

УДК 621.391.14

© И. А. Ардашникова, А. Л. Москвин, В. И. Хащанский

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛА ПРИ АНАЛИЗЕ В ПОТОКЕ

Разработан алгоритм многопараметрической предварительной обработки детектируемых сигналов для измерительных систем анализа в потоке, сочетающих принципы проточно-инжекционного и непрерывного проточного анализа. Обоснован выбор методов и параметров цифровой фильтрации при решении различных задач. Приведены примеры практической реализации.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее широко применяемых методов для контроля объектов окружающей среды, технологических процессов и медицины является анализ в потоке с применением различных способов конечного определения. При разработке аппаратуры для судовых экоаналитических комплексов для контроля качества природных вод в основу было положено совмещение режимов непрерывного проточного (НПА) и проточно-инжекционного (ПИА) анализов с переключением из одного режима в другой по желанию оператора [1]. При необходимости получения максимальной информативности, в таких случаях как наблюдение за изменением состава контролируемой воды, отбираемой с движущегося судна, обследование акваторий с локальными зонами загрязнений, например факелами сбросов, более предпочтителен режим НПА. Преимуществом режима ПИА является возможность учета дрейфа базовой линии детектора и получения более точной качественной информации, но данные при этом получаются не непрерывно, а со скважностью 3–5 мин.

При разработке программно-математического обеспечения (ПМО) для реализации различных методов анализа в потоке (ПИА и НПА) в аппаратуре судовых экоаналитических комплексов потребовалась разработка взаимосогласованной системы математических методов обработки детектируемых сигналов как на стадии предварительной обработки, так и при расчете концентрации контролируемых компонентов. Корректность применяемых на этапе предварительной обработки математических методов в конечном итоге определяет точность измерения содержания компонентов в контролируемой среде.

Детектируемый сигнал в проточно-инжекционных анализаторах подвержен влиянию многочисленных мешающих факторов. При обработке результатов измерений необходимо выделить полезный сигнал на фоне помех, вызванных неидеальностью системы: шумов гидравлического трак-

та, вызываемых пульсациями перистальтического насоса, резкими изменениями оптической плотности на границах слияния дозируемых растворов, а также газовыделением, связанным с подогревом пробы, и, как следствие, со снижением растворимости газов.

Цель данной работы заключается в выборе и оптимизации различных методов цифровой фильтрации сигналов применительно к анализу в потоке.

1. ОСОБЕННОСТИ ДЕТЕКТИРУЕМЫХ СИГНАЛОВ ПРИ АНАЛИЗЕ В ПОТОКЕ

Сигнал при анализе в потоке является циклически повторяемым и медленно меняющимся (временная характеристика — от 10 до 400 сек).

Характеристики отношения амплитуды полезного сигнала к его полуширине, а также время удерживания максимума пика являются воспроизводимыми в пределах 5 %.

Помеха, мешающая детектированию полезного сигнала при анализе в потоке, представляет собой:

- 1) регулярные составляющие с частотой от 10 до 100 Гц;
- 2) нерегулярные составляющие (от 0,1 до 1 Гц), связанные с особенностями функционирования исполнительных устройств ПИА-анализатора;
- 3) случайные искажения сигнала, связанные с попаданием газовых включений в пробу в измерительной ячейке.

Принципиальной особенностью измерительной системы анализа в потоке, для которой разрабатывалось ПМО, включающее описываемые способы обработки сигнала, являлось также большое количество информационных каналов, работающих в реальном времени, и необходимость отображения данных на картах маршрута движения судна, что делало особенно острым вопрос о ресурсах оперативной памяти и производительности компьютера.

При решении поставленной задачи были рассмотрены следующие математические методы

предварительной обработки аналитических сигналов детекторов: арифметическое усреднение измеряемых значений напряжения, медианная фильтрация, экспоненциальное сглаживание [2] и использование оптимального фильтра [3].

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ

В качестве первого этапа борьбы с помехами применяется арифметическое усреднение значений напряжения в течение секунды. Для удобства программной реализации частота первичной дискретизации входного аналогового сигнала была выбрана равной частоте прерываний системного таймера ПЭВМ — 18,2 Гц. В результате 18-кратного усреднения получается отсчет напряжения с периодом приблизительно равным 1 с. Такое усреднение практически полностью подавляет влияние наводки частоты сети — 50 Гц и позволяет также значительно уменьшить объем обрабатываемых данных, что является немаловажным фактором, т.к. в состав измерительной системы может входить до 32 анализаторов.

Арифметическое усреднение удаляет регулярную составляющую шума с частотой от 10 до 100 Гц, но не фильтрует кратковременные всплески напряжения с амплитудой, сопоставимой с полезным сигналом, которые могут возникнуть, например, при прохождении пузырька газа через ячейку. Такие всплески целесообразно удалять с помощью широко используемого в обработке изображений медианного фильтра.

При построении сложных измерительных комплексов надо иметь в виду, что процедура медианной фильтрации является относительно ресурсоемкой операцией и при одновременной обработке многочисленных потоков данных, поступающих с различных детекторов, возрастают требования к производительности используемого компьютера и к объему оперативной памяти.

Для решения данной задачи был реализован традиционный метод медианной фильтрации. Медианный фильтр содержит буфер, в который помещается скользящая выборка из нечетного числа отсчетов входного (фильтруемого) сигнала. Для получения выходного отсчета содержимое буфера подвергается сортировке, и результатом медианной фильтрации является отсчет, оказавшийся после сортировки в середине буфера. Очевидно, что экстремальные значения сигнала, обусловленные импульсной помехой, не могут оказаться на выходе медианного фильтра, если число отсчетов, искаженных помехой, не превышает половины размера буфера. В отличие от арифметического фильтра, производящего свертку входного сигнала с импульсной характеристикой, медианный

фильтр не производит размывания фронтов сигнала во времени, т.е. длительность переходного процесса, или время выхода сигнала на установившееся значение, не изменяется в процессе фильтрации. Однако медианный фильтр, как и другие фильтры, вносит в сигнал задержку. Задержка сигнала на медианном фильтре должна учитываться при обработке, поскольку привязка к положениям крана-переключателя потоков используется для поиска нужных значений напряжения в массиве полученных с АЦП данных.

В случае если производительность компьютера недостаточна для работы с многоканальной системой анализа, можно снизить размеры буферов медианных фильтров до 30–40 с. Такие параметры медианной фильтрации вполне приемлемы для удаления большинства импульсных помех.

Ограничения на применение медианной фильтрации накладываются и при работе с методиками, дающими аналитический сигнал в форме пика. Применение медианного фильтра в этом случае приводит к уменьшению амплитуды полезного сигнала, поэтому рекомендуется ограничивать длительность окна медианного фильтра 5–11 с.

Следующей ступенью фильтрации детектируемых сигналов является экспоненциальное сглаживание, которое удаляет низкочастотную шумовую составляющую (от 1 до 0,5 Гц). Для получения очередного отсчета на выходе такого фильтра суммируется предыдущий отсчет и отсчет из входной последовательности, взятые с весами, сумма которых равна 1:

$$Y_i = Y_{i-1} \cdot k + X_i \cdot (1 - k),$$

где X_i — i -й отсчет на входе сглаживающего звена, Y_i — i -й отсчет на его выходе, k — коэффициент экспоненциального усреднения вычисляется по формуле

$$k = 2^{-m},$$

где m — постоянная времени экспоненциального усреднения.

Такой фильтр является простейшим вариантом фильтра нижних частот (ФНЧ) с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) [2].

Вопрос об оптимальности используемого фильтра достаточно сложен. Например, при использовании экспоненциального усреднения чем ближе к единице выбран вес предыдущего отсчета, тем больше постоянная времени фильтра, тем сильнее сглаживание пульсаций напряжения, поступающих на вход фильтра. С другой стороны, этот фильтр увеличивает длительность фронтов, и выбор чрезмерной постоянной времени приведет в конечном итоге к увеличению длительности анализа.

Поиск компромиссного значения постоянной времени ФНЧ (или связанной с ней частотой

среза) привел к идее использования оптимального фильтра, представляющего собой набор весовых коэффициентов, с которыми производится свертка отсчетов сигнала детектора. Другими словами, это цифровой фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ).

В [3] показано, что для получения максимального выигрыша в отношении сигнал/шум передаточная функция должна быть согласована со спектром сигнала и с энергетическим спектром шума:

$$K(i\omega) = BW_0 \frac{S^*(\omega)}{W(\omega)} e^{-i\omega t_0},$$

где $K(i\omega)$ — передаточная функция; $S^*(\omega)$ — комплексно сопряженная функция спектра входного сигнала; $W(\omega)$ — энергетический спектр шума; B, W_0 — постоянные коэффициенты.

Для максимизации отношения сигнал/помеха в фильтре должна осуществляться компенсация начальных фаз спектра входного сигнала. Поэтому в правую часть входит комплексно сопряженная функция. Модуль передаточной функции должен быть пропорционален модулю спектра входного сигнала и обратно пропорционален энергетическому спектру шума на выходе.

Такой способ фильтрации часто применяется для сигналов в частотной области. Учитывая регулярный характер аналитического сигнала в ПИА, нами сделана попытка применить оптимальный фильтр к анализу в потоке для сигналов с временной разверткой. При фильтрации во временной области (с помощью свертки) используем идеализированную форму пика сигнала в качестве импульсной характеристики фильтра.

Возможность применения оптимального фильтра в области анализа в потоке основана на предположении, что форма пика на сигналах с различной концентрацией сохраняется. Это предположение было подтверждено при анализе экспериментальных данных, полученных на проточно-инжекционном анализаторе «ПИАКОН» при обработке методик определения ионов аммония, растворенных нефтепродуктов и фенолов в питьевой воде и в природных водах.

Такой фильтр существенно искажает форму пика, но это обстоятельство несущественно при расчете концентрации в соответствии с градуировочными кривыми. Единственным условием является применение оптимального фильтра и при построении градуировочной зависимости.

Для получения оптимального фильтра используется максимальная концентрация и проводятся 5–6 циклов измерений, после которых полученный сигнал усредняется. Форма оптимального фильтра соответствует форме пика, образующегося в ре-

зультате подачи пробы в ячейку на выходе детектора. В случае изменения условий проведения измерений (таких как смена гидравлической схемы или коррекция длительности фазы) форма пика может претерпеть изменения, поэтому требуется повторно провести процедуру построения оптимального фильтра.

Использование оптимального фильтра в анализе в потоке ограничивает то обстоятельство, что данный метод фильтрации вносит в сигнал серьезную задержку. Ее можно рассчитать по формуле:

$$\Delta t = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} f(x_i) \cdot x_i}{\sum_{i=0}^{N-1} f(x_i)},$$

где Δt — задержка, вносимая в сигнал; $f(x_i)$ — функция детектируемого сигнала; N — число отсчетов в буфере оптимального фильтра.

Т. к. число отсчетов во временной выборке, используемой для построения оптимального фильтра, при анализе в потоке равно циклу измерений (что составляет около 180–260 с), задержка, вносимая в исходный сигнал, может достигать нескольких минут, что нежелательно при работе в режиме непрерывного проточного анализа.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Каждый из применяемых методов фильтрации вносит свою задержку в сигнал детектора, в связи с чем возникает дилемма — улучшать ли отношение сигнал/шум за счет увеличения длительности анализа или в некоторых конкретных случаях пренебрегать качеством фильтрации сигнала. Поэтому при построении многопараметрических систем анализа в потоке к настоящему времени сложились два подхода:

- максимальное улучшение отношения сигнал/шум,
- минимальное отставание полученной информации от реального сигнала при достижении приемлемого отношения сигнал/шум.

Созданное для проточно-инжекционных анализаторов программное обеспечение дает возможность использовать весь набор данных математических методов фильтрации. Реализация конкретной обработки сигналов обуславливается и конкретными условиями определения, и выбранными методиками химического анализа. Оператору предоставляется возможность гибкого конфигурирования системы в зависимости от стоящих перед ним задач: он может изменять параметры предварительной обработки сигнала такие, как окно

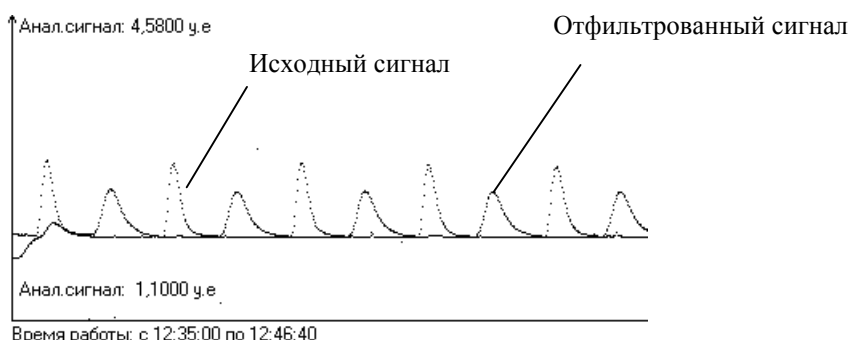


Рис. 1. Сигнал детектора при определении фосфатов до и после применения оптимального фильтра

медианного фильтра (в секундах), постоянная времени экспоненциального усреднения, число снимаемых циклов при построении оптимального фильтра и т.д. Параметры анализа можно сохранить в файле конфигурации для последующего использования конкретной настройки. Для неподготовленного пользователя предусмотрен выбор параметров анализа «по умолчанию», что позволяет использовать настройки, приемлемые в типичных условиях измерений.

Применение системы алгоритмов предварительной обработки сигнала при анализе в потоке проиллюстрировано данными, полученными при измерении содержания фосфатов при производстве удобрений.

В данном случае является критичным получение максимальной точности результатов, что допустимо даже в ущерб временным характеристикам цикла определения. Поэтому для данной методики при реализации предварительной обработки следует пользоваться первым подходом и использовать оптимальный фильтр, несмотря на то, что вносимая им задержка в получение информации составляет приблизительно 80–120 с. График аналитического сигнала до и после применения оптимального фильтра приведен на рис. 1.

В табл. 1 приведены результаты измерения контролируемого компонента для различных концентраций до и после обработки сигнала детектора. Из таблицы видно, что реализация метода оптимальной фильтрации минимизирует среднеквадратическое отклонение (СКО) полученных результатов. В зависимости от величины измеряемого сигнала выигрыш по СКО составляет от 2,2 до 5,6 раза, причем 40–50 % выигрыша достигается благодаря использованию оптимального фильтра.

Отставание информации от реального сигнала

Табл. 1. Результаты измерений фосфатов

Измеренные величины	Концентрации, г/л		
	4	8	16
СКО до фильтрации, о.е.	0,004	0,0068	0,01
СКО после фильтрации, о.е.	0,0018	0,0017	0,0018

в 1–2 мин вполне приемлемо при анализе веществ в лабораторных условиях при проведении серии параллельных измерений (в этом случае обычно используется режим ПИА). Однако такое отставание во времени при использовании судовых природоохранных комплексов, построенных с применением аппаратуры анализа в потоке и в основном работающих в режиме непрерывного проточного анализа при движении судна, чаще всего недопустимо.

В случае использования алгоритма в режиме НПА в целях минимизации отставания полученной информации от реального сигнала применяется сочетание арифметического усреднения, экспоненциального усреднения и медианной фильтрации, вносящих меньшую задержку в получение результата. Это иллюстрируется рис. 2, на котором показан детектируемый сигнал при определении железа до и после предварительной обработки.

В табл. 2 приведены задержки, вносимые в анализ каждым из используемых методов обработки детектируемого сигнала. Получаемое в этом случае среднеквадратическое отклонение на уровне 10 % вполне удовлетворяет требованиям ГОСТов на анализ природных вод.

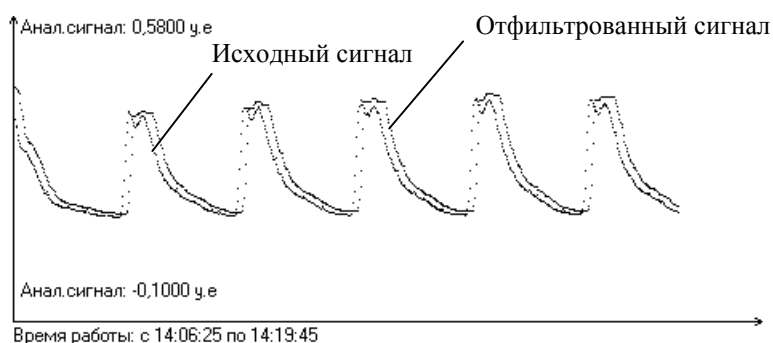


Рис. 2. Сигнал детектора при определении железа до и после предварительной обработки

Табл. 2. Задержки анализа при измерении железа

Характеристика	Метод предварительной обработки сигнала		
	Арифметическое усреднение	Медианный фильтр	Экспоненциальное сглаживание
Число отсчетов сигнала в выборке	18	25	—
Вносимая задержка, с	Не значима	12	—

На основе рассмотренных алгоритмов фильтрации детектируемых сигналов был разработан пакет ПМО для анализаторов типа «ПИАКОН», позволяющий работать как с отдельными анализаторами, так и с судовыми природоохранными комплексами. ПМО используется для проточно-инжекционных анализаторов, работающих в составе судовых природоохранных комплексов типа «Акватория» на судах «Экопатруль-1» и «Экопатруль-2», созданных по заказу Федерального экологического фонда РФ.

ионометрическим детектированием для непрерывного контроля природных и сточных вод // Заводская лаборатория. 1996. № 1. С. 7–11.

2. Отчес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир. 1982. 428 с.
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь. 1977. 670 с., с. 592–596.

Научно-производственное объединение «Гранит-НЭМП», Санкт-Петербург

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москвин А.Л., Мозжухин А.В., Москвин Л.Н. Проточные анализаторы с фотометрическим и

Материал поступил в редакцию 05.04.2000.

APPLICATION OF MATHEMATICAL METHODS OF SIGNAL FILTERING IN FLOW ANALYSIS

I. A. Ardashnikova, A. L. Moskvina, V. J. Khashchansky

The NPO Granit NEMP, Saint-Petersburg

The algorithm of multiparametrical preprocessing of detected signals in the measuring system of flow analysis combining principles of the flow-injection and continuous flow analysis has been developed. The choice of methods and parameters of digital filtering for various applications is validated. The examples of practical realization are given.