

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ В ОПЕРАЦИОННОЙ СРЕДЕ MATLAB-SYSTAT.

И.С. Подымов, Т.М. Подымова

Аннотация

В работе представлено решение задачи по спектральному анализу процесса временного изменения концентрации взвешенных частиц. Особенностью предлагаемого решения является то, что использован метод комплексной, многофункциональной предварительной фильтрации первичных данных. Метод, разработанный компанией SeaSolve Software, до настоящего времени не применялся для этой цели. Сравнение результатов обработки наглядно показывает его преимущества. Возможно, что при исследованиях в условиях, критических для измерений (сильно «шумящий» по разным причинам фон), такой метод является одним из немногих, достойных повышенного внимания. Кратко показано, что концептуальный подход к проведению спектрального анализа процессов, связанных с динамикой взвешенных наносов, можно выбрать, опираясь на анализ Continuous Wavelet Time-Frequency Spectrum.

Введение

Получение достоверных данных о концентрациях взвеси в толще воды – важнейшая задача при построениях численных моделей транспорта взвешенных наносов в процессе исследований динамических процессов береговой зоны моря.

Ранее упоминалось (Подымов и др., 2008), что волновые процессы с различными энергетическими спектрами задействуют и различные механизмы воздействия на нерастворимые частицы, находящиеся как в толще воды, так и в виде донных отложений. Стандартная обработка первичных данных не всегда позволяет достигнуть желаемых результатов. Особенно это заметно при исследовании процессов с размытыми энергетическими спектрами.

На наш взгляд именно некорректной обработкой первичных данных объясняются неудачные попытки поиска корреляционных характеристик для некоторых натурных экспериментов.

В работе представлено частное решение задачи по спектральному анализу процесса временного изменения концентрации взвешенных частиц с использованием стандартного программного обеспечения.

Операционная среда

Операционная платформа MS Windows XP SP3, в рамках которой осуществляется решение задачи, включала следующее программное обеспечение: MATLAB R2006a; WAFO-2.1.1 (Wave Analysis for Fatigue and Oceanography) toolbox of Matlab (Brodtkorb at alias, 2000), (WAFO-group, 2000); AutoSignal v1.7 by SeaSolve Software Inc. (SeaSolve Software Inc. AutoSignal, 2003); Golden Software Grapher 7.

Еще раз хотим напомнить, что рассмотрен только частный случай фильтрации сигнала и расчета спектров, под который подобрано перечисленное программное обеспечение.

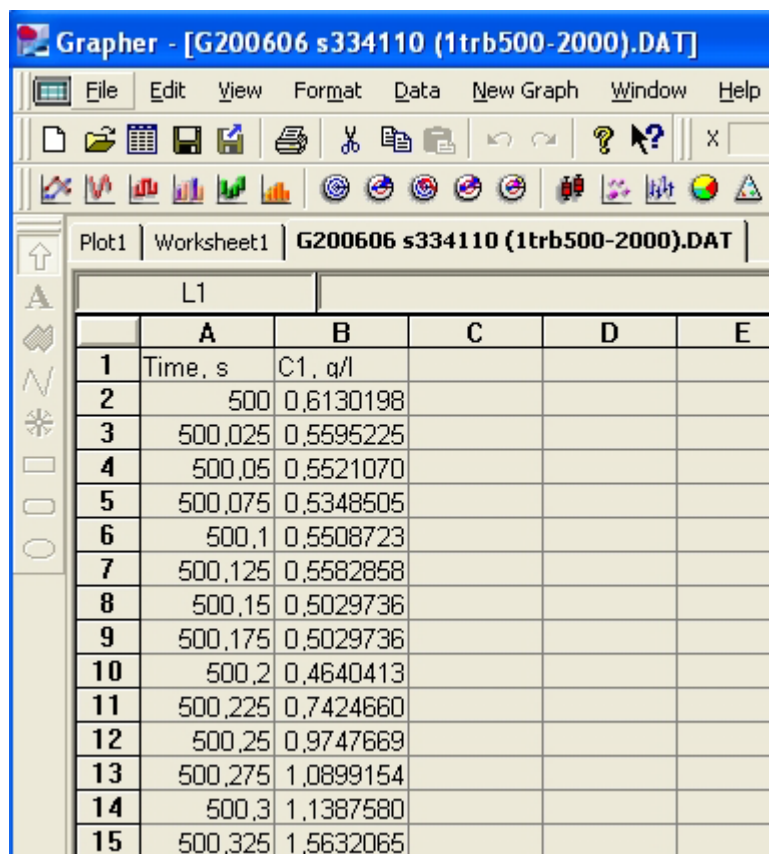
Расчет спектров с помощью Matlab

Подготовка программного обеспечения

Перед началом работы необходимо правильно установить программы и разместить дополнительные модули в нужных папках. Программы MATLAB, AutoSignal и Grapher устанавливаются в каталоги «по умолчанию». WAFO, набор инструментов Matlab для статистического анализа и моделирования случайных процессов, необходимо скопировать в папку: C:\Program Files\MATLAB\R2006a\toolbox\matlab\wafo-2.1.1 и через меню “file/set path” прописать wafo и все вложенные в него папки по месту установки Matlab.

Подготовка данных

До начала работы в Matlab необходимо подготовить к обработке данные процесса, спектральные характеристики которого нужно рассчитать. Данные должны состоять из двух рядов, в одном из которых находятся метки времени, во втором – значения анализируемого параметра. Фрагмент рядов данных, подготовленных для проведения расчетов в Matlab, показан на рис. 1. В приведенном примере для подготовки использованы редакционные функции программы Golden Software Grapher.



	A	B	C	D	E
1	Time, s	C1, g/l			
2	500	0,6130198			
3	500,025	0,5595225			
4	500,05	0,5521070			
5	500,075	0,5348505			
6	500,1	0,5508723			
7	500,125	0,5582858			
8	500,15	0,5029736			
9	500,175	0,5029736			
10	500,2	0,4640413			
11	500,225	0,7424660			
12	500,25	0,9747669			
13	500,275	1,0899154			
14	500,3	1,1387580			
15	500,325	1,5632065			

Рис. 1. Фрагмент рядов данных, подготовленных для проведения расчетов в Matlab.

Файл с подготовленными данными необходимо сохранить в папке C:\Program Files\MATLAB\R2006a\work в формате Golden Software с расширением *.dat. (Имя файла до расширения должно быть совместимым с форматом Matlab.)

Расчет спектров

После завершения подготовительных процедур необходимо запустить Matlab, набрать и выполнить программу:

```
load('XX.dat');  
method='pmem';  
ftype='f';  
S = dat2spec(XX,500,method,ftype);  
wspecplot(S);  
QS=S.S;  
Qf=S.f;  
save 'Qs.dat' Qs -ascii;  
save 'Qf.dat' Qf -ascii;
```

Здесь:

XX.dat – имя файла, для которого будет произведен расчет спектра;

XX – имя файла без расширения;

500 – секунды, в диапазоне которых рассчитывается спектр. Можно просмотреть и на значениях 200, и на значениях 1000. Или попробовать другие варианты.

dat2спес – программа расчета спектра по выбранному алгоритму. Можно задать другой алгоритм расчета из набора инструментов WAFO.

После исполнения программы, Matlab строит график спектра процесса (рис. 2), создает файлы Qs.dat и Qf.dat, в которых находятся значения спектральной плотности и частоты, соответственно (рис. 3а, рис. 3б).

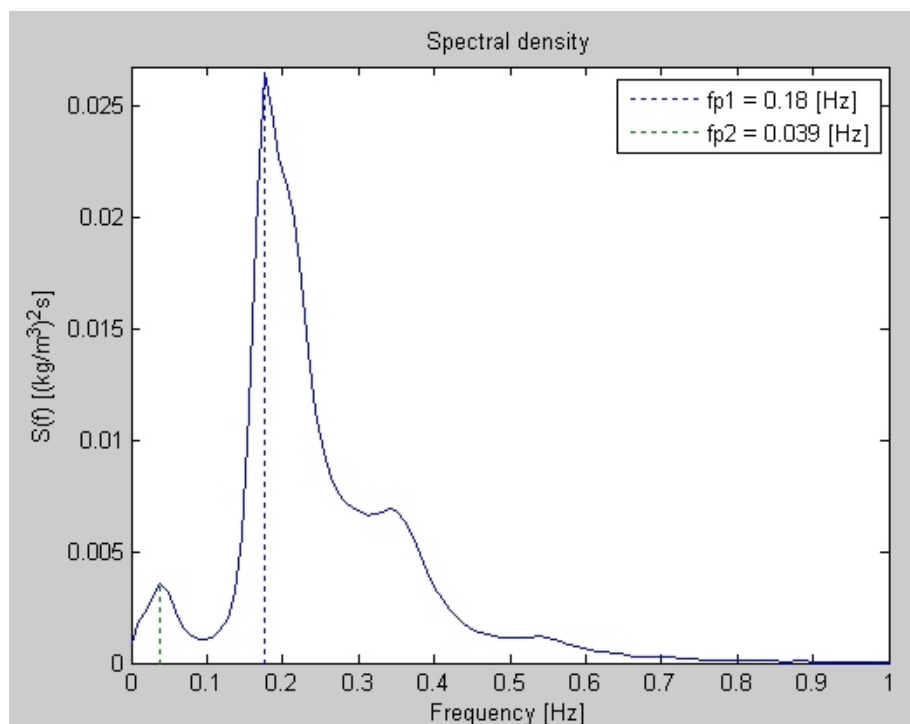


Рис. 2. График спектра процесса, рассчитанного в Matlab.

A1				0
	A	B	C	
1	0			
2	0,0097656			
3	0,0195313			
4	0,0292969			
5	0,0390625			
6	0,0488281			
7	0,0585938			
8	0,0683594			
9	0,078125			
10	0,0878906			
11	0,0976563			
12	0,1074219			
13	0,1171875			
14	0,1269531			
15	0,1367188			
16	0,1464844			
17	0,15625			

а)

A1				0,00089550846
	A	B	C	
1	0,0008955			
2	0,0019149			
3	0,0023146			
4	0,0029903			
5	0,0035263			
6	0,0031517			
7	0,0022743			
8	0,0016165			
9	0,0012534			
10	0,0010885			
11	0,0010613			
12	0,0011611			
13	0,0014276			
14	0,0019836			
15	0,0031414			
16	0,0056931			
17	0,0113870			

б)

Рис. 3. Фрагменты табличных значений спектральной плотности (а) и частоты (б), рассчитанных в Matlab и размещенных в файлах Qs.dat и Qf.dat, соответственно.

Файлы автоматически размещаются в папке C:\Program Files\MATLAB\R2006a\work. Их нужно открыть по отдельности и собрать в единый файл, чтобы строить графики в программе Grapher или ей подобной. Из рис. 2 видно, что распределение спектральной энергии лежит в диапазоне 0 – 1 Гц. Поэтому для дальнейших обработок ряды данных, собранные в едином файле, целесообразно обрезать до более низких частот. 1 – 2 Гц, например. Реально, в Matlab, они рассчитаны до 20 Гц.

Такая обработка хорошо показала себя при анализе процессов, значения параметров в которых меняются от $-n$ до $+n$ (возвышение свободной поверхности, составляющие волновых скоростей и т.п.). При расчете спектра процессов транспорта взвешенных частиц не всегда удастся добиться удовлетворительных результатов. Причиной этого является присутствие в значениях изменяющегося ряда некой постоянной составляющей или составляющей с очень низкой частотой изменения своей размерности. За такой составляющей, по нашей гипотезе, стоит присутствие во взвеси глинистых частиц и компонентов с размером менее 100 мкм, органики, пузырьков воздуха и т.п. При расчете энергетического спектра вклад от низкочастотной составляющей может маскировать модальные значения спектральной плотности на интересующих нас частотах.

Спектральный анализ процесса транспорта взвешенных частиц

Экспериментальные данные

Для примера расчетов использованы данные волнового процесса, энергетический спектр которого показан на рис. 4. Первичные данные по концентрации получены с помощью турбидиметра, установленного в 10 см от дна.

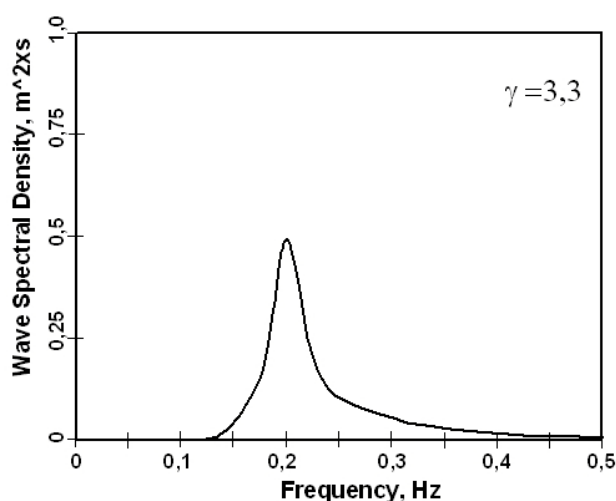


Рис. 4. Энергетический спектр волнового процесса, данные по взвешенной концентрации для которого использованы в конкретном примере.

Фильтрация первичных данных

Особенностью предлагаемого решения является то, что использован метод комплексной, многофункциональной предварительной фильтрации первичных данных. Метод, разработанный компанией SeaSolve Software, до настоящего времени не применялся для названной цели. Подробно суть многофункциональности фильтрации исследуемого сигнала изложена в (SeaSolve Software Inc. AutoSignal, 2003).

Рассмотрим на конкретном примере, как осуществить процедуру фильтрации.

Предположим, что необходимо обработать некий ряд, тип которого не пригоден для описанной выше стандартной обработки. Откроем его программой Grapher и выделим столбец с данными, для которых необходимо рассчитать спектр (рис. 5). Командой ctrl-C копируем выделенную колонку в буфер обмена.

	A	B	C
1	500	0.6130198	
2	500.025	0.5595225	
3	500.05	0.5521070	
4	500.075	0.5348505	
5	500.1	0.5508723	
6	500.125	0.5582858	
7	500.15	0.5029736	
8	500.175	0.5029736	
9	500.2	0.4640413	
10	500.225	0.7424660	
11	500.25	0.9747669	
12	500.275	1.0899154	
13	500.3	1.1387580	
14	500.325	1.5632065	
15	500.35	1.7757530	
16	500.375	2.0053713	
17	500.4	1.8916073	
18	500.425	1.7757530	

Рис. 5. Столбец с выделенными данными, для которых необходимо рассчитать спектр.

Далее запускаем программу AutoSignal и в меню File выбираем закладку Import Clipboard (рис. 6). Появится окно (рис. 7) с вопросом «Загрузить одну колонку данных?». Выбрать «Да». В следующем окне (рис. 8) необходимо ввести начальное значение процесса на оси X (даже если в исходных данных оно не было равным 0, здесь нужно поставить 0), и время в секундах между соседними значениями, соответствующее реальным данным.

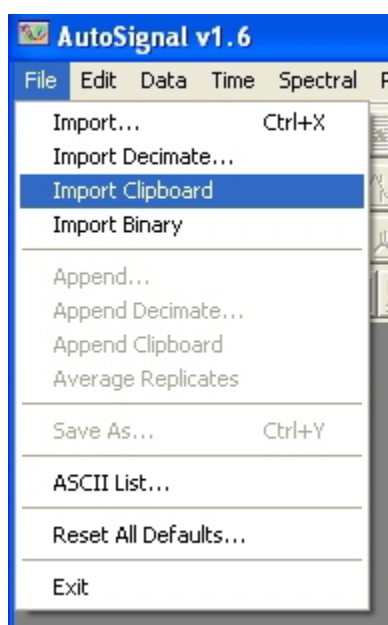


Рис. 6. Закладка «Import Clipboard».

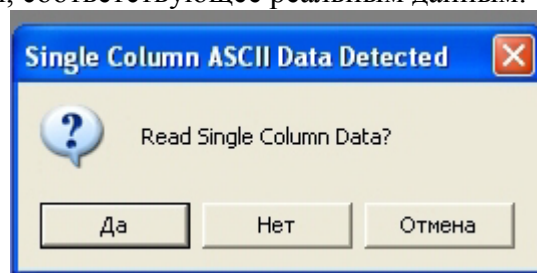


Рис. 7. Окно запроса загрузки данных.

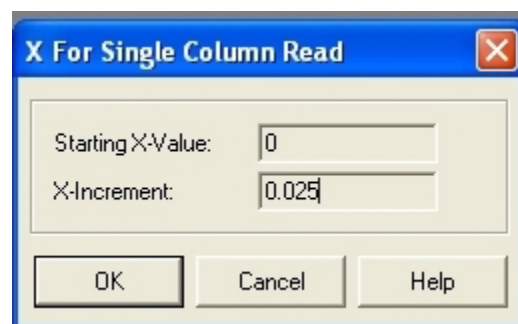


Рис. 8. Окно ввода опорных значений исследуемого числового ряда.

В нашем примере частота отсчета данных составляла 40 Гц. Поэтому время в секундах между соседними измерениями будет равным 0.025. Это значение вводим в нижнее окно (рис.8). Нажимаем ОК. Во вновь появившемся окне (рис. 9) вводим название графика, подписи осей X и Y. Нажимаем ОК. Появляется график процесса (рис. 10), для которого необходимо рассчитать спектр.

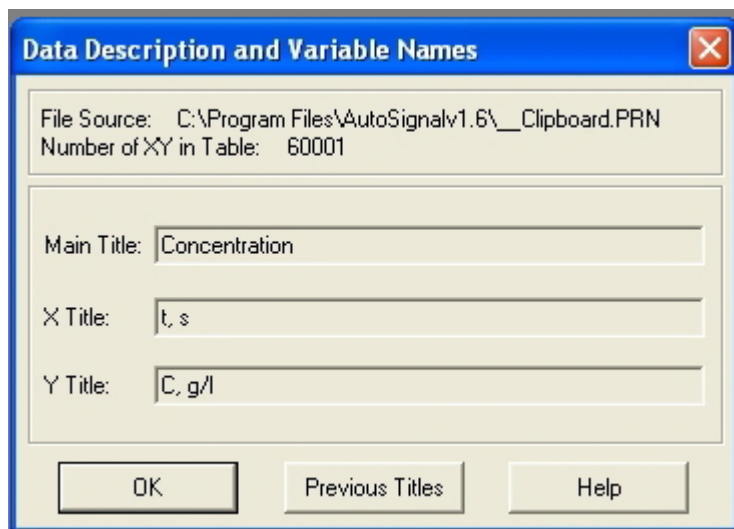


Рис. 9. Окно ввода подписей графика и осей X и Y.

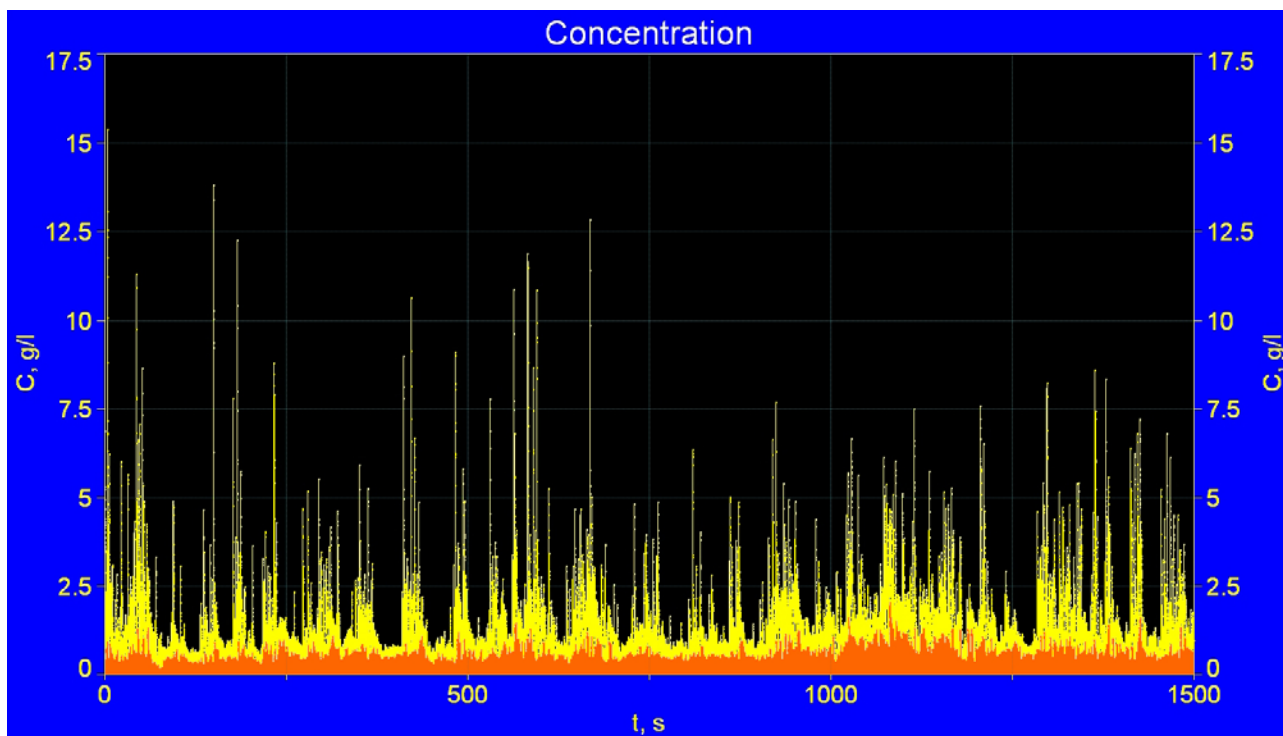


Рис. 10. График процесса изменения концентрации взвешенных частиц.

На рис. 10 оранжевым цветом выделена площадь, за которой, по нашей гипотезе, скрыта балластная концентрация компонентов, мешающих проведению спектрального анализа. Уберем ее с помощью фильтра. Для этого заходим в меню Time (рис. 11) и выбираем закладку Savitzky-Golay Smoothing Filter... .

Появляется картинка с двумя графиками (рис. 12), один из которых (нижний) – результат обработки фильтром.

Параметры Win n, Order, Passes, Process программа рассчитывает и устанавливает автоматически. Но их можно подбирать и опытным путем. Смысл параметров: Win n – ширина «движущегося» окна, в рамках которого производится интерполяция; Order – степень интерполирующего полинома (2 – 12); Passes – количество проходов интерполяции (оптимальные значения 3 – 4); Process – фильтрация с помощью производной n-ого порядка ($1 \leq n \leq 4$). Подробно о фильтре можно прочитать в (SeaSolve Software Inc. AutoSignal, 2003).

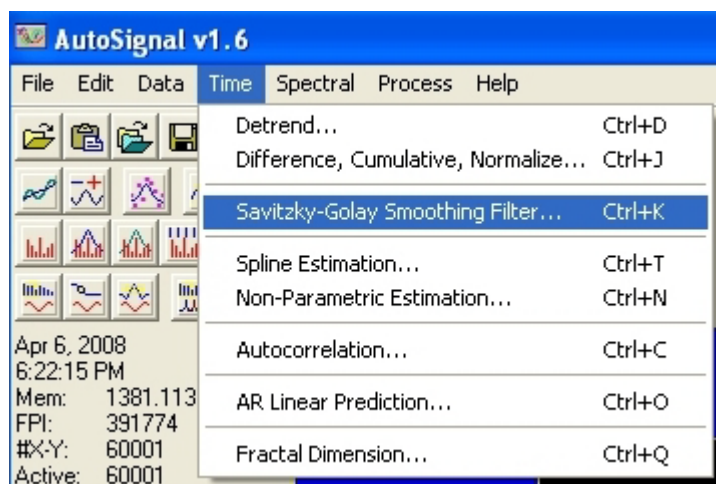


Рис. 11. Закладка Time/Savitzky-Golay Smoothing Filter.

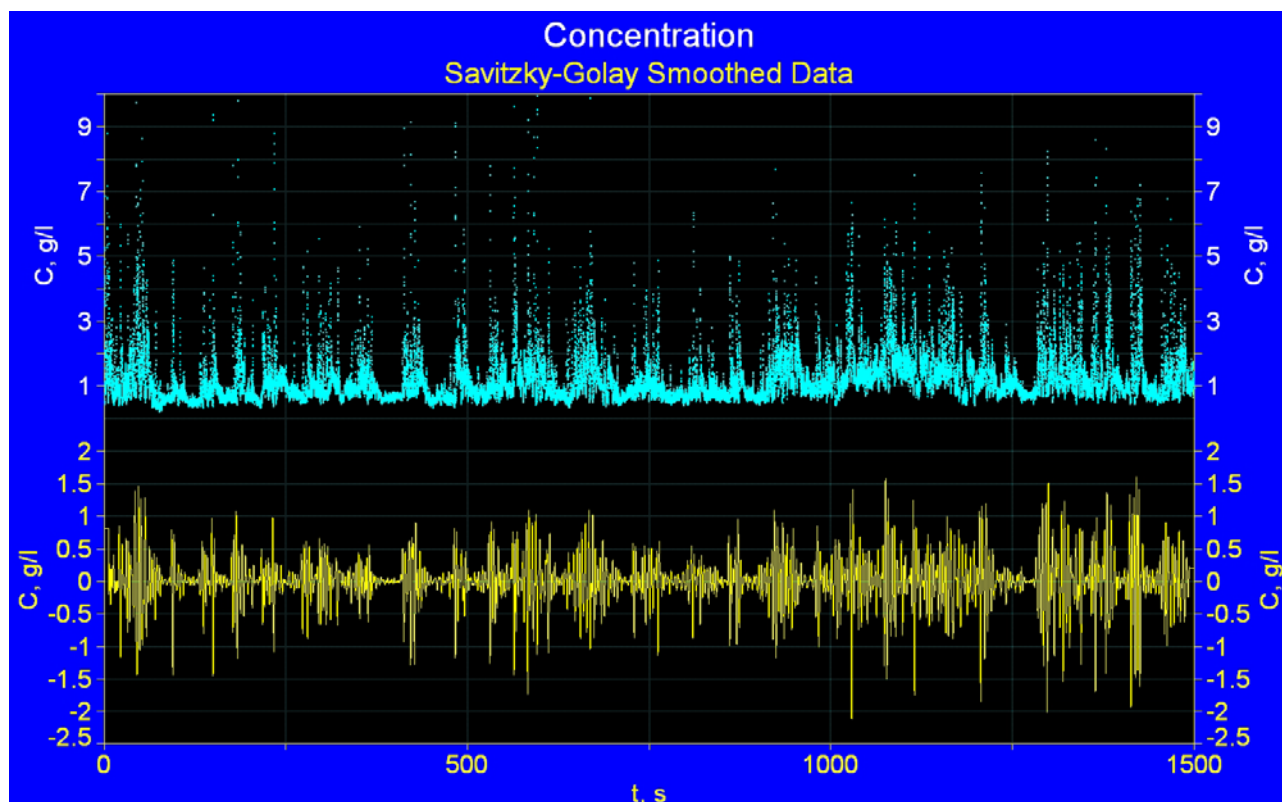


Рис. 12. Результат обработки ряда фильтром Savitzky-Golay Smoothing (нижний график).

Результаты обработки сохраняем в табличном виде, используя меню List Data (рис. 13). В открывшемся окне с данными (рис. 14) выбираем меню File/Save As.... Откроется еще

одно окно (рис. 15), в котором необходимо выбрать место сохранения файла, тип данных и имя файла.

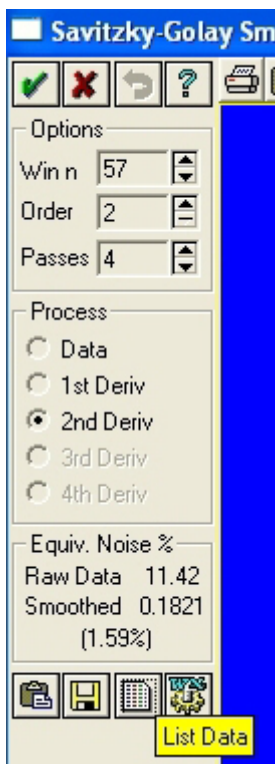


Рис. 13. Меню List Data.

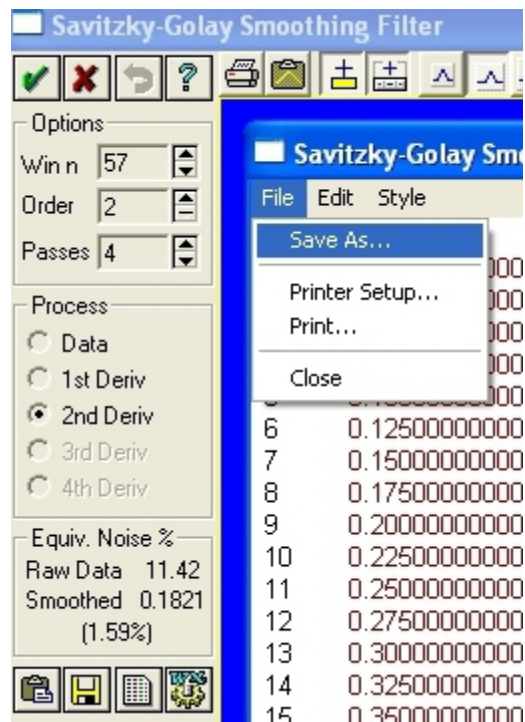


Рис. 14. Меню ссылки на сохранение результатов обработки.

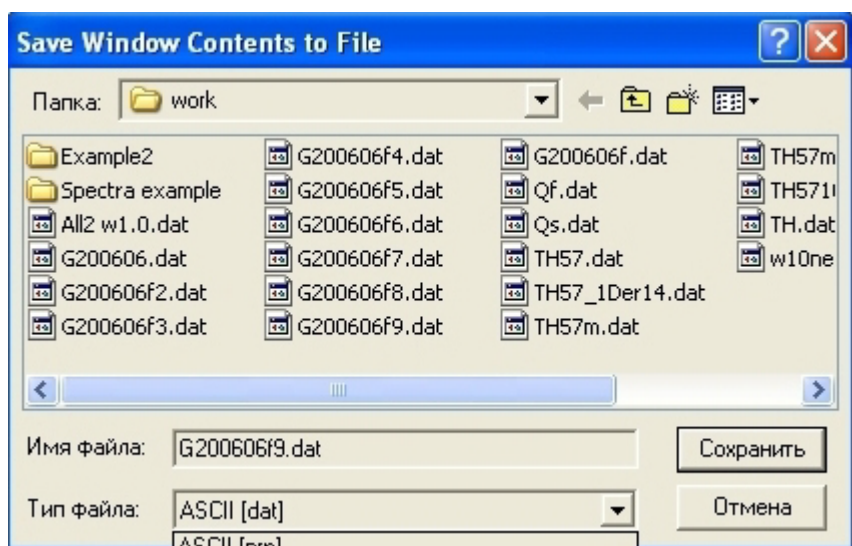


Рис. 15. Окно выбора формата сохранения данных, имени файла и места записи.

Подготовка данных и расчет спектра

Для выполнения расчетов спектральных характеристик процесса необходимо отредактировать файл с данными, созданный программой AutoSignal. Суть редакции понятна из рис. 16 и рис. 17, на которых показана структура данных в файле до и после редакции, соответственно. Файл в таком виде нужно сохранить.

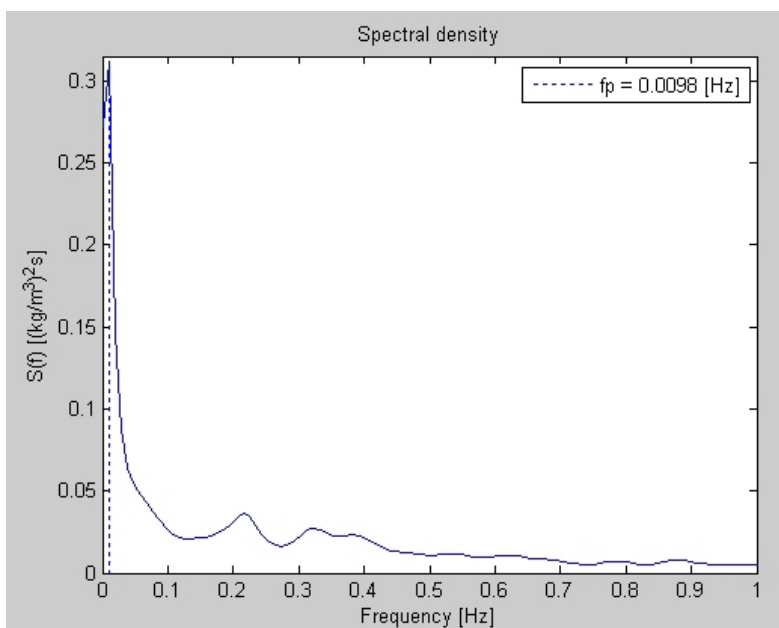
Дальнейшую обработку проводим в Matlab по методике, описанной ранее. Примеры графиков спектров процесса временного изменения концентрации взвешенных частиц до обработки данных фильтром (а) и после (б) показаны на рис. 18.

	A	B	C
1	Indx	t	s
2	1	0	0,8130809
3	2	0,025	0,8130809
4	3	0,05	0,8130809
5	4	0,075	0,8130809
6	5	0,1	0,8130809
7	6	0,125	0,8130809
8	7	0,15	0,8130809
9	8	0,175	0,8130809

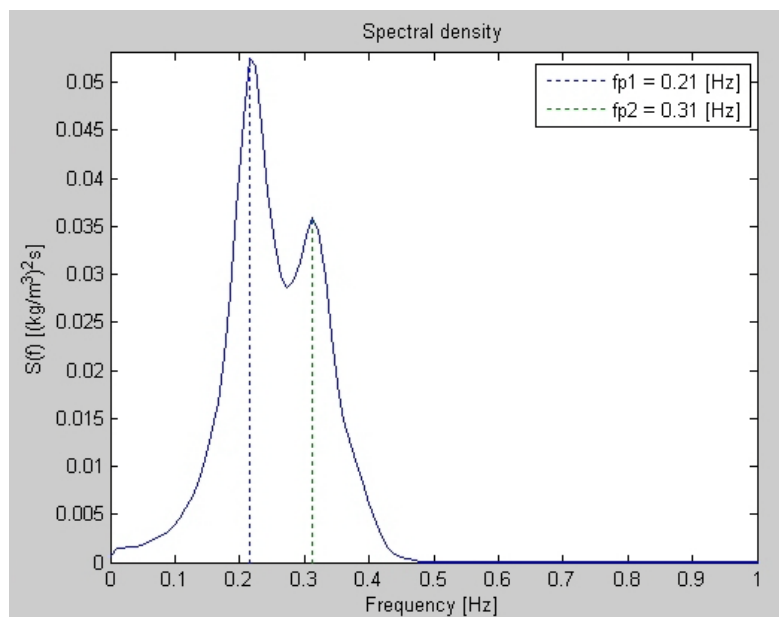
Рис. 16. Структура файла с данными до редакции.

	A	B
1	0	0,8130809
2	0,025	0,8130809
3	0,05	0,8130809
4	0,075	0,8130809
5	0,1	0,8130809
6	0,125	0,8130809
7	0,15	0,8130809
8	0,175	0,8130809
9	0,2	0,8130809

Рис. 17. Структура данных в файле после редакции.



а)



б)

Рис. 18. Примеры графиков спектров процесса временного изменения концентрации взвешенных частиц до обработки данных фильтром (а) и после (б).

Из рис. 18 видно, что в результате проведенной фильтрации изменилась частота доминирующей энергии на графике спектральной плотности. Максимум энергии соответствует частоте 0,21 Гц (рис. 18б). И это значение совпадает с максимумом энергии на графике спектральной плотности волнового процесса (рис. 4). Почему это важно? Еще на ранних стадиях экспериментальных исследований процессов взвешивания и переноса тонких частиц (натурный эксперимент Norderney-94) мы определили, что взвесь размером менее 100 мкм не играет существенной роли в процессах деформации донных профилей. Но именно эта взвесь, являющаяся по своей сути фоном, смещает частотный спектр в нижнюю область при анализе названных процессов. Такое смещение маскирует реальную взаимосвязь ключевых параметров интересующих нас процессов.

Wavelet анализ

При расчете спектров, как правило, используются длинные временные ряды первичных данных. Для анализа можно взять и полный ряд данных, и выборочный, в некотором временном диапазоне. Задача выбора наиболее важного для анализа временного диапазона не представляется простой. От правильности выбора зависит конечный результат.

Мы перепробовали много методов предварительного просмотра исследуемых рядов. Остановились на анализе Continuous Wavelet Time-Frequency Spectrum, предлагаемом SeaSolve Software Inc. Картинка Continuous Wavelet Time-Frequency Spectrum (рис. 19) дает визуальное представление о распределении спектральной энергии во временном диапазоне исследований. Так, например, из рисунка видно, что временной интервал от 1250 до 1750 сек будет малорезультативным при расчете спектров и поиске корреляционных зависимостей.

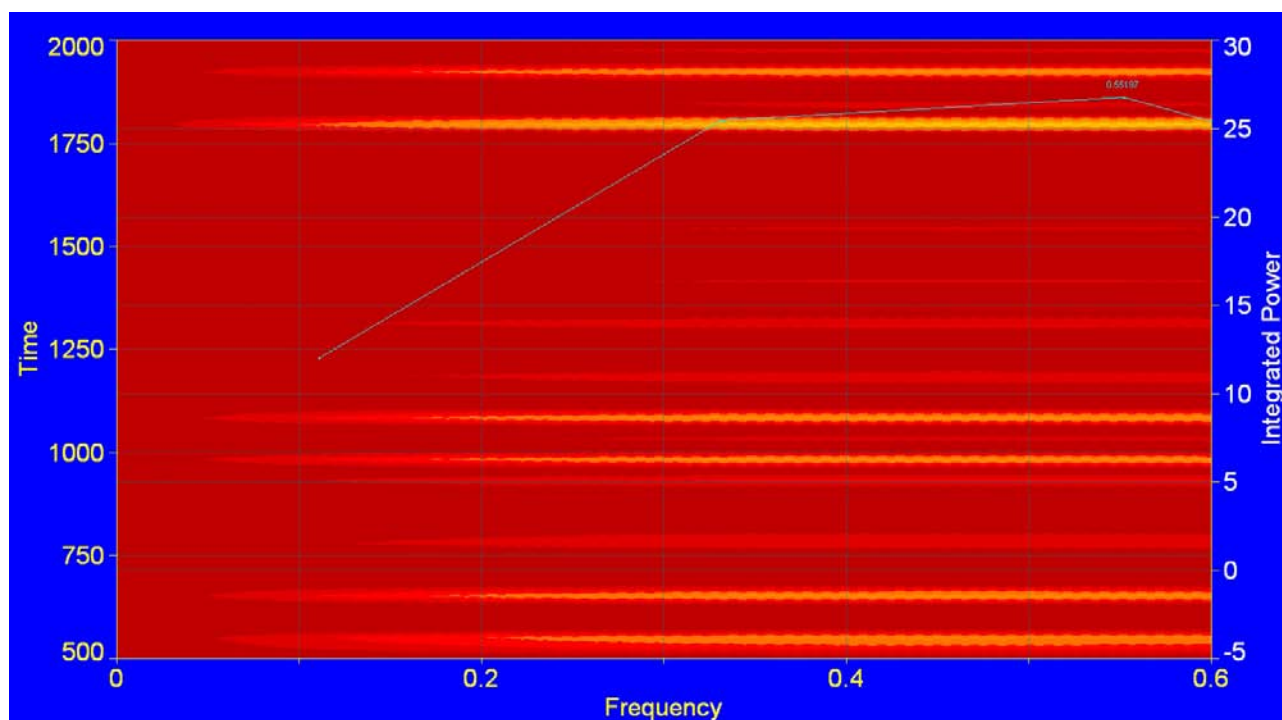


Рис. 19. Continuous Wavelet Time-Frequency Spectrum.

Конечно, Wavelet анализ не позволяет получить количественных характеристик исследуемых процессов, но дает возможность сделать правильный выбор алгоритма анализа данных

Выводы

Сравнение результатов обработки наглядно показывает преимущества предлагаемого метода.

Рассмотренное решение задачи по спектральному анализу процесса изменения концентрации взвешенных частиц во времени может способствовать получению качественно новых данных, необходимых для моделирования.

Возможно, что при исследованиях в условиях, критических для измерений (сильно «шумящий» по разным причинам фон), такой метод является одним из немногих, достойных повышенного внимания.

Концептуальный подход к проведению спектрального анализа процессов, связанных с динамикой взвешенных наносов, можно выбрать, опираясь на анализ Continuous Wavelet Time-Frequency Spectrum.

Список литературы

Подымов И.С., Подымова Т.М. Физическая модель обработки первичных данных оптических измерителей концентрации взвешенных частиц// Ученые записки Русского географического общества (Калининградское отделение). Избранные труды международной конференции «Комплексное управление, индикаторы развития, пространственное планирование и мониторинг прибрежных регионов Юго-Восточной Балтики». Калининград: Издательство Российского государственного университета им. И.Канта, 2008. Т. 7. Часть 1. С.ВU1-ВU7.

Brodtkorb, P.A., Johannesson, P., Lindgren, G., Rychlik, I., Rydn, J. and Sj, E. WAFO - a Matlab toolbox for analysis of random waves and loads// Proc. of 10th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. Seattle, USA, 2000. V. III. P.343-350.

SeaSolve Software Inc. AutoSignal. Pioneering automated signal analysis and advanced filtering. Framingham, USA, 2003. 479P.

WAFO-group. WAFO - A Matlab Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads - A Tutorial// Math. Stat., Center for Math. Sci., Lund Univ. Lund, Sweden, 2000.