УДК 621.372

Н.О. ТУЛЯКОВА

Сумский государственный университет, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ЭКСТРЕМУМОВ

Методами численного моделирования для широкого диапазона изменения дисперсии аддитивного шума и возможного наличия импульсных помех проведены исследования и анализ эффективности применения однопроходных и локально-адаптивных нелинейных фильтров с целью повышения точности оценки координат пикообразных и полиномиальных экстремумов. Показано существенное улучшение статистических показателей точности оценок координат экстремумов по обработанному сигналу в сложных условиях воздействия нестационарных помех с априорно неизвестными характеристиками.

экстремумы, нелинейные фильтры, локально-адаптивные алгоритмы, помехи, оценки, статистические показатели

Введение

Во многих приложениях цифровой обработки сигналов (ЦОС) важной задачей является повышение точности измерения параметров характерных точек обрабатываемых сигналов, представленных в виде дискретных последовательностей эквидистантных отсчетов измеряемой непрерывной величины. Одним из типичных классов характерных точек являются экстремумы.

Наличие в наблюдаемых информационно-измерительных процессах помеховых составляющих является причиной существенного ухудшения точностных характеристик измеряемых параметров сигнала, к которым относятся координаты экстремумов. Такие процессы нуждаются в предварительной обработке с целью подавления помех и выделения полезного сигнала. Традиционно используемые линейные фильтры оказываются оптимальными в случае стационарного и гауссовского характера воздействующих помех для сигналов, описываемых гладкими аналитическими функциями [1]. Быстрые изменения информационной составляющей наблюдаемого процесса в сигнале отображаются фрагментами резких изменений вида перепадов, пиков, изломов и других точек разрыва производной. В этих случаях лучшими динамическими свойствами, т.е. способностью сохранять особые точки информационной составляющей, обладают нелинейные фильтры [2]. Кроме того, нелинейные фильтры характеризуются способностью устранять импульсные помехи, тогда как линейные методы в таких ситуациях оказываются непригодными [2].

Большинство нелинейных фильтров так же, как и линейных методов фильтрации являются модельно-ориентированными – оптимальными для определенных моделей сигналов и известных характеристик помех [1, 2]. Однако на практике большинство наблюдаемых сигналов описывают нестационарные процессы, включающие в себя существенно различные модели изменения информационной составляющей, в частности, различные типы экстремумов. Кроме того, допущения о стационарности и гауссовском характере помех не всегда оказываются верными, причем во многих ситуациях характеристики помех априорно не известны. В таких условиях, когда объем сведений о модели локального поведения информационной составляющей и характеристиках помех ограничен, естественным подходом является использование устойчивых – способных достаточно успешно функционировать при различных свойствах сигналов и помех алгоритмов ЦОС. К таким алгоритмам относятся нелинейные локально-адаптивные алгоритмы (ЛАА), осуществляющие модификацию параметров фильтра в соответствии с получаемыми оценками свойств локальной сигнально-помеховой ситуации [3].

В связи с этим, возникает задача исследования эффективности применения нелинейных однопроходных фильтров и ЛАА для обработки нестационарных информационных процессов, описываемых комплексной моделью, включающей фрагменты различного типа экстремумов, с целью повышения точности оценки их параметров по обработанному сигналу в сложных условиях воздействия нестационарных помех и возможном наличии выбросов.

1. Исследуемые локально-адаптивные фильтры

Идея создания ЛАА на основе описанной в [3] структуры заключается в использовании достоинств различных нелинейных фильтров в зависимости от принадлежности анализируемого в окне предварительного фильтра фрагмента сигнала "локально-активным" (ЛА) областям, к которым относятся участки резких изменений информационной составляющей, и "локально-пассивным" (ЛП) областям, описываемым линейными и гладкими аналитическими функциями. Для обработки ЛА участков целесообразно использовать фильтры с высокими динамическими свойствами – хорошо сохраняющие характерные точки сигнала, а для ЛП – фильтры с высокой степенью подавления помех и способностью устранять выбросы [2, 3]. Таким образом, достигается значительное улучшение интегральных показателей качества вторичной обработки, так как на локальных участках используются наиболее подходящие по свойствам фильтры.

Проведенный ранее анализ динамических и статистических свойств различных нелинейных фильтров в области характерных видов элементарных сигналов [3, 5] показал высокие показатели эффективности их вторичной обработки некоторыми нелинейными фильтрами. В частности, в области пика наилучшими динамическими свойствами характеризуется КИХ-гибридный медианный фильтр с использованием экстраполирующих субапертур 0-го и 1-го порядков (ЭКГМ), для которого сигналы пикообразной формы являются стабильными точками, т. е. в отсутствие помех полностью сохраняются на выходе фильтра [6]. Анализ эффективности применения ЭКГМ в области пика для разнообразных условий воздействия аддитивных и мультипликативных помех с различным уровнем дисперсии и возможном наличии выбросов показал способность данного нелинейного фильтра хорошо сохранять пик в диапазоне низкого-среднего уровня помех [5, 7]. Вследствие чего применение ЭКГМ приводит к заметному повышению точности оценки амплитудных параметров пика по обработанному сигналу [7]. Исследования эффективности применения нелинейных фильтров для обработки сигналов, описываемых гладкими полиномиальными функциями, в частности в области параболического экстремума [3, 5], позволяют рекомендовать использование для обработки такого типа сигналов фильтров со средними динамическими и высокими статистическими свойствами, к которым относятся α-урезанные фильтры (АУФ) [2] и α-урезанные КИХ-гибридные фильтры (АКГФ), причем последние характеризуются более высокими показателями динамических свойств при обработке полиномиальных сигналов [5], а АУФ имеют лучшие робастные и статистические свойства [3, 5].

Таким образом, исходя из задачи повышения точности оценок координат пикообразных и полиномиальных экстремумов в условиях воздействия сложных помех с различным уровнем дисперсии и возможного наличия выбросов и на основании проведенного ранее анализа свойств различных нелинейных фильтров [3, 5], предложим ЛАА описанной в [3] структуры на основе следующих компонентных фильтров:

– ЭКГМ (размер апертуры $N = 13$), АУФ с $N = 9(2)$ и $N = 13(3)$ – обозначим данный ЛАА как вариант A' [8];

– ЭКГМ ($N = 13$) и АКГФ ($N = 13(1)$) – вариант ЛАА A''[8].

Для сравнения рассматривается базовый ЛАА (вариант A) на основе трех компонентов: стандартного медианного фильтра (МФ) с малым размером апертуры $N = 5$ и АУФ со средним и большим размерами скользящего окна $N = 9(2)$ и $N = 13(3)$ [9].

Поскольку точность измерения параметров экстремумов зависит от многих факторов: типа фильтра, размера скользящего окна, метода измерения, степени остроты экстремума, свойств помех, то статистические характеристики оценок следует определять для широкого класса условий, анализируя однопроходные фильтры и ЛАА, учитывая, что последние обеспечивают наилучшие интегральные показатели качества вторичной обработки [3, 9].

2. Тестовые модели сигналов и помех

Модели полиномиального и пикообразного экстремумов описываются следующими выражениями:

$$S(t) = a_0 \pm b_0 \left(t - t_0\right)^2 ;$$

$$S(t) = \begin{cases} a_0 + b_{01}(t - t_0), & t \le t_0; \\ a_0 + b_{02}(t_0 - t), & t > t_0, \end{cases}$$

где a_0, b_0 – некоторые коэффициенты;

t_0 – точка истинного положения экстремума на временной оси t.

Модель помехи представим следующим образом:

$$n(t_i) = n_a\left(t_i\right) + n_s\left(t_i\right),$$

где $n_a\left(t_i\right)$ – аддитивный гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_a^2;

$n_s\left(t_i\right)$ - импульсная помеха, с вероятностью P_S принимающая значения $A_{imp} > 3\sigma_a$;

t_i - i-й отсчет наблюдаемой последовательности $U\left(t_i\right) = S\left(t_i\right) + n\left(t_i\right)$.

3. Методы измерения координат экстремумов

Традиционно простейший алгоритм определения координаты максимума для дискретизированной последовательности отсчетов $\left\{U\left(t_i\right)\right\}$ следующий:

$$t_{i0} = \max, \text{ если } U\left(t_{i0}\right) > U\left(t_{i0-1}\right) \text{ и } U\left(t_{i0}\right) > U\left(t_{i0+1}\right).$$

Если последовательность отсчетов зашумлена, то локальных максимумов будет много и для определения координаты наибольшего из них или искомого привлекается дополнительная априорная информация: осуществляется поиск наибольшего из локальных максимумов, поиск выполняется в некотором интервале значений t_i или окрестности заданной ширины, вводятся пороги и т.д. Существуют и более сложные алгоритмы поиска экстремумов, например, аппроксимация поведения кривой полиномом по методу наименьших квадратов, которая, однако, неприменима при наличии импульсных помех.

Распространенным методом поиска координат экстремумов является метод сечений, в соответствии с которым при известном или предварительно оцененном значении функции в экстремальной точке $\hat{Y}_{\max}$ строят сечение на уровне $\hat{Y}_{\max} y_0$, $y_0 \in [0;\ 1[$, а затем определяют координаты $\hat{\tau}_1$ и $\hat{\tau}_2$.ближайших точек пересечения $U(t)$ с уровнем $\hat{Y}_{\max} y_0$. В качестве оценки координаты максимума применяется $\left(\hat{\tau}_1 + \hat{\tau}_2\right)/2$ в предположении симметричности экстремума. Оценки $\hat{\tau}_1$ и $\hat{\tau}_2$ определяются на основе линейной интерполяции последовательности на выходе фильтра $U^f\left(t_i\right)$ между отсчетами с индексами j и k для которых

$$U^f\left(t_{j-1}\right) \le \hat{Y}_{\max} y_0 < U^f\left(t_j\right);$$

$$U^f\left(t_{k-1}\right) \le \hat{Y}_{\max} y_0 < U^f\left(t_k\right),\ k > j .$$

Однако в случае наличия в области поиска экстремумов импульсных помех метод сечений также оказывается неприменимым. В связи с этим целесообразным является применение предварительной обработки сигнала нелинейным фильтром, способным устранять выбросы. Кроме того, как отмечалось выше, нелинейные фильтры характеризуются лучшими динамическими свойствами, т. е. способностью сохранять характерные точки информационной составляющей [2, 3 – 7], к которым, в частности, относятся экстремумы.

4. Показатели точности оценок координат экстремумов

Статистические характеристики оценок $\hat{\tau}_i$ параметров экстремумов по обработанному сигналу будем описывать математическим ожиданием (МО) и дисперсией оценок

$$M(\tau_{peak/pol}) = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}\hat{\tau}_{peak/pol},$$

$$\sigma^2_{\tau_{peak/pol}} = \frac{1}{K-1}\sum_{i=1}^{K}(\hat{\tau}_{peak/pol} - M(\tau_{peak/pol}))^2,$$

где $\hat{\tau}_{peak/pol}$ - оценка координаты пика (*peak*) или полиномиального экстремума (*pol*);

K – количество реализаций, по которым проводится операция статистического усреднения.

Интегрально точность оценок параметров экстремумов определяется приведенной ошибкой

$$\delta_{\hat{\tau}_{peak/pol}} = \left(\tau^{test}_{peak/pol} - M\left(\tau_{peak/pol}\right)\right)^2 + \sigma^2_{\tau_{peak/pol}},$$

где $\tau^{test}_{peak/pol}$ – истинное положение экстремума на временной оси.

5. Анализ результатов исследования

Исследования проводились методами численного моделирования для разнообразных условий воздействия помех. Результаты численного моделирования представлены в табл. 1. Рассматривались случаи воздействия аддитивных помех с широким диапазоном изменения дисперсии от низкого уровня ($\sigma_a^2 = 0{,}001$, $\sigma_a^2 = 0{,}003$) до среднего ($\sigma_a^2 = 0{,}01$) и высокого ($\sigma_a^2 = 0{,}03$), а также ситуации наличия импульсных помех с амплитудой $A_{имп}$=0,5 и вероятностью $P_{имп}$=0,03, так, чтобы в областях экстремумов рассматриваемой ширины (область экстремума над "сечением" для пика составляет 20 отсчетов, а для полиномиального экстремума – 26 отсчетов) вероятность появления хотя бы одного выброса была велика. Оценка точности проводилась для прямого метода определения координат экстремумов и для метода сечений. Сразу отметим, что вследствие несимметричности пика ($|b_{01}| \neq |b_{02}|$) для метода сечений всегда имеется систематическая погрешность, проявляющаяся в смещении МО оценок $\hat{\tau}_{peak(pol)}$ порядка двух отчетов, которая в случае квазипериодичности сигнала практически не оказывает влияния на статистические характеристики оценок временных интервалов, поэтому для этого метода будем основное внимание обращать на дисперсию оценок.

Рассмотрим условия малого уровня помех $\sigma_a^2 = 0{,}001$ (табл. 1, ситуация 1). В данном случае основное влияние на точность оценок координат экстремумов оказывают динамические свойства фильтров. Как показывают результаты численного моделирования, даже в этом случае нелинейные фильтры: ЭКГМ13 и АКГФ13 для пика и АУФ9, АУФ13, АКГФ13, МФ5 для полиномиального экстремума имеют лучшие показатели в сравнении с оценками по исходному сигналу, что свидетельствуют о высоких динамических свойствах исследуемых нелинейных фильтров в области рассматриваемых типов сигналов. Наименьшие значения дисперсии оценок имеют α-урезанные фильтры АУФ9, АУФ13, АКГФ13 в силу их лучших сглаживающих свойств [3, 5]. Для всех рассматриваемых нелинейных фильтров дисперсия оценок координаты пика $\sigma^2_{\tau_{peak}}$ мала: не превышает Δt^2 (Δt=1) – временную дискретность, а вот для полиномиального экстремума для всех фильтров, кроме АУФ, $\sigma^2_{\tau_{pol}}$ при прямом методе измерений существенно больше

Таблица 1

Результаты численной оценки точности измерения координат экстремума

Метод	Прямой метод оценок						Метод сечений					
Сигнал	*Пик*			*Полином. экстремум*			*Пик*			*Полином. экстремум*		
Фильтр	$M(\tau_{peak})$	$\sigma^2_{\tau peak}$	δ_{peak}	$M(\tau_{pol})$	$\sigma^2_{\tau pol}$	δ_{pol}	$M(\tau_{peak})$	$\sigma^2_{\tau peak}$	δ_{peak}	$M(\tau_{pol})$	$\sigma^2_{\tau pol}$	δ_{pol}
1) Исходные условия: σ^2_a =0,001, $P_{имп}$=0,00, $A_{имп}$=0,00; τ^{test}_{peak} ***=150***; τ^{test}_{pol} ***=275***;												
Исх.	149,830	0,2611	0,29	275,005	3,5050	3,505	148,000	0,2200	4,22	275,030	0,1241	0,125
МФ5	149,700	0,2750	0,365	275,020	1,4471	1,448	147,930	0,210	4,495	275,028	0,1080	0,109
ЭКГМ	**149,910**	0,2119	**0,22**	275,02	3,5648	3,565	**147,990**	0,117	**4,158**	275,010	0,0949	0,095
АУФ9	149,163	0,2848	0,985	275,098	**0,7792**	**0,789**	147,963	0,0548	4,204	**275,000**	**0,0200**	**0,02**
АУФ13	148,923	0,3277	1,487	275,038	**0,4499**	0,451	147,988	**0,029**	**4,077**	**275,000**	**0,0000**	**0,0**
АКГФ	**149,975**	**0,1144**	**0,115**	275,075	1,2694	1,275	147,963	0,0323	**4,182**	**274,990**	**0,0149**	**0,015**
А	149,638	0,3073	0,438	**275,00**	1,7687	**1,769**	147,965	0,0463	**4,188**	**274,990**	0,0849	0,085
А′	**149,970**	**0,1391**	**0,14**	274,945	3,5720	3,575	147,955	0,0430	4,225	275,003	0,1313	0,131
А″	**149,955**	**0,1223**	**0,124**	275,100	3,3500	3,36	147,965	0,0463	**4,188**	275,015	0,1223	0,123
2) Исходные условия: σ^2_a =0,003, $P_{имп}$=0,00, $A_{имп}$=0,00; τ^{test}_{peak} ***=150***; τ^{test}_{pol} ***=275***;												
Исх.	149,655	0,7559	0,875	275,170	5,2311	5,26	148,070	0,5226	4,248	275,035	0,2338	0,235
МФ5	149,668	0,5757	0,686	274,913	2,9511	2,959	147,963	0,2823	4,432	275,038	0,1649	0,166
ЭКГМ	**149,820**	0,5676	**0,6**	**274,963**	5,5948	5,596	**148,055**	0,3045	**4,088**	275,025	0,1094	0,110
АУФ9	149,163	**0,5473**	1,248	275,170	**1,5636**	**1,593**	147,918	0,1619	4,497	**275,000**	0,0600	0,060
АУФ13	148,865	0,5868	1,875	275,100	**0,8625**	**0,873**	147,935	0,1508	4,415	275,013	**0,0261**	**0,026**
АКГФ	**149,840**	**0,5644**	**0,59**	275,030	1,8191	1,82	147,930	**0,1401**	4,425	**275,003**	**0,0587**	0,059
А	149,608	**0,5472**	**0,701**	**274,970**	**3,0091**	**3,01**	147,915	0,1528	4,500	**275,013**	0,0861	0,086
А′	149,660	1,0044	1,12	275,100	5,5500	5,56	147,953	**0,1365**	**4,327**	275,025	0,0769	**0,078**
А″	**149,828**	0,6265	**0,656**	274,930	6,1176	6,123	147,923	0,1527	4,467	275,023	0,1007	0,101
3) Исходные условия: σ^2_a =0,01, $P_{имп}$=0,00, $A_{имп}$=0,00; τ^{test}_{peak} ***=150***; τ^{test}_{pol} ***=275***;												
Исх.	149,345	2,3060	2,735	275,145	9,3140	9,335	148,303	1,2772	4,157	275,048	0,6040	0,606
МФ5	149,678	1,4622	**1,566**	**274,970**	6,9066	6,908	147,963	0,7473	4,897	275,063	0,2849	0,289
ЭКГМ	**149,805**	2,0370	2,075	274,838	9,9498	9,976	**148,075**	0,7269	**4,433**	275,028	0,1880	0,189
АУФ9	149,148	**1,0745**	1,800	275,268	3,1372	3,209	147,895	0,3615	4,793	274,980	0,1596	0,160
АУФ13	148,780	1,5116	3,000	**274,970**	**1,9891**	**1,990**	147,895	**0,3315**	4,763	**275,018**	**0,1184**	**0,119**
АКГФ	**149,465**	**1,2588**	**1,545**	**275,100**	**2,7100**	**2,720**	147,878	0,3662	4,869	**275,015**	0,1573	0,158
А	149,508	1,5787	1,821	274,893	4,9847	4,996	147,920	0,3786	4,705	274,980	0,1696	0,170
А′	**149,645**	2,3390	2,465	**274,910**	**4,2519**	4,260	147,915	0,3653	4,713	**275,003**	0,1638	**0,164**
А″	**149,655**	2,3985	2,518	**274,935**	7,7008	7,705	**147,965**	**0,3938**	**4,535**	274,980	0,1896	0,190
4) Исходные условия: σ^2_a =0,03, $P_{имп}$=0,00, $A_{имп}$=0,00; τ^{test}_{peak} ***=150***; τ^{test}_{pol} ***=275***;												
Исх.	148,995	6,4450	7,455	274,940	19,096	19,1	148,680	2,7726	4,515	274,935	3,1533	3,158
МФ5	**149,600**	3,0775	**3,238**	274,762	12,525	12,581	**148,270**	2,2271	5,220	275,013	0,6336	0,634
ЭКГМ	**149,553**	5,1660	5,366	274,760	13,845	13,903	**148,218**	1,7964	**4,972**	275,010	0,5349	0,535
АУФ9	148,973	**2,2955**	**3,350**	**275,178**	6,2097	6,241	147,908	0,8977	5,274	**275,008**	**0,3037**	**0,304**
АУФ13	148,718	2,7639	4,407	274,850	**3,7575**	**3,780**	147,885	**0,7543**	5,228	275,033	0,3077	0,309
АКГФ	**149,220**	**2,1316**	**2,740**	**275,050**	**5,7775**	**5,780**	147,890	**0,7604**	5,213	274,990	**0,3049**	**0,305**
А	149,143	3,4709	4,205	274,985	8,0523	8,053	147,968	0,9952	5,124	**275,010**	0,3324	**0,333**
А′	**149,210**	**2,4659**	**3,090**	274,990	**6,6499**	**6,650**	147,940	0,9739	5,218	**275,010**	0,3499	0,350
А″	**149,200**	3,6575	4,298	**275,048**	8,9115	8,914	**148,025**	1,1194	**5,020**	275,033	0,3377	0,339

Использование самого метода сечений приводит к значительному: для пика в единицы-десятки раз, а для полиномиального экстремума на порядок и более уменьшению дисперсии оценок $\sigma^2_{\tau_{peak}}$, $\sigma^2_{\tau_{pol}}$, а применение предварительной нелинейной фильтрации приводит к дополнительному уменьшению дисперсии в сравнении с исходными оценками в единицы, а для некоторых ситуаций и десятки раз.

Показатели точности оценок координат экстремумов при использовании ЛАА близки к показателям однопроходных фильтров – наилучших для соответствующего типа экстремума. Для пика наибольшую точность по статистическим показателям МО $M\left(\tau_{peak}\right)$, дисперсии $\sigma^2_{\tau_{peak}}$ и интегральной ошибки δ_{peak} обеспечивают ЛАА на основе компонентных фильтров ЭКГМ13 и АКГФ13 (варианты A'', A'), а для полиномиального экстремума несколько лучшие показатели имеет ЛАА A, использующий МФ5, АУФ9, АУФ13 (табл. 1, ситуации 1 – 2).

При увеличении дисперсии помех (табл. 1, $\sigma^2_a = 0{,}003$, ситуация 2) характеристики рассматриваемых нелинейных фильтров примерно такие же, как для предыдущей ситуации. В данных условиях более наглядно проявляются преимущества использования предварительной нелинейной фильтрации для повышения точности оценок координат пикообразного и полиномиального экстремумов. МО оценок $M\left(\tau_{peak}\right)$ и $M\left(\tau_{pol}\right)$ после применения нелинейных фильтров с высокими динамическими свойствами (ЭКГМ13, АКГФ13 и МФ5) существенно более близки к истинным значениям τ^{test}_{peak} и τ^{test}_{pol} в сравнении с точностью оценок координат по исходному сигналу, а значения дисперсий σ^2_{peak} , σ^2_{pol} заметно меньше. Наименьшие значения дисперсии для пика обеспечивают нелинейные фильтры АУФ9 и АКГФ13 со средними динамическими и статистическими свойствами, а для полиномиального экстремума – АУФ13, АУФ9, АКГФ13, характеризующиеся хорошими "сглаживающими" свойствами. Применение метода сечений приводит к значительному улучшению статистических показателей точности при использовании α-урезанных фильтров: МО $M\left(\tau_{pol}\right)$ практически не отличается от истинного значения τ^{test}_{pol}, дисперсии оценок σ^2_{peak} ,σ^2_{pol} имеют на порядок и более меньшие значения в сравнении с прямым методом, СКО ошибок составляет сотые доли Δt .

При среднем уровне шума $\sigma^2_a = 0{,}01$ (табл. 1, ситуация 3) дисперсия исходных оценок координат максимумов возрастает и становится порядка единиц отсчетов. По показателю МО оценок координаты пика наилучшими являются ЭКГМ13 и, соответственно, ЛАА A', A'', однако они немного уступают МФ5 и ЛАА A по значениям дисперсии σ^2_{peak} , так как ЭКГМ характеризуется низкой эффективностью подавления помех на линейно изменяющихся участках [5, 7]. Наименьшие значения дисперсии оценок обеспечивают АУФ9, АКГФ13 в силу своих средних динамических свойств и достаточно высокой степени подавления шума, а для полиномиального экстремума – АУФ13, обладающий лучшими "сглаживающими" свойствами. Применение метода сечений в сравнении с прямым методом приводит к значительному, примерно на порядок, уменьшению дисперсий σ^2_{peak} , σ^2_{pol} в сравнении с исходным сигналом, использование же нелинейной фильтрации уменьшает дисперсии еще в несколько раз.

При высоком уровне помех $\sigma^2_a = 0{,}03$ (табл. 1, ситуация 4*)* применение всех рассмотренных нелинейных фильтров приводит к улучшению интегральных показателей точности оценок координат экстремумов δ_{peak} , δ_{pol} . Для области пика по показателю МО $M\left(\tau_{peak}\right)$ наилучшими свойствами характеризуются МФ5, ЭКГМ13, АКГФ13 и ЛАА A,

A', A'', а по дисперсии оценок σ^2_{peak} - нелинейные фильтры АКГФ13, АУФ9 со средними динамическими и статистическими свойствами. Для полиномиального экстремума лучшие показатели $M\left(\tau_{pol}\right)$ имеют АКГФ13 и АУФ9, благодаря их высоким динамическим и статистическим свойствам для данного типа сигнала, а наименьшие значения дисперсии σ^2_{pol} обеспечивает АУФ13, характеризующийся высокой степенью подавления шума. Метод сечений обеспечивает значительный выигрыш по показателям точности оценок координат экстремумов, который при использовании нелинейной фильтрации для пика возрастает в единицы раз, а для полиномиального экстремума практически на порядок.

Присутствие импульсных помех (табл. 1, ситуации 5 – 6) приводит к резкому ухудшению точности исходных оценок координат экстремумов, значения дисперсий σ^2_{peak}, σ^2_{pol} в большей степени зависят от вероятности появления импульсных помех $P_{имп}$, чем от уровня шума σ^2_a. В то же время наличие импульсных помех существенно меньше влияет на статистические показатели точности оценок координат при использовании предварительной нелинейной фильтрации (сравним дисперсии оценок при одинаковых значениях σ^2_a, как при наличии импульсных помех, так и при их отсутствии – табл. 1, ситуации 5, 6 и 2, 3). Это свидетельствует о том, что применение рассмотренных нелинейных фильтров практически полностью устраняет влияние импульсных помех на точность оценок параметров экстремумов. Причем робастные свойства нелинейных фильтров ЭКГМ и АКГФ оказываются достаточными для устранения импульсных помех при заданной, достаточно большой, их вероятности. По значениям МО $M\left(\tau_{peak}\right)$ в области пика наилучшие показатели обеспечивают ЭКГМ и АКГФ, характеризующиеся хорошим сохранением пика, и МФ5, обладающий высокими динамическими и робастными свойствами, а по дисперсии σ^2_{peak} – АКГФ13, МФ5, АУФ9.

Для полиномиального экстремума наилучшие показатели обеспечивают α-урезанные фильтры АУФ13, АКГФ13, АУФ9, причем при возрастании дисперсии шума: $\sigma^2_a = 0{,}01$ (табл. 1, ситуация 6) большее влияние на точность оценок оказывает способность фильтра подавлять шум, поэтому наименьшие значения дисперсии обеспечивает АУФ13.

Использование метода сечений приводит к резкому улучшению точности оценок координат экстремумов, особенно при предварительной фильтрации процесса. Показатели точности ЛАА так же, как и в предыдущих случаях, близки к наилучшим показателям компонентных однопроходных фильтров для определенного типа экстремума.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

а) применение рассмотренных нелинейных фильтров и методик приводит к существенному повышению точности оценок координат пикообразных и полиномиальных экстремумов по обработанному сигналу в широком диапазоне изменения дисперсии аддитивного шума и в условиях наличия импульсных помех;

б) при возрастании дисперсии помех выигрыш в точности, характеризуемый в разах, увеличивается, что особенно важно, поскольку при высоком уровне помех задача улучшения точности является наиболее актуальной;

в) наличие импульсных помех приводит к резкому ухудшению точности исходных оценок координат экстремумов. В то же время при использовании предварительной обработки процесса рассмотренными нелинейными фильтрами наличие импульсных помех практически не влияет на статистические показатели точности оценок;

г) при приоритете требования вторичной обработки по сохранению пиков в диапазоне низкого-среднего уровня шума рекомендуется использование КИХ-гибридных медианных фильтров с экстраполирующими субапертурами 1-го порядка [6] и локально-адаптивные алгоритмы на их основе [8];

д) статистические показатели точности оценок координат экстремумов при использовании локально-адаптивных алгоритмов близки к наилучшим для определенного типа экстремума фильтрам, учитывая, что локально-адаптивные алгоритмы в целом обеспечивают наилучшие интегральные показатели качества вторичной обработки [3, 9];

е) применение метода сечений приводит к значительному повышению точности оценок координат экстремумов: дисперсии оценок на порядок меньше в сравнении с оценками по прямому методу, использование же нелинейной фильтрации уменьшает дисперсии еще в единицы-десятки раз.

Таким образом, использование рассмотренных нелинейных фильтров, в частности локально-адаптивных алгоритмов, является высокоэффективным средством не только подавления помех с различными, часто априорно неизвестными характеристиками, но и существенного повышения точности измерения параметров пиков и полиномиальных экстремумов по обработанному сигналу. Выигрыш в точности определения координат составляет единицы раз и в определенных случаях доходит до одного – двух порядков, причем он наибольший в сложных помеховых ситуациях.

Литература

1. Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.

2. Astola J., Kuosmanen P. Fundamentals of Nonlinear Digital Filtering. – USA: CRC Press LLC, 1997. – 276 p.

3. Зеленский А.А., Кулемин Г.П., Лукин В.В., Мельник В.П. Локально-адаптивные устойчивые алгоритмы обработки радиоизображений. – Х.: ИРЭ НАН Украины, 1993. – 39 с. (Препр./ НАН Украины. ИРЭ; 93-143).

4. Лукин В.В. Динамические и статистические свойства алгоритмов нелинейной фильтрации одномерных информационных сигналов // Авиационная и ракетно-космическая техника. – Х.: ХАИ, 1998. – Вып.7. – С. 134-141.

5. В. В. Лукин, Н. О. Тулякова, М.О. Дорощук. Анализ свойств алгоритмов нелинейной фильтрации одномерных информационных сигналов // Авіаційно-космічна техніка та технологія. – Х.: Національний аерокосмічний університет «ХАІ», 1999. – Вып. 12. – С. 109-113.

6. Heinonen H., Neuvo Y. FIR Median Hybrid Filters with Predictive FIR Substructures // Proc. IEEE Transaction of Acoustics, Speech and Signal Processing, December, 1985. – P. 34-39.

7. Тулякова Н. О. Применение нелинейной фильтрации для повышения точности оценки амплитуды пикообразных экстремумов // Авіаційно-космічна техніка та технологія. – Х.: Національний аерокосмічний університет «ХАІ», 2000. – Вып. 21. – С. 157-160.

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

9. Лукин В.В. Анализ поведения показателей локальной активности для нелинейных адаптивных фильтров // Радиофизика и электроника. – 1998. – Вып.3. – № 2. – С.80-89.

Поступила в редакцию 25.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Лукин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.