Раздел III. Электроника, приборостроение

УДК 681.3

В.В. Сарычев

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СГЛАЖИВАНИЯ СИГНАЛА ПО РЕГУЛЯРНЫМ И НЕРЕГУЛЯРНЫМ ОТСЧЕТАМ

Приводятся оценки максимальной погрешности обработки сигнала нелинейными фильтрами – медианным, Гаусса, адаптивным, скользящего среднего и их комбинаций. Для уменьшения погрешности предлагается в качестве узлов аппроксимации брать отсчеты сигнала нерегулярно, в зависимости от характера участка сигнала и распределении производных. За основу взят апертурный алгоритм адаптивной дискретизации.

Адаптивная дискретизация; сглаживание; подавление шума; сплайн.

V.V. Sarychev

ESTIMATION OF EFFICIENCY OF SMOOTHING OF THE SIGNAL ON REGULAR AND IRREGULAR COUNTINGS

Estimations of the maximum mistake of processing of a signal by nonlinear filters – median, Gaussa, adaptive, sliding average and combined are resulted. For mistake reduction it is offered to take as approximating knots signal countings irregularly, depending on character of a site of a signal and allocation of derivatives. For a basis the aperture algorithm of nonuniform sampling is taken.

Adaptive digitization; smoothing; noise suppression; spline.

Интеллектуализация первичных преобразователей (ПП) измерительных сигналов дает возможность расширить перечень операций предварительной обработки непосредственно на выходе чувствительного элемента (ЧЭ). Эффективность алгоритмов цифровой обработки сигналов зависит от количества записанных в память существенных отсчетов сигнала в единицу времени. Актуальными считаются задачи шумоподавления, сглаживания, сжатия сигналов.

Наибольшую известность для сглаживания, как частного случая фильтрации, получили такие алгоритмы как медианный, на основе функции Гаусса, адаптивный, скользящего среднего, устранения тренда, полосовой фильтрации, спектральной фильтрации. Все они представлены в виде встроенных функций в таких программах как Mathcad (medsmooth, ksmooth, supsmooth) и LabVIEW (smooting windows). Имеются также результаты исследований эффективности комбинированных фильтров, проводящих обработку данных одновременно по нескольким таким алгоритмам [1].

Далее приводятся результаты моделирования процедур сглаживания сигналов, отсчеты которых обрабатываются известными фильтрами. Для наглядности сигнал и шум представлены в виде суммы функций синуса. Более сложные модели представляются аналогично, только количество слагаемых в модели должно быть больше, а также могут быть применены встроенные генераторы случайных чисел. Но тогда наглядность и понимание процесса обработки более сложных моделей возможна, если полученные результаты сравнивать по энергетическим, спектральным показателям, что потребует дополнительных преобразований.

Примем в качестве модели сигнала: **s**(t) = sin(t) + cos(3t), сигнала с аддитивной помехой в полосе частот сигнала: **fs**(t) = s(t) + 0.2sin(3t).

Для t = 0..1023 процедура медианной фильтрации по семи соседним отсчетам:

окно медианного фильтра: *point*=7,

вектор результата фильтрации: **fsmed** = medsmooth(**fsd**, *point*),

коэффициенты кубического сплайна: **kfsmed** = cspline(*td*, **fsmed**),

результат: **FSMedSpline**(t) = interp(**kfsdmed**, *td*, **fsdmed**, t),

где **fsd** – вектор отсчетов равномерной дискретизации **fs**(t), *td* – период дискретизации, **FSMedSpline**(t) – восстановленный сигнал. Максимальная погрешность обработки

|max(**FSMedSpline**(t)-**s**(t))| = 0,2

осталась на уровне шума, то есть, фактически, фильтрации не было (рис. 1).

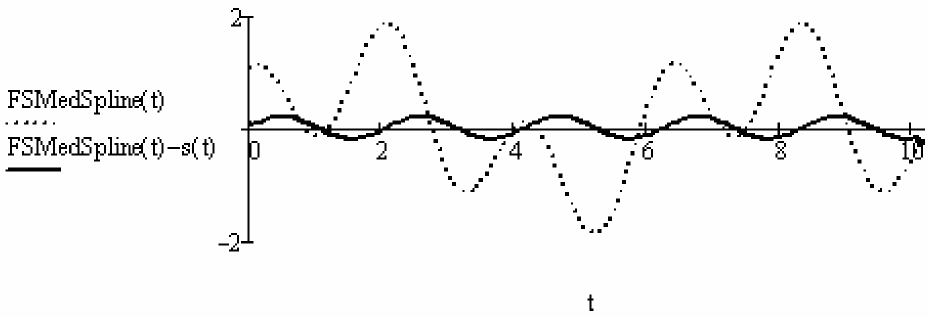

Рис. 1. Восстановленный сигнал и величина разности с заданным ***s(t)***

Процедура локального сглаживания адаптивным алгоритмом, основанного на анализе ближайших соседей (Mathcad):

fsda = supsmooth(*td*,**fsd**),

kfsda = cspline(*td*, **fsda**),

FSA(t) = interp(**kfsda**, *td*, **fsda**, t),

где **FSA**(t) – восстановленный сигнал. Максимальная погрешность обработки

|max(**FSA**(t)-**s**(t))| = 0,304

превысила уровень шума за счет дополнительных искажений при обработке адаптивным фильтром.

Аналогичная ситуация и для сглаживания на основе функции Гаусса:

$$\mathbf{fsdgauss} = \mathrm{ksmooth}(td, \mathbf{fsd}, 7),$$
$$\mathbf{kfsdgauss} = \mathrm{cspline}(td, \mathbf{fsdgauss}),$$
$$\mathbf{FSGauss}(t) = \mathrm{interp}(\mathbf{kfsdgauss}, td, \mathbf{fsdgauss}, t).$$

Максимум погрешности

$$|\max(\mathbf{FSGauss}(t) - \mathbf{s}(t)| = 0{,}22\ .$$

Считается самым простым и очень эффективным методом – скользящее усреднение. Его суть состоит в расчете для каждого значения аргумента среднего значения по соседним *w* данным. Число *w* называют окном скользящего усреднения; чем оно больше, тем больше данных участвуют в расчете среднего, тем более сглаженная кривая получается. Листинг (Mathcad):

$$j = 0\ ..\ \mathrm{rows}(\mathbf{fsd}),\ w = 5,$$

$$\mathbf{fsds}_j = \mathrm{if}\left(j < w, \frac{\sum_{k=0}^{j} \mathbf{fsd}_k}{j+1}, \frac{\sum_{k=j-w+1}^{j} \mathbf{fsd}_k}{w} \right),$$

$$\mathbf{kfsds} = \mathrm{cspline}(td, \mathbf{fsds}),$$
$$\mathbf{FSS}(\mathrm{t}) = \mathrm{interp}(\mathbf{kfsds}, td, \mathbf{fsds}, t).$$

На рис. 2. представлены графики восстановленного сигнала после сглаживания по данному методу FSS(t) и разности с заданным s(t):

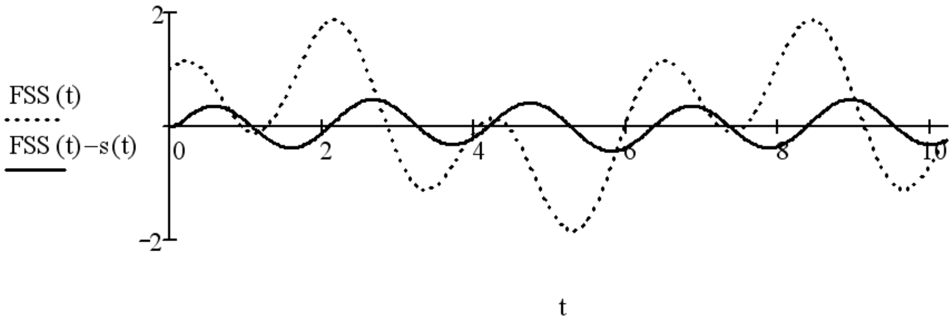

Рис. 2. Восстановленный сигнал и величина разности с заданным s(t)

Разность восстановленного и исходного сигналов соответствует виду заданной помехи, следовательно, и в этом случае сглаживания как такового не было. Максимальная величина погрешности обработки без учета запаздывания на *w* точек составила

$$|\max(\mathbf{FSS}(t) - \mathbf{s}(t))| = 0{,}2.$$

На наш взгляд эти алгоритмы имеют ограничение на пути к достижению оптимальных и даже потенциальных показателей, когда помеха располагается в полосе частот сигнала. Поэтому эффективность подобных процедур все еще низка. Прежде всего, это касается процедуры определения отсчетов сигнала, которые записываются в память, обрабатываются каким-либо фильтром и за-тем являются узлами сглаживающего полинома. Поскольку математическая теория аппроксимации и интерполяции функций не предполагает в качестве обязательного условия регулярности отсчетов, то в данной работе проведено сравнение результатов сглаживания сигналов по регулярным и нерегулярным отсчетам. Относительно нерегулярной дискретизации отметим следующее. При проведении исследований методов аппроксимации прямыми и параболами было замечено, что при аппроксимации сигналов прямыми возникает большая погрешность в точках экстремума, а при аппроксимации параболами – в точках перегиба. Поэтому предлагаемый алгоритм получения отсчетов учитывает, что для гладкого сопряжения кусков аппроксимации узлы должны выбираться на участках сигнала с минимальными значениями первой и второй производной. Корни уравнений:

$$\left|\frac{ds(t)}{dt}\right| = 0 \quad \text{и} \quad \left|\frac{d^2s(t)}{dt^2}\right| = 0$$

предлагаются в качестве узлов кубической сплайн-интерполяции (рис. 3).

Тогда вектор отсчетов

$$\mathbf{Zspline} = \mathrm{root}\left(\frac{ds(t)}{dt} \to \cos(t) - 3\cdot\sin(3\cdot t), \frac{d^2s(t)}{dt^2} \to -9\cdot\cos(3\cdot t) - \sin(t)\right)$$

вместе с вектором координат времени **Tspline** являются исходными для интерполирующего сплайна при восстановлении исходного сигнала (рис. 3):

Sspline(t) = interp(cspline(**Tspline**, **Zspline**), **Tspline**, **Zspline**, *t*).

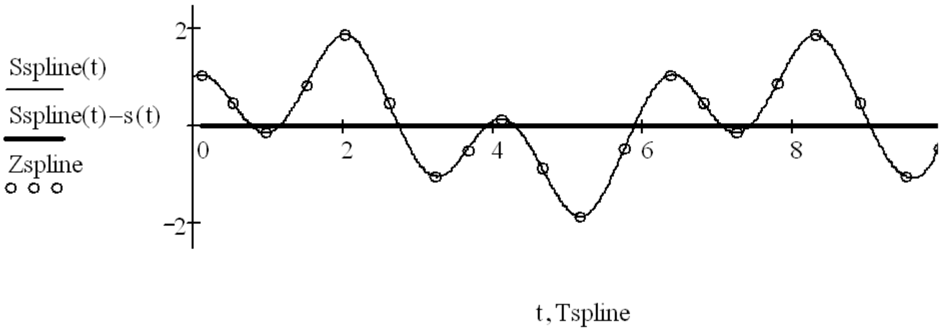

*Рис. 3. Восстановленный сигнал **Sspline(t)** по вектору отсчетов **Zspline***

Величина максимальной разности между исходной функцией и восстановленной по нерегулярным отсчетам составила

$$|\max(\mathrm{submatrix}(\mathbf{Sspline}(t) - \mathbf{s}(t), 10, 1000, 0, 0))| = 5{,}316\cdot 10^{-3}$$

и является настолько малой, что свидетельствует о возможности применения нерегулярной дискретизации при отборе отсчетов для последующего оптимального сглаживания полиномами разных степеней.

В реальной ситуации при определении производных для сигнала с помехой будут иметь место большие погрешности. За основу алгоритма определения отсчетов в точках минимума первой и второй производных предлагается взять апертурный алгоритм адаптивной дискретизации нулевого порядка (НП), получивший широкое распространение за счет предельной простоты и имеющий высокую эффективность при обработке сигналов с низкой динамичностью. Неравенство, при выполнении которого отсчет сигнала в момент времени t*j* признается существенным, записывается следующим образом:

$$| x(t) - x(t_j) | > E_o ,$$

где E0 – величина апертуры, составляющая десятки процентов от динамического диапазона сигнала. Предложенное неравенство гарантирует, что текущая погрешность не превысит заданную допустимую погрешность даже между узлами сплайна. Сделав существенный отсчет, алгоритм этот алгоритм формирует допуски на изменение сигнала, $\pm E_0$ относительно существенного отсчета и обеспечит помехоустойчивость при косвенной оценке производных. Участок сигнала между существенными отсчетами t*j-1* и t*j* при восстановлении аппроксимируется линией и составляющие шума в пределах *E0* таким образом подавляются (рис. 4).

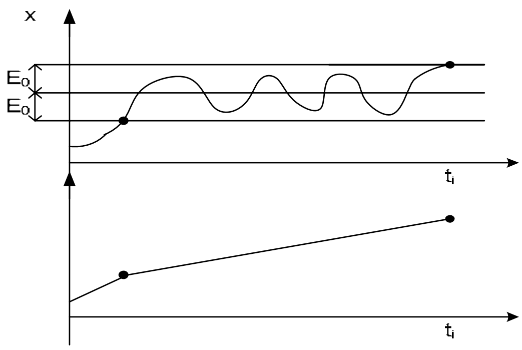

Рис. 4. Сглаживание алгоритмом НП

В статье [2] подробно представлен синтез алгоритма адаптивной дискретизации с сохранением свойств алгоритма НП на линейных и нелинейных участках сигнала. В таблице 1 представлены результаты проведенного моделирования.

Таблица 1

Наименование алгоритма	Величина максимальной относительной погрешности, %
Бегущие медианы	10
Адаптивный анализ ближайших соседей	16
На основе функции Гаусса	10
Скользящее усреднение	10
Адаптивная дискретизация на основе НП	3

Величина погрешности обработки по предлагаемому алгоритму на основе НП соответствует уровню погрешности восстановления сигнала кубическим сплайном. Снижение её величины вдвое возможно при применении комбинированного способа восстановления, когда линейные участки восстанавливаются линейной интерполяцией, а нелинейные – кубическим сплайном. Ступенчатый принцип работы апертурного алгоритма [2] дает информацию о распределении по времени таких участков сигнала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бронников А.В., Воскобойников Ю.Е.* Комбинированные алгоритмы нелинейной фильтрации зашумленных сигналов и изображений // Автометрия. – 1990. – №1.
2. *Сарычев В.В.* Апертурный алгоритм подавления шума в первичном сигнале // Современные проблемы науки и образования. – 2007. – № 6. URL: www.science-education.ru/number_2007_06.html.

Сарычев Виктор Владимирович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: cit@pbox.ttn.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 8(8-8634)371-638.

Кафедра автоматизированных систем научных исследований и экспериментов.

Доцент.

Sarychev Victor Vladimiroich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: cit@pbox.ttn.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 8(8-8634)371-638.

Department of Automated Research Systems

Associate professor.

УДК 681.324

М.Д. Скубилин

УСТАНОВКА УПОРЯДОЧЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РАСПЛАВА БИНАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Описывается установка для упорядоченной кристаллизации бинарных соединений.

Вакуумная камера; вакуумный насос; вакуумметр; пирометр; источники энергии; лодочка с шихтой; блок управления; электромеханический привод лодочки; аналого-цифровой преобразователь.