УДК 535.33/.34

ВЫБОР МЕТОДА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПОРТАТИВНЫХ ПОЛЕВЫХ ПРИБОРОВ СПЕКТРОМЕТРИИ

Махортов В.Г., с.н.с.
Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Искра», г. Луганск
91033, г. Луганск, ул. Звейнека, 145с
E-mail: official@iskra.lugansk.ua

Проаналізовано існуючі методи експериментальних даних спектрометрії, які базуються на рішенні лінійного інтегрального рівняння Фредгольма 1-го роду. Оцінені умови, вимоги і обмеження, що накладаються на завдання отримання кінцевих результатів. Показано, що всі ці умови стають серйозною обмежуючою перешкодою при розробці портативних польових приладів спектрометрії. Запропоновано як основну методологію обробки використовувати апарат вейвлетов, одна з головних особливостей представлення сигналів на різних рівнях декомпозиції полягає в розділенні функцій наближень до сигналу на дві групи: що апроксимує – грубу, з достатньо повільною тимчасовою динамікою змін, і деталізовану – з локальною і швидкою динамікою змін на тлі головної динаміки, з подальшим їх дробленням і деталізацією на інших рівнях декомпозиції сигналів.
Ключевые слова: спектрометрия, регуляризация, вейвлеты.

The existent methods of spectrometry experimental data which are based on the decision of linear integral equation of Fredholm of first class are analysed in the article. Basic difficulty of realization of regularization method is related to the choice of regulation functional, and also laid a priori limitations on. Conditions, requirements and limitations laid on on the task of receipt of end results are appraised. It is rotined that all these terms become the serious limiting obstacle at development of the portable fields devices of spectrometry. Offered as basic methodology of treatment to use the gear of wavelets, one of main features of presentation of signals at different levels of decomposition consist in the division of functions of approaching to the signal on two groups: approximating – rough, with the slow enough temporal dynamics of changes, and present details with the local and speed dynamics with subsequent their crushing and working out in detail at other levels of decomposition of signals.
Key words: spectrometry experimental, method is related, wavelets.

Введение. В практике спектрометрии отклик прибора y(t) представляет собой свертку его аппаратной функции h(t) с входным сигналом S(t) при наложении случайного шума n(t) и представляет собой линейное интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода:

$$y(t) = h(t) * S(t) + n(t). \quad (1)$$

Предполагается, что функции h(t) и S(t) детерминированы и принадлежат функциональному пространству L_2.

Уровень шума n(t) определяет нижнюю границу чувствительности прибора, а влияние аппаратной функции – величину его разрешающей способности. Эти две важнейшие характеристики прибора разработчики всегда стремятся улучшить с минимальными потерями других его показателей. Естественным и, пожалуй, самым дешевым способом решения этой задачи является применение эффективных программно-алгоритмических средств. Для каждого прибора в зависимости от принципов, заложенных в основу его конструкции, набор таких средств различен.

Анализ литературных данных. Анализ существующих методов обработки информации показывает на многообразие как методов обработки, так и различных алгоритмов, реализующих эти методы. В общем случае методы обработки реализуются в вычислительных системах как метод наименьших квадратов, метод максимального правдоподобия, метод наименьших модулей, фильтры Винера и Калмана, фильтры Савицкого-Голэя и др. При этом используются аппроксимирующие функции в виде полиномов различной степени, ортогональных полиномов, сплайн функций. На практике, очень часто не ограничиваются одним алгоритмом, а создают многообразную библиотеку алгоритмов, позволяющих решать на ЭВМ задачу обработки и интерпретации той или иной специфической задачи при наличии специалистов определенной квалификации. Все эти условия накладывают специфические требования на задачу получения конечных результатов эксперимента и становятся серьезным ограничивающим препятствием при разработке портативных полевых приборов.

Цель работы. Обоснование выбора оптимального метода обработки данных при разработке портативных полевых приборов спектрометрии.

Материал и результаты исследований. Задача обращения уравнения (1) относится к числу некорректно поставленных [1], исследованию возможностей ее решения посвящено большое число работ [2-9]. Считается, что одним из наиболее эффективных и распространенных методов решения задачи (1) является метод регуляризации Тихонова [1]. Если F и F^{-1} соответственно операторы прямого и обратного преобразования Фурье и x(w)=F[[(t)] для функции x(t), то согласно этому методу оценка $\hat{S}(t)$ входного сигнала может быть записана в виде

$$\hat{S}(t) = F^{-1}\left[\frac{y(w)}{h(w)}\frac{|h(w)|^2}{|h(w)|^2 + R(w)}\right], \qquad (2)$$

где R(w)=αQ(w) – стабилизирующая функция, Q(w) – стабилизатор [1], α - параметр регуляризации.

Основная трудность при реализации метода регуляризации связана с выбором стабилизирующей функции αQ(w) по критерию минимума нормы в L_2 $\left\|S(t) - \hat{S}(t)\right\|$. Методика выбора αQ(w) описана в [1, 6].

Стабилизатор Q(w) обычно выбирают в классе функций w^{2n} , n=1, 2, …; в этом случае задача сводится к нахождению параметра регуляризации. На практике этот параметр выбирают при помощи невязки. Однако этот метод не применим, когда не известен уровень шума $\|n(t)\|$, что нередко имеет место при обработке сигналов в реальном масштабе времени. С другой стороны, на решения накладываются априорные ограничения, одним из которых является неотрицательность функции, что приводит к возникновению отрицательных осцилляций.

Задача восстановления сигналов с учетом априорных ограничений, как правило, становится нелинейной, так что ее решение не может быть определено аналитически. В тоже время учет априорных ограничений значительно улучшает качество решения и в некоторых случаях является единственной возможностью для восстановления сигнала. Кроме того, ограничения снижают требования к отношению сигнал/шум, необходимому для качественного восстановления [2]. Вопрос о влиянии тех или иных ограничений на решение сложен и часто нетривиален.

Если спектр сигнала отличен от нуля вплоть до частоты F_{max}, а частотная характеристика искажающей системы равна нулю вне частоты F_c, $F_c<F_{max}$, то часть спектра в диапазоне частот от F_c до F_{max} становится равной нулю. Знания ограниченной пространственной протяженности сигнала достаточно для того, чтобы однозначно (в отсутствии шумов) восстановить спектр до высшей частоты F_{max}. Неотрицательность S(t) также позволяет предсказать спектр за пределами F_c, но при этом решение не единственное [7]. Совместное использование ограничений на конечную протяженность сигнала и его неотрицательность позволяет экстраполировать частоты в присутствии шума с большей устойчивостью, чем при учете только конечной протяженности. Если в идеальном случае при отсутствии шумов вопрос о влиянии некоторых ограничений на решение можно решить аналитически, то при наличии шума с учетом регуляризации задачи количественная оценка влияния ограничений должна быть исследована численными методами.

Как показывает проведенный анализ, компромиссный выход может быть найден, благодаря исследованиям в области математики, выполненным в конце 80-х годов. Результатами исследований стал новый инструмент для обработки сигналов – вейвлет-анализ, представляющий собой тип линейного преобразования сигналов и отображаемых этими сигналами как физических данных о процессах, так и физических свойствах объектов.

Базис собственных функций, по которому проводится вейвлетное разложение сигналов, обладает многими специфическими свойствами и возможностями. Вейвлетные функции базиса позволяют сконцентрировать внимание на тех или иных локальных возможностях анализируемых процессов, которые не могут быть выявлены с помощью традиционных преобразований Фурье и Лапласа. Принципиальное значение имеет возможность вейвлетов анализировать нестандартные сигналы с изменением компонентного содержания во времени или пространстве.

Вейвлеты (wavelet – короткая волна) – это обобщенное название функций определенной формы, локализованных по оси аргументов, инвариантных к сдвигу и линейных к операции масштабирования (сжатие, растяжение), имеющих вид коротких волновых пакетов с нулевым интегральным значением. Они создаются с помощью специальных базовых функций, которые определяют их вид и свойства. По локализации во временном и частотном представлении вейвлеты занимают промежуточное положение между гармоническими функциями, локализованными по частоте и функцией Дирака, локализованной во времени [10].

Применение вейвлетных функций позволяет проводить анализ и обработку сигналов и функций, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве, когда результаты анализа должны содержать не только общую частотную характеристику сигнала, но и сведения об определенных локальных координатах, на которых проявляют себя те или иные группы частотных составляющих, или на которых происходят быстрые изменения частотных составляющих сигнала. По сравнению с разложением сигналов в ряды Фурье, вейвлеты способны с гораздо более высокой точностью представлять локальные особенности сигналов, вплоть до разрывов 1-го рода [11, 12].

В отличие от преобразований Фурье вейвлет преобразование одномерных сигналов обеспечивает двумерную развертку, при этом частота и координаты рассматриваются как независимые переменные, что дает возможность анализа сигналов в двух пространствах.

Одна из главных особенностей вейвлетного представления сигналов на различных уровнях декомпозиции заключается в разделении функций приближений к сигналу на две группы: аппроксимирующую – грубую, с достаточно медленной временной динамикой изменений, и детализированную – с локальной и быстрой динамикой изменений на фоне главной динамики, с последующим их дроблением и детализацией на других уровнях декомпозиции сигналов. Это возможно как во временной, так и в частотной областях представления сигналов вейвлетами.

Выводы. Преобразование Фурье разлагает произвольный процесс на элементарные гармонические колебания с различными частотами, а все необходимые свойства и формулы выражаются с помощью одной базисной функции $\exp(j\omega t)$ или двух действительных функций $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$. Гармонические базисные функции преобразования Фурье предельно локализованы в частотной области и не локализованы во временной. Их противоположностью являются импульсные базисные функции типа импульсов Кронекера, которые предельно локализованы во временной области и «размыты» по всему частотному диапазону. Вейвлеты по локализации в этих двух представлениях можно рассматривать как функции, занимающие промежуточное положение между гармоническими и импульсными функциями. Они должны быть локализованы как во временной так и в частотной области представления. Чем точнее осуществляется локализация временного положения функции, тем шире становится ее спектр, и наоборот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1986.
2. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. - М.: Наука, 1983.
3. Морозов В.А. Регулярные методы решения некорректных поставленных задач. - М.: Наука, 1987.
4. Гребенников А.И. Метод сплайнов и решение некорректных задач теории приближений. - М.: Московский университет, 1983.
5. Тихонов А.А., Уфимцев М.В. Статистическая обработка результатов экспериментов. - М.: Московский университет, 1988.
6. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. - М.: Радио и связь, 1986.
7. Кронкель Т.Э., Тараторин А.М. РЭ, 1988. - Т. 33. - № 6.
8. Косарев Е.Л. РЭ, 1990. – Т. 5. - № 1.
9. Болгов В.В. РЭ, 1994. - № 6.
10. Новиков Л.В. Основы вейвлет-анализа. - СП., 1999.
11. Астафьева Н.М. Успехи физических наук, 1996. – Т. 166. - № 11.
12. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Успехи физических наук, 2001. - Т. 171. - № 5.

Статья поступила 20.03.2007 г.
Рекомендовано до друку к.т.н., доц. Мосьпаном В.О.