех (рассчитываются показатели локальной активности (ПЛА), которые затем сравниваются с пороговыми значениями) и соответственно осуществляется выбор нелинейного однопроходного фильтра, использование которого представляется целесообразным для данного участка.

Нелинейные фильтры [3], которые предполагается использовать в качестве компонент адаптивного алгоритма, обладают рядом преимуществ при обработке сигналов, содержащих участки с резкими изменениями (скачками) значений, разрыва производной, участки с большим значением второй производной (экстремумы). Кроме того, нелинейные алгоритмы фильтрации обладают робастными свойствами, т. е. способностью сохранять работоспособность в условиях наличия импульсных помех. Однако свойства большинства нелинейных фильтров еще недостаточно исследованы и не всегда

могут быть описаны аналитически [3,4]. Возникает задача исследовать динамические и статистические свойства нелинейных фильтров для разнообразных видов сигналов: изучить специфические эффекты; динамические ошибки в окрестности импульсной помехи, зависимость эффективности подавления флуктуационных помех от отношения $\Delta S/\sigma_n$: ($\Delta S_i = |S_{i+1} - S_i|$, $\sigma_n = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\mu^2}$), где σ_a^2 , σ_μ^2 - дисперсии аддитивных и мультипликативных помех).

В работах [5,6] для различных размеров скользящего окна были проанализированы свойства нескольких типов нелинейных фильтров: Вилкоксона, Ходжеса-Лемана, α -урезанного фильтра, и получены приближенные выражения для их динамических и статистических характеристик в сравнении с характеристиками линейного фильтра. В качестве тестовых сигналов были рассмотрены: скачок, окрестности экстремумов и точек соединения ломаных, "траекторная кривая", описываемая выражением $S(t_i) = h_0 + k_a \arctg(\gamma t_i)$; $t_i = (i - i_0)\Delta t$, где γ - переменный параметр; Δt - временная дискретность. Отмечены специфические эффекты, например, появление ступеньки промежуточного уровня для выходного сигнала фильтра Вилкоксона. Динамические и статистические характеристики определены для различных уровней помех и параметров сигналов. В результате получены следующие приближенные выражения

$$\Delta^W \approx 0.9 \cdot \Delta^l, \quad \Delta^H \approx 0.85 \cdot \Delta^l, \quad \Delta^\alpha \approx 0.6 \cdot \Delta^l, \quad (1)$$

где Δ^W , Δ^H , Δ^α , Δ^l — динамические ошибки фильтров Вилкоксона, Ходжеса-Лемана, α -урезанного и линейного фильтров.

$$\sigma_W^2 \approx \sigma_H^2 \approx 1.2 \cdot \sigma_l^2, \quad \sigma_a^2 \approx 1.35 \cdot \sigma_l^2, \quad (2)$$

где σ_W^2 , σ_H^2 , σ_a^2 , σ_l^2 — дисперсии остаточных флуктуаций фильтров Вилкоксона, Ходжеса-Лемана, α -урезанного и линейного фильтров.

В случае наличия выбросов в пределах скользящего окна обнаружено, что наименьшая ошибка имеет место при использовании стандартного

медианного фильтра с малым размером апертуры. Поэтому данный фильтр рекомендуется использовать в окрестности выбросов при локально-адаптивном подходе. Однако лучшим решением является предварительное детектирование и устранение выбросов. Основным недостатком медианного фильтра является низкая эффективность на линейно изменяющихся участках [4].

Предлагаемые локально-адаптивные алгоритмы фильтрации

Предлагаемый адаптивный алгоритм предполагает использование предварительной обработки сигнала нелинейным фильтром со средними характеристиками (например, α - урезанный, Вилкоксона, с размером апертуры $N_p=9$). Затем рассчитываются показатели локальной активности (ПЛА) проводится их анализ - сравнение с пороговыми значениями.

Предлагается использовать следующие ПЛА :

$$Z_i = \frac{\sum_{j=i-\frac{N_p-1}{2}}^{i+\frac{N_p-1}{2}} (U_j^f - U_j)}{\sum_{j=i-\frac{N_p-1}{2}}^{i+\frac{N_p-1}{2}} |U_j^f - U_j|}, \quad (3)$$

где U_i^f - выходной сигнал предварительного нелинейного фильтра, например, α - урезанного или Вилкоксона с апертурой N_p равной 7 или 9 элементов.

$$Z_i^S = \sum_{j=i-\frac{N_p-1}{2}}^{i+\frac{N_p-1}{2}} \text{sign}(U_j^f - U_j) / N_p, \quad \text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x > 0, \\ 0, & \text{if } x = 0, \\ -1, & \text{if } x < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Математическое ожидание Z-параметра зависит от динамической ошибки предварительного нелинейного фильтра Δ_D и СКО σ_n , вернее от их отношения $\beta = |\Delta_D| / \sigma_n$ и определяется выражением: $\langle |Z_i| \rangle \approx \beta_i / (0.8 + 0.1\beta_i + 0.3\beta_i^2)$. Значения Z-параметров превышают пороговые в области "локально-активных" фрагментов: "скачка" (с обеих сторон), экстремума, перегиба ломанной и т. п., что ведет к рекомендации использовать нелинейные фильтры, обеспечивающие минимум динамических ошибок и робастность (медианный фильтр с малым

размером апертуры $N_p=5$). Значения Z -параметров меньше порогов в “локально-пассивных” областях: сигнальная составляющая ведет себя приблизительно линейно, импульсные помехи отсутствуют, тогда целесообразно применять фильтры, эффективно подавляющие флуктуационные помехи (фильтры Вилкоксона, Ходжеса-Лемана, α -урезанные с большим размером апертуры, $N_p=13$).

Совместный анализ Z и Z^S позволяет детектировать и, следовательно, устранять выбросы. Однако значения параметров Z и Z^S близки к нулю в точке перепада. Поэтому предлагается использовать детектор перепадов на основе квазиранга:

$$Q_i^Z = Z_i^{(q)} - Z_i^{(p)}, \quad q > p, \quad q - p \approx \frac{N_p}{2}, \quad (5)$$

Иллюстрация функционирования адаптивного фильтра в случае наличия аддитивных и импульсных помех приведена на рис. 1

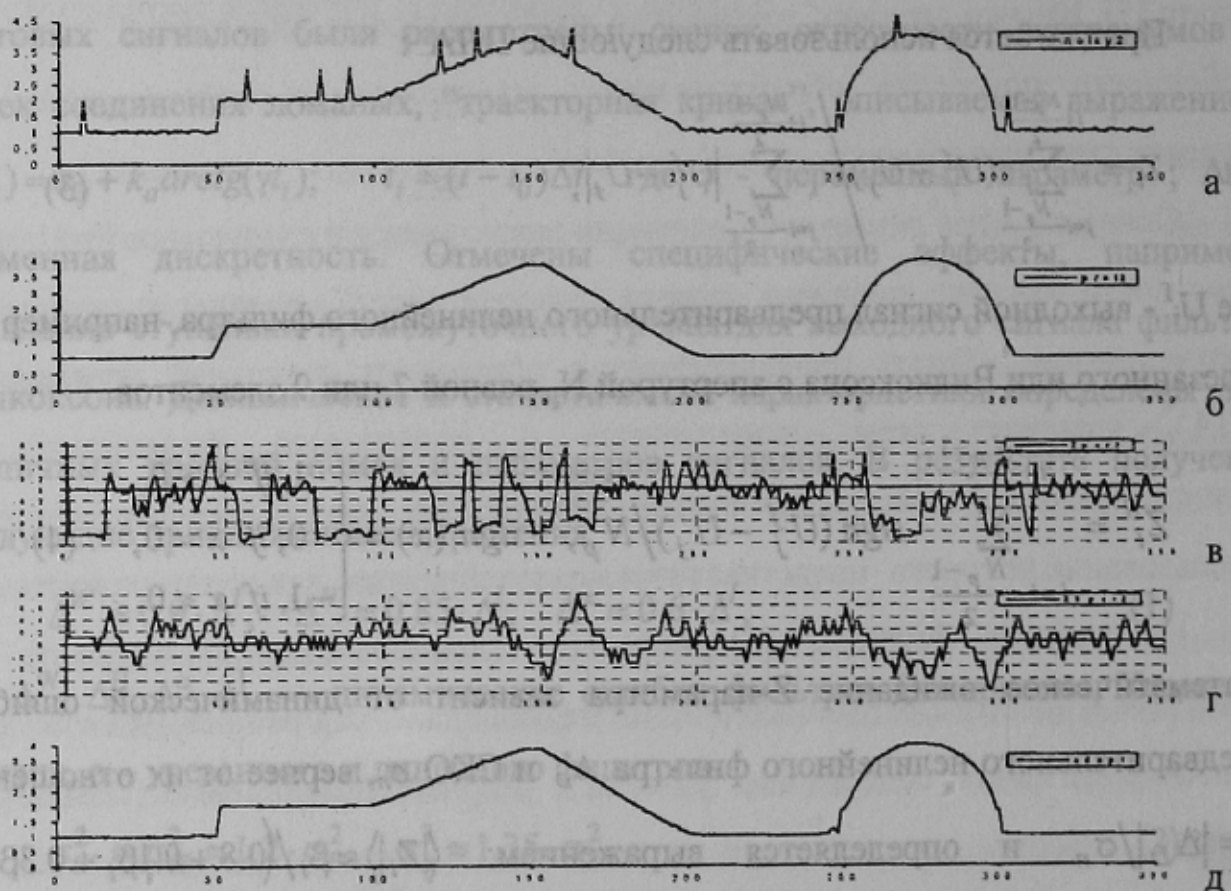


Рисунок 1 - Иллюстрация функционирования адаптивного фильтра: а) зашумленная реализация, $\sigma_a^2=0.01$, $P_S=0.02$; б) выходной сигнал предварительного фильтра; в) значения Z -параметра; г) значения параметра Z^S ; д) выходной сигнал адаптивного фильтра.

Сравнение результатов фильтрации неадаптивным фильтром (рис.1,б) и локально-адаптивным алгоритмом (рис1.,д) показало, что наряду с подавлением флуктуационных и импульсных помех предложенный метод эффективен в окрестностях особых точек: хорошо сохраняет перепад, изгиб ломанной, переход от ломанной к плавной кривой, область экстремумов, т. е. в значительной степени снижает уровень динамических ошибок.

Заключение

Для набора различных фрагментов тестового сигнала и воздействия разнообразных видов помех было показано, что предложенный нелинейный локально-адаптивный подход обладает рядом преимуществ и успешно функционирует при отсутствии априорных сведений о характеристиках сигнала и помех. Сравнительный анализ показал, что по локальному критерию эффективности фильтрации данный подход приближается к уровню, наилучшему среди неадаптивных алгоритмов, при значительном уменьшении интегральной ошибки. Предложенный алгоритм обеспечивает приемлемое быстродействие и реализуемость с помощью стандартных цифровых блоков.

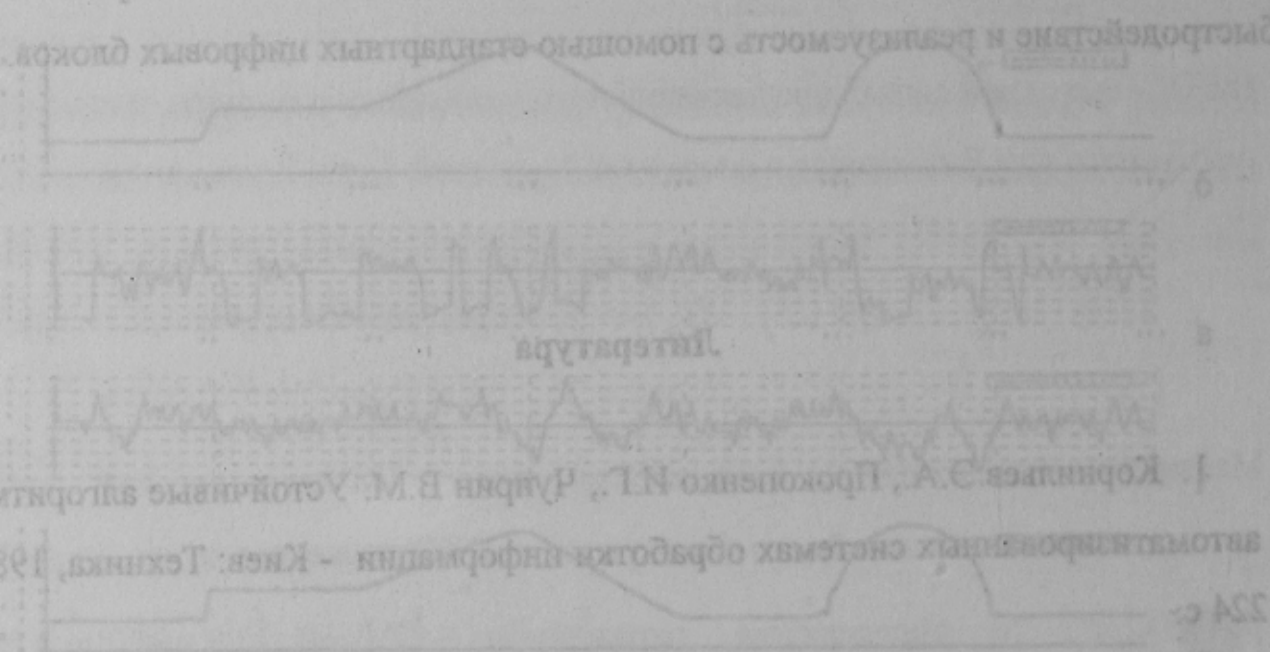
Литература

1. Корнильев Э.А., Прокопенко И.Г., Чуприн В.М. Устойчивые алгоритмы в автоматизированных системах обработки информации - Киев: Техника, 1989. - 224 с.
2. Устойчивые статистические методы оценки данных/ Пер. с англ., под ред. Н.Г.Волкова. - М.: Машиностроение, 1984. - 223 с.
3. Pitas I., Venetsanopoulos A.N. Nonlinear Digital Filters: Principles and Applications// Kluwer Academic Publishers, 1990. - 234 P.

4. Willner K., Kuosmanen P., Lukin V., Pogrebniak A., Nonlinear filters and rapidly increasing/decreasing signals corrupted with noise// CD-ROM Proceedings of NSIP Conference, Michigan, USA, Sept.1997, 5 pages.

5. Лукин В.В., Зеленский А.А., Погребняк А.Б. Локально-адаптивные алгоритмы устойчивой фильтрации информационных данных// Функционирование радиотехнических систем в условиях негауссовских помех. - М.: Московский Технол. Ин-т, 1992, С. 45-53. .

6. Lukin V., Melnik V., Pogrebniak A., Zelensky A., Astola J., Saarinen K. Digital Adaptive Robust Algorithms for Radar Image Filtering// Journal of Electronic Imaging, July 1996, N 5(3), P. 410-421.



Корнилов С.А., Прокопенко Н.Г., Руднев В.М. Устойчивые алгоритмы в автоматизированных системах обработки информации - Киев: Техника, 1989.

Устойчивые статистические методы оценки данных. Пер. с англ. ред. Н.Т. Волкова. М. (Машиностроение), 1984 - 222 с. илл.

Пас А.И., Venegas-Bolton A.I. Nonlinear Digital Filters: Principles and Applications// Kluwer Academic Publishers, 1990 - 234 p.