УДК 621.372(075)

АДАПТИВНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО - ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

к.т.н. В.В. Лукин, к.т.н. С.В. Хуторненко
(представил д.т.н., проф. А.А. Зеленский)

Показано, что **Z** - параметром можно распознать ряд характерных фрагментов сигналов и рекомендовать адаптивным образом использовать для их обработки различные, наиболее подходящие нелинейные алгоритмы. Приведены результаты численного моделирования, подтверждающие эффективность предложенных методов и алгоритмов фильтрации.

В ряде случаев информационный сигнал частотных датчиков, представленный в виде последовательности равноотстоящих отсчетов, является нестационарным, т.е. содержит скачки и/или разрывы первой производной, и искажен вследствие влияния помех с негауссовским распределением, например, смеси флуктуационного (аддитивного и/или мультипликативного) и импульсного шума. Для повышения точности измерения используют нелинейные методы фильтрации, реализуемые в виде цифровой обработки сигналов микропроцессорным вторичным преобразователем датчика. Оптимальные линейные методы при этом оказываются неприменимыми в связи с нестационарностью информационного сигнала и негауссовским характером помех. Информационные сигналы могут содержать гладкие участки и претерпевать «резкие» изменения значений. Все эти характерные точки желательно сохранить [1].

В качестве модели такой временной зависимости рассмотрим кривую, описывающую сглаженный перепад:

$$\mathbf{S(t_i) = h_0 + k_a \operatorname{arctg}(\gamma t_i)}; \quad (1)$$

$$\mathbf{\max|\gamma t_i| > 2,\ 3,\ \ldots,\ t_i = (i - i_0)\Delta t}, \quad (2)$$

где γ - переменный параметр; Δt - временная дискретность.

Очевидно, что в зависимости от значения $\gamma\Delta t$ модель представляет гладкую кривую или перепад.

Комплексная модель шума в обобщенном виде

$$\mathbf{n(t_i) = n_f(t_i) + n_{imp}(t_i)}, \quad (3)$$

где $\mathbf{n_f(t_i)}$ - флуктуационная компонента, имеющая нулевое математическое ожидание, гауссовское распределение (когда $\mathbf{S(t) = const}$) и дисперсию

$$\boldsymbol{\sigma_n^2 = \sigma_0^2 + k_0\sigma^2(S(t))}, \quad (4)$$

представляющую собой сумму сигнально-независимой и сигнально-зависимой (мультипликативной) составляющих.

Один из возможных вариантов - следующий:

$$\boldsymbol{\sigma^2(S(t)) = S^2(t), k_0 < 0.1}. \quad (5)$$

Варьируя значение $\mathbf{k_0}$ в пределах от 0 до 0,1, а также $\boldsymbol{\sigma_0^2}$, можно моделировать воздействие стационарного аддитивного шума, мультипликативных помех и их смеси.

Импульсная помеха описывается следующим выражением :

$$\mathbf{n_{imp}(t_i)} = \begin{cases} \mathbf{n_p}, & \text{с вероятностью } \mathbf{P_p} \\ \mathbf{n_n}, & \text{с вероятностью } \mathbf{P_n} \\ \mathbf{0}, & \text{с вероятностью } \mathbf{1 - P_p - P_n} \end{cases}, \quad (6)$$

где значения $\mathbf{n_p}$ и $\mathbf{n_n (n_p > 0, n_n > 0)}$ значительно больше, чем

$$\sqrt{\boldsymbol{\sigma_0^2 + k_0 \max\left(\sigma^2\left(S(t)\right)\right)}}.$$

Динамические ошибки на выходе рассмотренных нелинейных фильтров [2,3], аппроксимируются выражениями

$$\boldsymbol{\Delta^W \approx 0.9 \cdot \Delta'} ; \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\Delta^H \approx 0.85 \cdot \Delta'} ; \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\Delta^\alpha \approx 0.6 \cdot \Delta'}, \quad (9)$$

где - $\boldsymbol{\Delta^W, \Delta^H, \Delta^\alpha, \Delta'}$ соответственно динамические ошибки на выходе фильтров Вилкоксона, Ходжеса - Лемана, α - урезанного и линейного усредняющего.

Учитывая, что динамические ошибки линейного фильтра зависят от размера скользящего окна, увеличиваясь по мере возрастания $\mathbf{N}$ (числа отсчетов), аналогичная тенденция наблюдается и для нелинейных алгоритмов фильтрации с заданной структурой. В то же время способность фильтров, как линейных, так и нелинейных, подавлять флуктуационные помехи с ростом $\mathbf{N}$ улучшается. Однако, если для линейных фильтров эффективность подавления шума и **N** связаны прямо пропорционально, то для нелинейных такая зависимость имеет место не всегда [4]. Эффективность оказывается зависящей от угла наклона для линейно изменяющихся участков сигнала, точнее от соотношения $\Delta S/\sigma$, где $\Delta S = S`(ti)\Delta t$. Причем при $\Delta S/\sigma_0 > 4$ медианный фильтр практически не подавляет помехи, поскольку зашумленный сигнал становится его стабильной точкой. Именно это свойство является важным фактором в пользу использования иных нелинейных алгоритмов вторичной обработки - фильтров Вилкоксона, Ходжеса - Лемана, α -урезанных, **L** - фильтров и т. д., для которых зависимость эффективности подавления помех в гораздо меньшей степени определяется соотношением $\Delta S/\sigma$ и улучшается по мере роста **N** почти пропорционально этому параметру. Робастные свойства этих алгоритмов при $N > 7$, как правило, достаточны для успешного функционирования при наличии выбросов.

Таким образом, увеличение **N** приводит к возрастанию динамических ошибок и уменьшению остаточных флуктуаций в выходном сигнале. Поэтому при неизвестном поведении информационного сигнала и уровне помех выбор оптимального нелинейного однопроходного фильтра проблематичен. Предлагается использовать принцип локальной адаптации, заключаемый в «оценивании» свойств сигналов и помех для окрестности каждого отсчета на основе «анализа» значений параметра адаптации и выборе фильтра с минимальной суммарной ошибкой для вторичной обработки сигнала. Одним из важнейших параметров адаптации является **Z** - параметр [4]

$$\mathbf{Z_i} = \frac{\sum\limits_{r=-k}^{k} \mathbf{X^f_{i+r}} - \mathbf{U_{i+r}}}{\sum\limits_{r=-k}^{k} \left|\mathbf{X^f_{i+r}} - \mathbf{U_{i+r}}\right|}, \tag{10}$$

где - $\mathbf{X^f_{i+r}}$ выходной сигнал промежуточного фильтра со «средними» динамическими и статистическими характеристиками.

В работе [3] дано теоретическое обоснование для оптимального выбора размера апертуры **Ni** фильтра Вилкоксона, осуществляемое сравнением $|\mathbf{Zi}|$ с несколькими порогами. Недостаток этого алгоритма состоит в следующем. Большие значения $|\mathbf{z_i}|$, при которых рекомендуется использовать фильтр Вилкоксона с $N = 5$, могут наблюдаться как на участках с большими динамическими ошибками промежуточного фильтра, т.е. с резкими изменениями сигнала, так и при наличии одного или нескольких выбросов. Но фильтр Вилкоксона с $\mathbf{N = 5}$ не способен устранить два выброса с одним знаком. Поэтому при $|\mathbf{z_i}| > \mathbf{Z_{tmax}}$, где $\mathbf{Z_{tmax}}$ - максимальный порог, следует использовать обычный медианный фильтр с $\mathbf{N = 5}$ или $\mathbf{N = 7}$. Второй недостаток фильтра Вилкоксона - это его низкое быстродействие. Поэтому ниже рассмотрим возможность либо при тех же порогах $\mathbf{Z_{tq}}$ использовать фильтры Ходжеса - Лемана вместо фильтров Вилкоксона с теми же апертурами, либо α - урезанные фильтры с теми же апертурами, но смещением порогов $\mathbf{Z_{tq}}$ в сторону увеличения.

Конкретизируем условия, при которых проведем численное моделирование. В качестве промежуточного фильтра используем фильтры Вилкоксона (**В**), Ходжеса - Лемана (**Х**) и α - урезанный (α) с $\mathbf{N = 9}$ для применения этих алгоритмов в качестве компонент адаптивного фильтра. $\mathbf{N_{min} = 5}$, $\mathbf{N_{max} = 13}$, пороги равны 0,15 и 0,35 для первых двух случаев и 0,20 и 0,40 для последнего. Варьировалась дисперсия аддитивных помех $\boldsymbol{\sigma_0}$ и $\mathbf{P_i}$, $\mathbf{k_0}$ полагали равным 0. Эффективность фильтрации оценивали по интегральной дисперсии остаточной ошибки, ее значения рассчитывались как для адаптивного фильтра, так и для каждой из компонент, т.е. однопроходных фильтров с разными апертурами: χ_5, χ_9 и χ_{13}. Результаты численного моделирования сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - Результаты численного моделирования

σ_0^2	$\mathbf{P_i}$	Компонентные фильтры	χ_5	χ_9	χ_{13}	$\chi_{ад.}$
0,001	0	В	0,00026	0,00037	0,00104	0,00022
0,003	0	В	0,00070	0,00062	0,00123	0,00055
0,001	0,01	В+медиан.(5)	0,00050	0,00049	0,00116	0,00051
0,003	0,01	В+медиан.(5)	0,00098	0,00076	0,00136	0,00095
0,001	0	Х	0,00026	0,00036	0,00090	0,00023
0,003	0	Х	0,00070	0,00064	0,00121	0,00057
0,001	0,01	Х+медиан.(5)	0,00061	0,00050	0,00107	0,00049
0,003	0,01	Х+медиан.(5)	0,00100	0,00081	0,00137	0,00099
0,001	0	α	0,00026	0,00020	0,00027	0,00020
0,003	0	α	0,00076	0,00050	0,00050	0,00051
0,001	0,01	α+медиан.(5)	0,00047	0,00029	0,00042	0,00040
0,003	0,01	α+медиан.(5)	0,00087	0,00063	0,00066	0,00071

Как видно из анализа результатов, адаптивный алгоритм в большинстве ситуаций обеспечивает наилучшую эффективность обработки, в редких случаях лишь немного проигрывая наилучшему из однопроходных фильтров, причем это имеет место при значительных изменениях свойств помех. Замена фильтра Вилкоксона фильтром Ходжеса - Лемана практически не ощущается на результатах, но при этом выигрыш в быстродействии ощутим. Использование α – урезанных фильтров приводит к еще более значительному выигрышу в быстродействии, при этом эффективность вторичной обработки иногда даже возрастает.

На основе результатов для набора тестовых сигналов получены выражения, позволяющие предсказывать уровень ошибок выходных сигналов нелинейных фильтров, оценивать их, используя **Z** - параметры, и осуществлять локально-адаптивную обработку, получая при этом низкий уровень интегральных ошибок. Указанные свойства неадаптивных и адаптивных фильтров, а также **Z** - параметров проиллюстрированы и количественно подтверждены для тестовых сигналов, искаженных различными видами помех. Дополнительными преимуществами предложенных алгоритмов являются их робастность, т.е. способность функционировать в условиях воздействия разнообразных помех и ограниченных априорных сведениях о характеристиках сигналов и шумов, высокое быстродействие и реализуемость с помощью стандартных цифровых блоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pitas I., A.N. Venetsanopoulos A.N. Nonlinear Digital Filters: Principles and Application, Kluwer Academie Publisher, 1990. - 382 p.

2. Лукин В.В., Погребняк А.В. Устойчивые алгоритмы фильтрации оценок пространственных координат движущихся объектов // Космическая наука и техника: Сб. научно - техн. ст., вып. 7.- К.: Наукова думка, 1993. - С. 60 - 63.

3. Зеленский А.А., Лукин В.В., Погребняк А.Б. Локально - адаптивные алгоритмы устойчивой фильтрации информационных данных // Функционирование радиотехнических систем в условиях негауссовских помех: Сб. научно - техн. тр. - М: МТИ, 1992. - С. 45 - 53.

4. Willner K., Kuosmanen P., Lukin V., Pogrebniak A. Nonlinear filters and rapidly increasing/decreasing signals corrupted with noise // CD-ROM Proc. of NSIP'97, Michigan, USA, Sept. 1997, 4 p.