

Г.Э. Куликов, В.Т. Калайда

Алгоритм высокочастотной фильтрации данных для лазерного спектрометра с ФПЗС-линейкой на основе вейвлет-преобразования с автоматическим выбором коэффициентов

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 22.09.2004 г.

Описаны результаты, полученные при апробации адаптивного алгоритма подбора коэффициентов вейвлет-фильтрации данных, поступающих с фотоприемной ПЗС-линейки импульсного лазерного спектрометра. Показано, что применение фильтрации позволяет надежно выделить и зарегистрировать сигнал, полностью замаскированный собственными шумами приемной аппаратуры.

Введение

Для исследования переизлучения молекулярных сред, возбуждаемых двухчастотным оптическим полем, и проверки гипотезы о генерации в молекулярной среде поля с большим моментом количества движения [1, 2] используется «бигармонический лазерный спектрометр» [3], структура которого представлена на рис. 1. Особенностью планируемого эксперимента по проверке гипотезы [2] является необходимость регистрации узкой линии переизлучения,

интенсивность которой не имеет надежных оценок. Регистрация спектра переизлучения производится многоэлементным фотоприемником – ФПЗС-линейкой ИЛХ-511, так как применение фотоумножителя затруднено паразитной засветкой от линий излучения «накачки» и необходимостью наблюдать в течение импульса широкий спектральный интервал. Таким образом, в планируемом эксперименте важно добиваться максимально возможного выхода полезного сигнала с фотоприемной линейки.

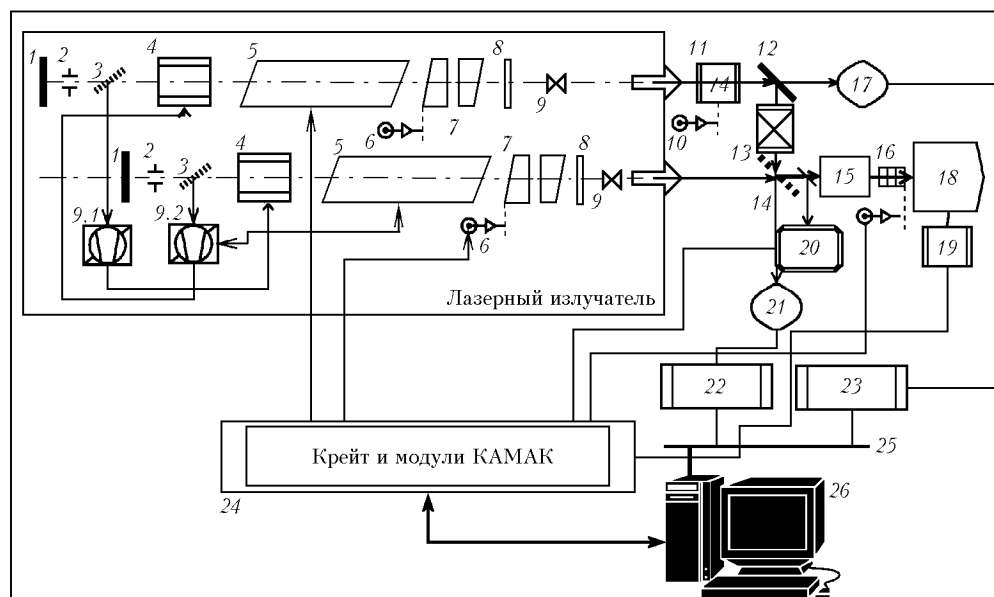


Рис. 1. Блок-схема спектрометра: 1 – глухое зеркало; 2 – диафрагма; 3 – поляризатор; 4 – ЭО-затвор; 5 – кварц; 6, 7 – шаговый двигатель и эталон Фабри-Перо; 8 – выходное зеркало; 9.1, 9.2 – скоростные фотоприемники и устройство управления; 9 – удвоитель; 10 – шаговый двигатель; 11 – управляемая четвертьволновая пластинка; 12 – глухое зеркало; 13 – призма Глана; 14 – светоделитель; 15 – оптика и исследуемая среда; 16 – ИФП заграждающего фильтра; 17, 21 – скоростные фотоприемники; 18 – спектрограф ДФС-452 и ФПЗС-линейка; 19 – устройство управления; 20 – измеритель мощности излучения ИМО; 22, 23 – скоростные АЦП; 24 – крейт КАМАК и модули сбора данных и управления; 25 – локальная сеть стенда; 26 – управляющий компьютер и программное обеспечение

Пороговая чувствительность ФПЗС-приборов ограничивается не только величиной квантового выхода фотоприемной ячейки и тепловыми шумами, но и коммутационными шумами и помехами в контуре измерений [4]. Сигнал, получаемый с полностью затемненного фотоприемника, представляет собой суперпозицию гауссова шума с коммутационными помехами, обусловленными периодической структурой ячеек ФПЗС-линейки. То есть сигнал на выходе ФПЗС-регистратора можно описать выражением

$$s(t) = f(t) + \sigma(e(t) + \omega(t)),$$

где $f(t)$ – полезный сигнал; σ – уровень шума; $e(t)$ – гауссова компонента шумового сигнала; $\omega(t)$ – периодическая компонента шумового сигнала, причем информация о помехе содержится в более высокочастотной области спектра сигнала, а полезная компонента – в низкочастотной.

Для редукции шумов измерения указанного типа традиционно используются алгоритмы сглаживания, основанные на преобразовании Фурье [5, 6]. Однако ограниченность длины набора данных (конечное число ячеек ФПЗС-линейки) и отсутствие формального алгоритма выбора оптимального окна преобразования затрудняют [6] их использование.

Одной из наиболее современных технологий сглаживания шума, свободной от недостатков традиционного подхода, основанного на преобразовании Фурье, является вейвлет-анализ [10].

В качестве вейвлета берутся непериодические, локализованные в пространстве функции, например функции, имеющие один или два близко расположенных глобальных экстремума и быстро затухающие на бесконечности. Минимальным требованием к таким функциям обычно является наличие одного нулевого момента, т.е. равенство нулю интеграла от функции по всей области определения. Распространенный пример вейвлета – вторая производная гауссиана (функции плотности нормального распределения), которая получила название «мексиканская шляпа».

Базисом векторного пространства является множество линейно независимых векторов, таких, что любой вектор из этого пространства может быть представлен в виде их линейной комбинации. Скалярное произведение сигнала с базисными векторами (функциями) рассматривается как *непрерывное вейвлет-преобразование*. Вейвлет-коэффициенты преобразования отражают близость сигнала к вейвлету данного масштаба.

В дискретном случае для анализа сигнала на разных масштабах используются фильтры с разными частотами среза. Сигнал пропускается через древовидно соединенные низкочастотные (НЧ) и высокочастотные (ВЧ) фильтры.

Масштаб изменяется за счет фильтрации сигнала, а разрешение сигнала, являющееся мерой количества детальной информации, изменяется за счет децимации (удаления некоторых отсчетов, т.е. уменьшения частоты дискретизации) и интерполяции.

Сигнал пропускается через НЧ- и ВЧ-фильтры и децимируется в 2 раза. В результате на первом шаге временное разрешение уменьшается в 2 раза, так как сигнал характеризует только половина отсчетов. Однако частотное разрешение удваивается, так как сигнал занимает теперь половинную полосу частот и неопределенность уменьшается. Затем выход НЧ-фильтра подается на такую же схему, а выход ВЧ является вейвлет-коэффициентом.

Синтез сигнала выполняется в обратном порядке по сравнению с анализом. Сигнал на каждом уровне интерполируется и пропускается через фильтры синтеза НЧ и ВЧ (фильтры анализа и синтеза идентичны, за исключением обратного следования коэффициентов).

Технология вейвлет-преобразования, в отличие от преобразования Фурье, свободна от эффектов Гиббса и дает хорошие результаты на коротких последовательностях. Однако выбор оптимальных коэффициентов фильтрации для вейвлет-сглаживания – сложная и не вполне формализуемая процедура [8, 9].

Цель настоящей работы – применить адаптивный алгоритм выбора коэффициентов фильтрации и экспериментально исследовать эффективность выделения слабого полезного сигнала спектрографа, оборудованного ФПЗС-линейкой PLX-511, за счет применения средств сглаживания шума, основанных на вейвлет-преобразовании.

В рамках вейвлет-технологии сглаживание шума производится в 4 этапа:

- разложение сигнала по базису вейвлетов;
- выбор значения порога для каждого уровня разложения;
- отбрасывание коэффициентов детализации, лежащих ниже выбранного значения порога (трешолдинг);
- обратное вейвлет-преобразование (реконструкция сигнала).

Качество сглаживания шума непосредственно зависит от выбора глубины разложения, от которой зависит степень отбрасывания изменений сигнала, и порогового значения в процедуре трешолдинга [7–9]. Существует несколько критериев для выбора порога, тем не менее точное значение порога трешолдинга нужно уточнять экспериментально [9]. В данной работе предлагается адаптивный алгоритм автоматического подбора трешолдинга за счет сравнения результата шумоподавления с известным, образцовым, сигналом.

При подготовке к спектроскопическим измерениям с использованием дифракционного спектрографа можно зафиксировать какой-либо хорошо известный спектр и использовать известные, заведомо очищенные от шумов данные в качестве образцового сигнала. В настоящей работе порог ϵ подбирался путем итерационного увеличения значения ϵ и последующего сравнения очищенного шума сигнала от шума сигнала ФПЗС с положениями линий в спектре неона (область 530 нм, данные Атласа). Предлагается следующий алгоритм:

- 1) затемнить ФПЗС-линейку и записать «темновой» сигнал ФПЗС;

2) записать участок спектра свечения неоновой лампы ТН-0,5;

3) компенсировать неравномерность чувствительности ФПЗС по ячейкам вычитанием «темнового» сигнала;

4) усреднить «темновой» сигнал и использовать его в качестве значения порога для процедуры поиска пиков;

5) найти пики линий (п. 2), поставить в соответствие найденным пикам «идеальные» данные Атласа;

6) уменьшить световой сигнал на входе спектрометра так, чтобы процедура поиска центров линий возвращала «неудачу», но пики в сигналограмме были различимы;

7) произвести прямое и обратное дискретное вейвлет-преобразование темнового сигнала, с выбором начального значения трешолдинга по мягкому критерию [8, 9] так, чтобы среднее значение сглаженного сигнала равнялось нулю. Запомнить значения порога в качестве начального для п. 8;

8) в цикле производить прямое и обратное дискретное вейвлет-преобразование ослабленного сигнала выбранного участка спектра излучения неона.

На каждой итерации пропускать полученный сигнал через процедуру поиска пиков линий и сравнивать с данными Атласа. Повышать значение порога трешолдинга до тех пор, пока не будет пройден максимум совпадения с данными Атласа. Выйти из цикла с найденным оптимальным значением ϵ (рис. 2).

Дискретное прямое и обратные вейвлет-преобразования производились лифтинговой процедурой, основанной на стандартном коде «LIFTPACK» [11]. Особенностью лифтинговой схемы является не только высокая скорость работы, но и применение так называемых «вейвлетов второго поколения», хорошо представляющих неперiodические и импульсные сигналы. Оценка эффективности сглаживания шума производилась по следующей схеме: световой поток на входе спектрометра ослаблялся нейтральными светофильтрами НС-3 до тех пор, пока на выходе вейвлет-фильтра не переставали различаться линии неона. Об эффективности шумоподавления можно судить по тому, что для устранения пиков линий с очищенного от шумов сигнала требуется более

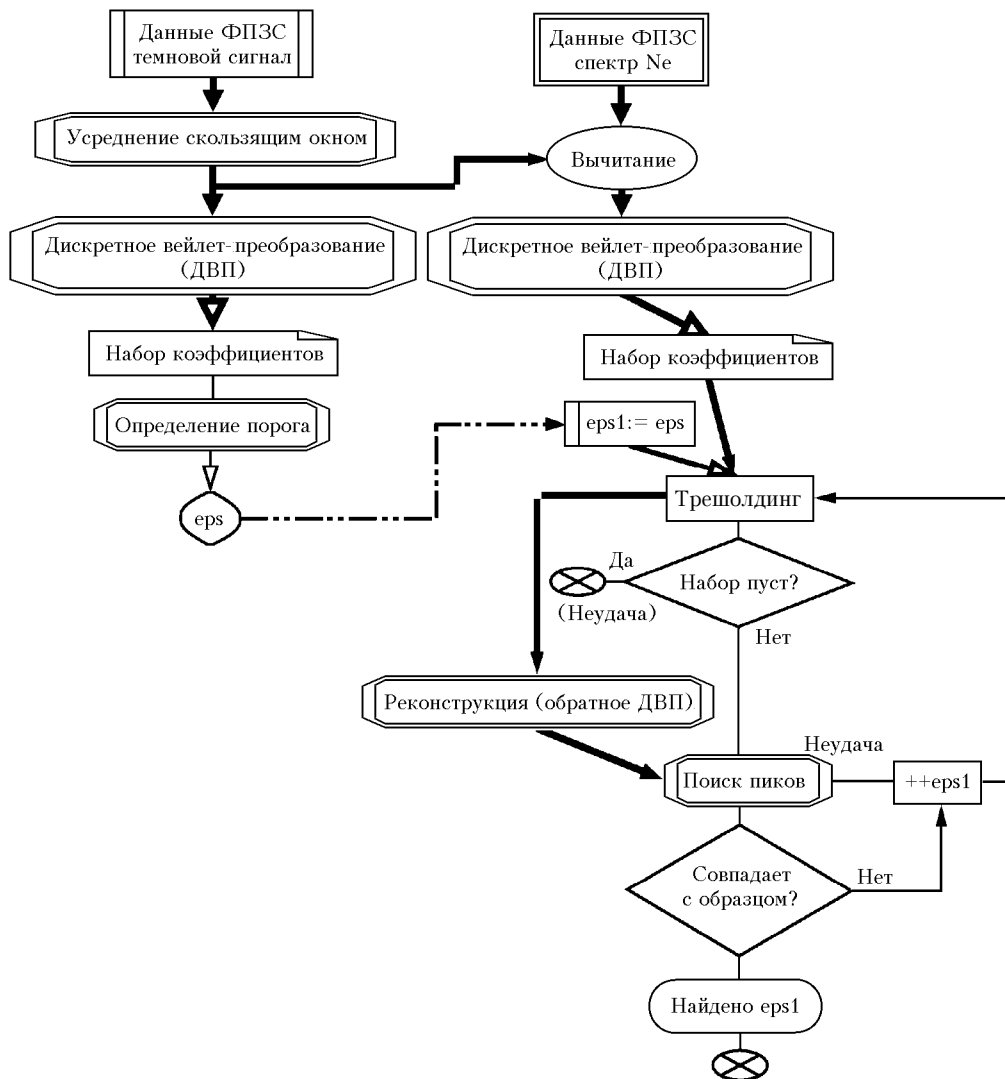


Рис. 2. Алгоритм выбора коэффициентов фильтрации

чем четырехкратное ослабление светового потока, тогда как с выключенной фильтрацией различные пики совершенно исчезают уже при введении одного нейтрального стекла. На рис. 3 приведена запись ослабленного участка спектра свечения неоновой лампы ТН-0,5 при включенной и выключенной фильтрации, время экспозиции в обоих случаях одинаково и составляет 30 мс.

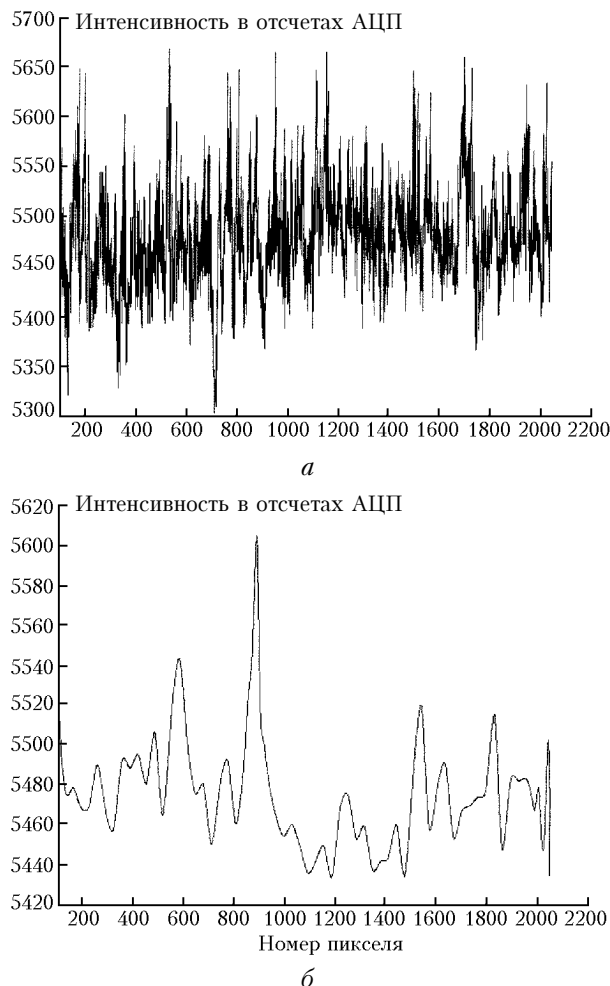


Рис. 3. Исходный (а) и отфильтрованный (б) слабые сигналы

Для сравнения на рис. 4 приведен результат фильтрации ослабленного сигнала участка спектра неона скользящим окном с последующим сглаживанием кубическим сплайном.

Процедура поиска пиков линий не определяет по этим данным правильно ни одной линии рассматриваемого участка спектра неона, тогда как обработка этой же процедурой данных, подвергавшихся вейвлет-фильтрации, дает две линии из четырех.

Видно, что использование вейвлет-фильтрации вполне оправданно в данном спектрометре.

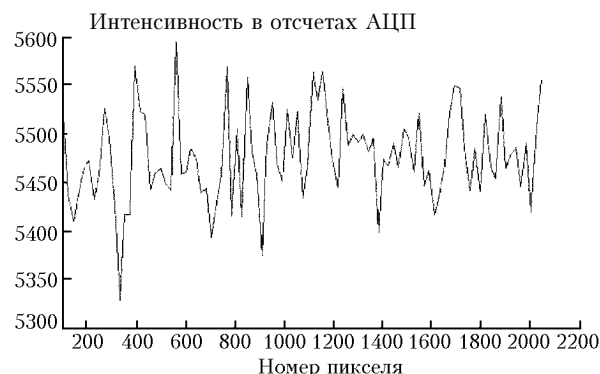


Рис. 4. Результат фильтрации предельно ослабленного сигнала скользящим окном

Процедура фильтрации была оформлена в виде модуля-фильтра данных автоматизированной системы сбора данных [13].

1. Творогов С.Д. Некоторые особенности электромагнитного поля с большим элементом количества движения // Изв. вузов. Физ. 1996. № 10. С. 93–102.
2. Лопасов В.П. О возможности приготовления молекулярного состояния для генерации поля с большим моментом количества движения // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 5. С. 471–481.
3. Турков К.В., Куликов Т.Э., Лопасов В.П. Простой бихроматический лазерный излучатель // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8. № 6. С. 914–916.
4. Стенин В.Я. Применение микросхем с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1989. 256 с.
5. Бражник Л.Г. Уменьшение случайных погрешностей методом цифровой фильтрации // Ж. прикл. спектроскопии. 1985. Т. 43. № 4. С. 605–610.
6. Косарев Е.Л., Пантос Е. Оптимальное сглаживание данных с шумом, использующих быстрое преобразование Фурье. Деп. ВИНТИ N 6916-84.
7. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физ. наук. 2001. Т. 171. № 5. С. 465–501.
8. Donoho David L. De-Noising By Soft-Tresholding. Dep. of statistics, Stanford University.
9. Ершов А.Д. Подавление шумовой компоненты лидарных сигналов на основе дискретного вейвлет-преобразования // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 10. С. 933–939.
10. Чуи К. Введение в вейвлеты. М.: Мир, 2001. 412 с.
11. Fernandez G., Periaswamy S. LIFTPACK: A Software Package for Wavelet Transforms using Lifting // Wavelet Application in Signal and Image: Proc. IV. 1996. P. 396–408 (<http://cm.bell-labs.com/who/wim/papers/spie96.pdf>).
12. Куликов В.Г., Лопасов В.П. Автоматизированная система сбора и обработки данных – ключевой блок бигармонического лазерного спектрометра // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 11. С. 1012–1017.

G.E. Kulikov, V.T. Kalaida. Algorithm of high-frequency filtering of data for laser spectrometer with a linear CCD array photodetector on the basis of wavelet transformation with automatic fitting of coefficients.

The paper describes the results obtained when testing the adaptive algorithm for fitting of the coefficients of wavelet filtering of data from a linear CCD array photodetector of a pulsed laser spectrometer. It is shown that the application of filtering allows reliable detection and separation of a signal fully masked by the noise of the receiving system.

Алгоритм высокочастотной фильтрации данных для лазерного спектрометра с ФПЗС-линейкой ...