

АКУСТИЧЕСКАЯ ЛОКАЦИЯ МОРСКИХ ОСАДКОВ КОГЕРЕНТНЫМИ ЛЧМ СИГНАЛАМИ

Каевицер В.И., Разманов В.М., Долотов С.А., ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Исходными данными для интерпретации результатов исследования структуры морского дна с помощью акустического профилографа являются профилограммы - зависимость мощности отраженного сигнала от задержки (глубины) вдоль трассы измерений. Использование в профилографах когерентных широкополосных сигналов, цифровая регистрация полного сигнала открывает возможность использования дополнительно к мощности (амплитуде) также спектральных характеристик отраженных сигналов для целей исследования структуры морского грунта.

Акустические профилографы в настоящее время являются одним из основных инструментов дистанционного исследования подповерхностной структуры морского грунта. На рис.1 показаны элементы низкочастотного ЛЧМ профилографа, разработанного в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, со следующими характеристиками: рабочая частота - 5 кГц, полоса частот - 4 кГц., излучаемая мощность - 3 кВт.



Рис.1. Акустический ЛЧМ профилограф. Сверху слева – монитор оператора, справа – блок усилителя мощности и синтезатор частот, снизу - варианты антенн, слева – одноэлементная антенна на штанге для катерных промеров, справа – девятиэлементная в блоке ледовой защиты под днищем судна.

В состав профилографа входит: многоэлементная антенная система, цифровой синтезатор зондирующих посылок, излучатель мощности, интерфейс ввода информации в РС.

Традиционно исходными данными для интерпретации результатов профилирования являются профилограммы - зависимость мощности отраженного сигнала от задержки (глубины) вдоль трассы измерений. К сожалению, таких данных недостаточно для однозначного определения характеристик морского грунта. Для иллюстрации на рис. 2 приведены два примера геологической интерпретации данных профилирования, полученных в ходе работ по проектированию высокоширотной трансконтинентальной оптической линии связи "Поларнет". Геологическая интерпретация в этих работах проводилась квалифицированным геологом как на основе данных профилирования, так и с учетом результатов пробоотборов грунта и априорной информации. Для данных примеров характерно наличие двух типов грунта – грязевой глины (mud) и более плотной глины (clay). Верхняя линия на приведенных рисунках отображает уровень дна. Нижняя граница слоя грязевой глины отображается второй линией, выше нижней линии расположен слой плотной глины. На верхнем рисунке данные профилирования достаточно хорошо совпадают с геологической интерпретацией, однако на нижнем рисунке сложная слоистая структура на профилограмме резко контрастирует с достаточно простой геологической интерпретацией.

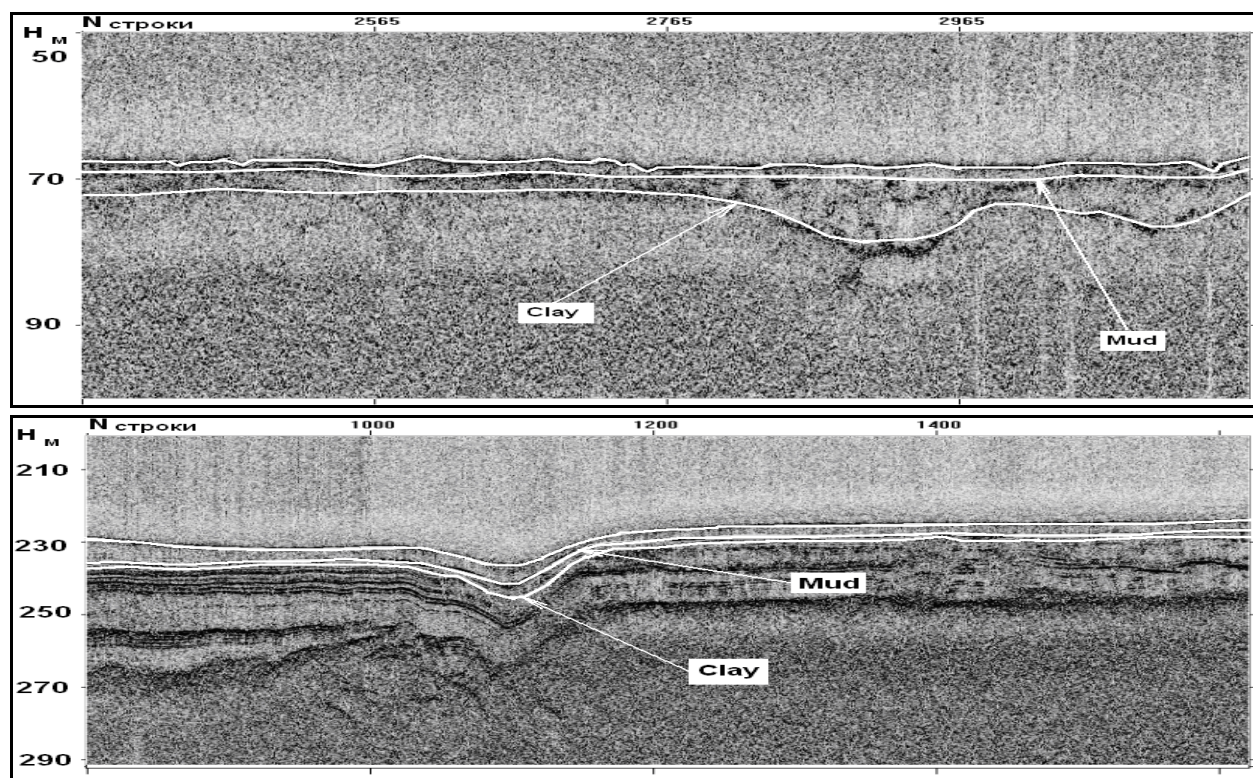


Рис.2. Результаты профилирования (профилограммы) и их геологическая интерпретация. По вертикали отложена глубина (в метрах), по горизонтали – номер строки при последовательном зондировании.

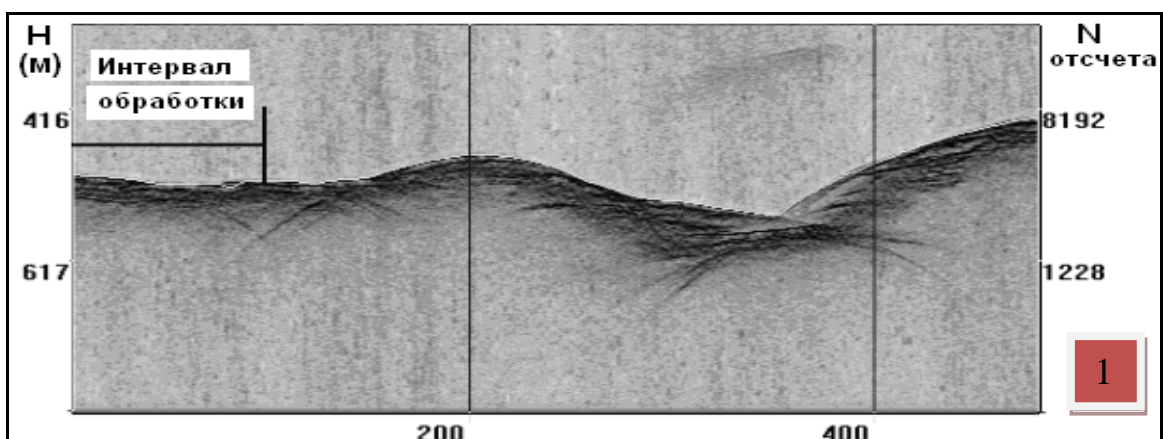
Использование в профилографах когерентных широкополосных сигналов, цифровая регистрация полного сигнала открывает возможность использования дополнительно к мощности (амплитуде) других характеристик отраженных сигналов для целей исследования структуры морского грунта. При частотной зависимости затухания в грунте одной из таких характеристик может являться спектр широкополосного отраженного сигнала. Причем анализ изменения спектра актуален не только для изучения структуры грунта, но и для увеличения разрешения при обработке данных.

1. Исследование изменения спектра ЛЧМ сигналов в морском грунте

Анализ данных заключался в исследовании изменения спектра отраженного сигнала в зависимости от глубины H проникновения в морской грунт. Спектральный анализ проводился на фиксированных по длине последовательных интервалах времени (увеличения времени задержки) с перекрытием, детально методика изложена в [2].

Для иллюстрации на рис. 3 приведены примеры изменения формы спектра отраженного сигнала по данным профилирования в северных широтах. Длина записи – 16384 отсчета. Интервал спектрального анализа 256 точек, равный длине модели. Скользящий спектральный анализ начинается со смещения в 512 точек от линии дна в сторону меньших глубин, сдвиг интервала оценивания – половина участка спектрального анализа, общее число спектров – 20, на графике показаны первые 12. В верхней части рисунка показан фрагмент профилограммы, на котором выделен участок обработки. На трех нижних рисунках показаны в виде трех групп последовательные спектры отраженного сигнала (номер спектра соответствует увеличению глубины отражения). Спектры с номерами 0-2 представляют спектры сигнала, отраженного от водной среды до дна. Спектры (4 – 5) – соответствуют отражению от поверхности дна с характерным преобладанием высокочастотной части. По мере увеличения глубины начинает преобладать низкочастотная часть (спектры 6 – 7 и выше). Спектры выше 12 уже соответствуют шумовому уровню.

Данные на рис.3 качественно показывают трансформацию скользящего спектра отраженного сигнала, отмеченную в [2]. В окрестности отражения от поверхности раздела вода-грунт начинает преобладать высокочастотная часть спектра, по мере проникновения в грунт высокочастотная часть затухает, начинает преобладать низкочастотная часть спектра.



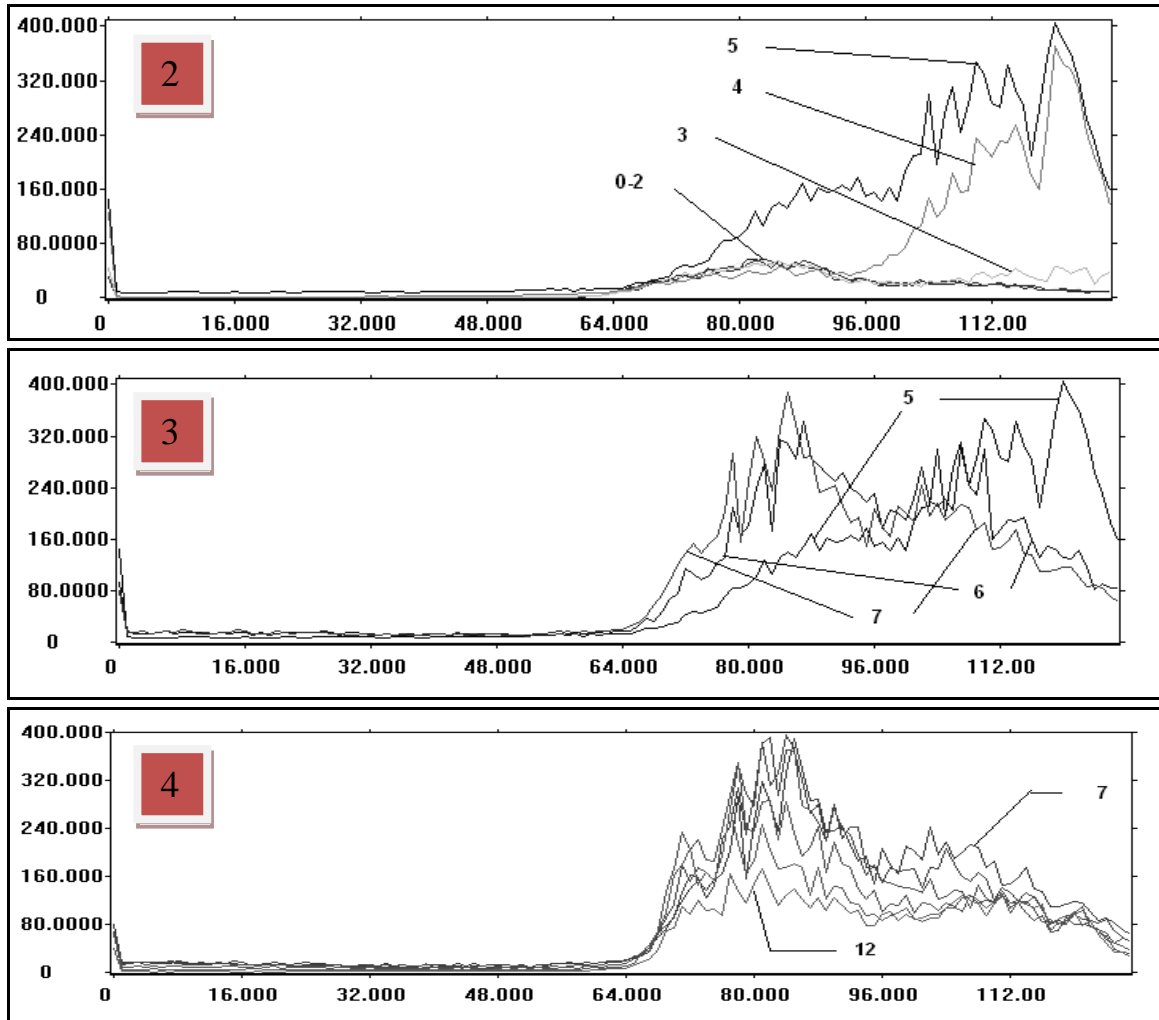


Рис. 3. Акустическое изображение (1) и последовательное изменение спектра сигнала (2,3,4). По оси абсцисс указан номер спектрального отсчета, пропорциональный частоте.

Отметим, что в предположении линейной зависимости затухания от частоты по степени асимметрии спектра отраженного сигнала можно определить коэффициент частотной зависимости затухания в пределах полосы сигнала.

Изменение формы спектра широкополосного сигнала с глубиной приводит к методу преобразования данных профилирования с целью выделения структуры морского дна по степени частотного затухания. Для того чтобы перейти от яркостных изображений к частотному затуханию, можно использовать интегральные характеристики формы, принятые в статистике.

2. Изменение числовых характеристик формы спектра отраженного сигнала.

В статистике для характеристики формы функций распределения используются несколько интегральных характеристик. Эти величины можно использовать и для описания формы спектра $G(f)$. Это следующие основные характеристики [3]:

1. Средняя частота - центр тяжести спектра $f_0 = \int f \cdot G(f)df$

2. Моменты спектра

$$M_n = \int (f - f_0)^n G(f) df$$

Второй момент,

$$\sigma^2 = M_2 = \int (f - f_0)^2 G(f) df .$$

Величина σ может рассматриваться как один из вариантов определения "ширины" спектра.

3. Коэффициент асимметрии k характеризует симметрию спектра относительно центральной частоты f_0

$$k = \frac{M_3}{\sqrt{M_2^3}}$$

4. Коэффициент эксцесса ν , характеризующий сглаженность

$$\text{спектра в окрестности центральной частоты } \nu = \frac{M_4}{M_2^2} - 3$$

Алгоритм расчета отдельных характеристик формы спектра можно рассматривать как вариант преобразования данных профилирования, ориентированный на частотное затухание – изменение амплитуды по частоте в зависимости от глубины. Обработка данных проводилась следующим образом. Выбирался интервал спектрального анализа. Для приведенных ниже примеров это 256 точек, обычно совпадающий с длиной модели. На этом интервале с помощью БПФ вычислялся спектр и для него вычислялись коэффициенты, приведенные в начале этого раздела. Эти данные относились к середине интервала спектрального оценивания. Далее интервал смещался на один отсчет. Таким образом проводилось преобразование данных для всей строки. Для расчета спектров использовались как свернутые данные, так и несвернутые. Предусмотрено также усреднение вычисляемых спектров по соседним элементам и строкам.

Ниже на рис.4 приведены данные об изменении некоторых числовых характеристик формы спектра для одного фрагмента файла данных. Полностью этот файл содержит 3163 строки и характеризуется достаточно простой структурой: тонким слоем вдоль линии дна грязевой глины и слоем более плотной глины (рис. 3). Приведенный фрагмент относится к началу файла регистрации. На всех растровых рисунках по горизонтали отложен номер строки (соответствующий номеру посылки при последовательном зондировании).

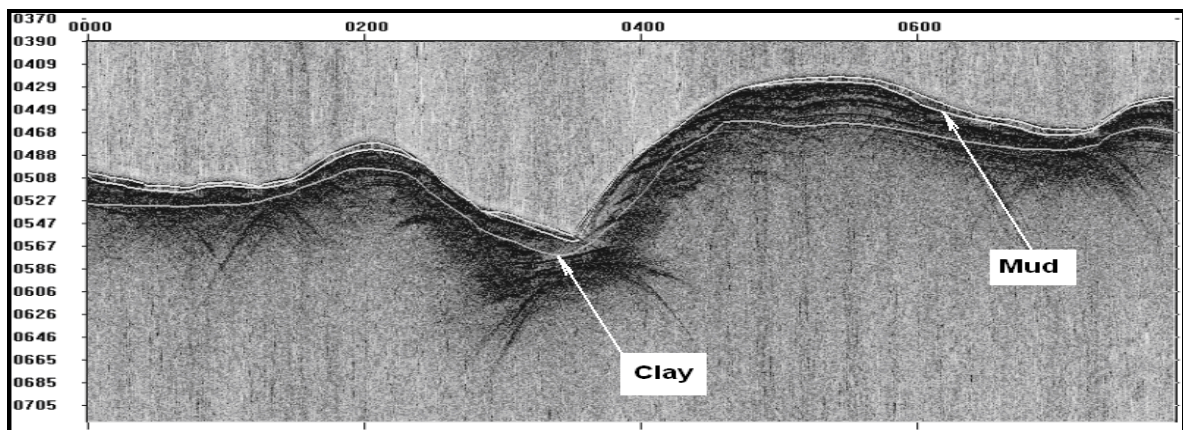


Рис.4. Фрагмент акустического изображения (амплитуда отраженного сигнала в зависимости от номера строки) с геологической интерпретацией.

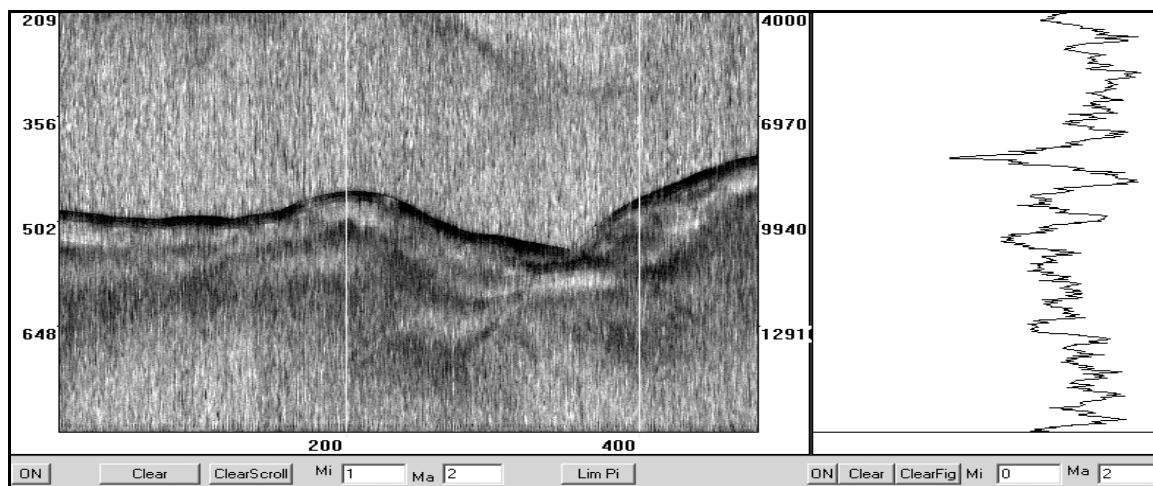


Рис. 4.1. Растровая развертка (слева) коэффициента асимметрии свернутого сигнала. Шкала слева – глубина в метрах, справа – номер отсчета. График в правой части относится к последней строке растровой развертки.

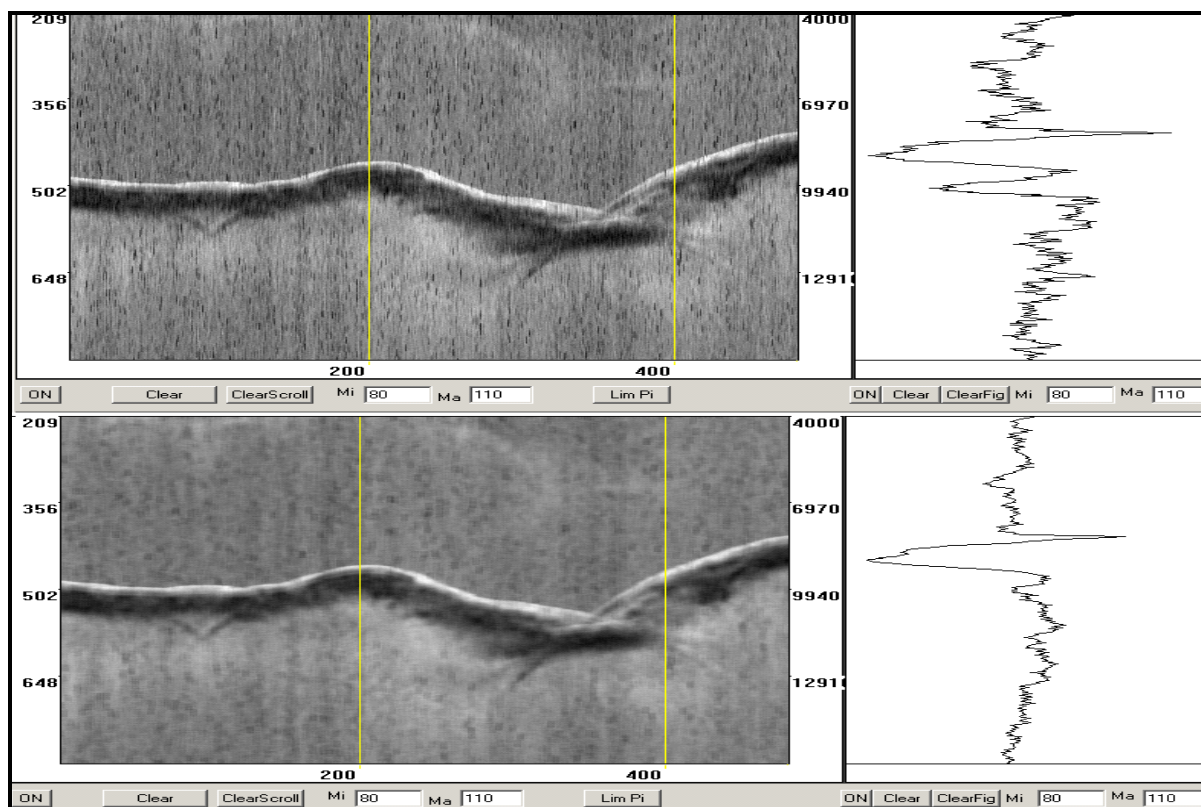


Рис. 4.2. Варианты развертки центра тяжести спектра. Сверху для несвернутых данных, нижний график – несвернутые данные с усреднением по 5 смежным строкам. Справа указаны профили изменения для последней строки.

Показанные на рисунках 4.1, 4.2 изменения коэффициента асимметрии и средней частоты (центра спектра) дополняют характер изменения спектра, представленный в предыдущем разделе. В узком придонном слое грязеподобной глины спектр имеет преимущественно высокочастотную часть, по мере увеличения глубины в плотной глине начинает превалировать низкочастотная область.

Развертка ширины спектра σ , показанная на рисунке 4.3, характеризует эффективную глубину профилирования по спектральным данным. График коэффициента эксцесса содержит какие-то детали, однако интерпретировать их трудно.

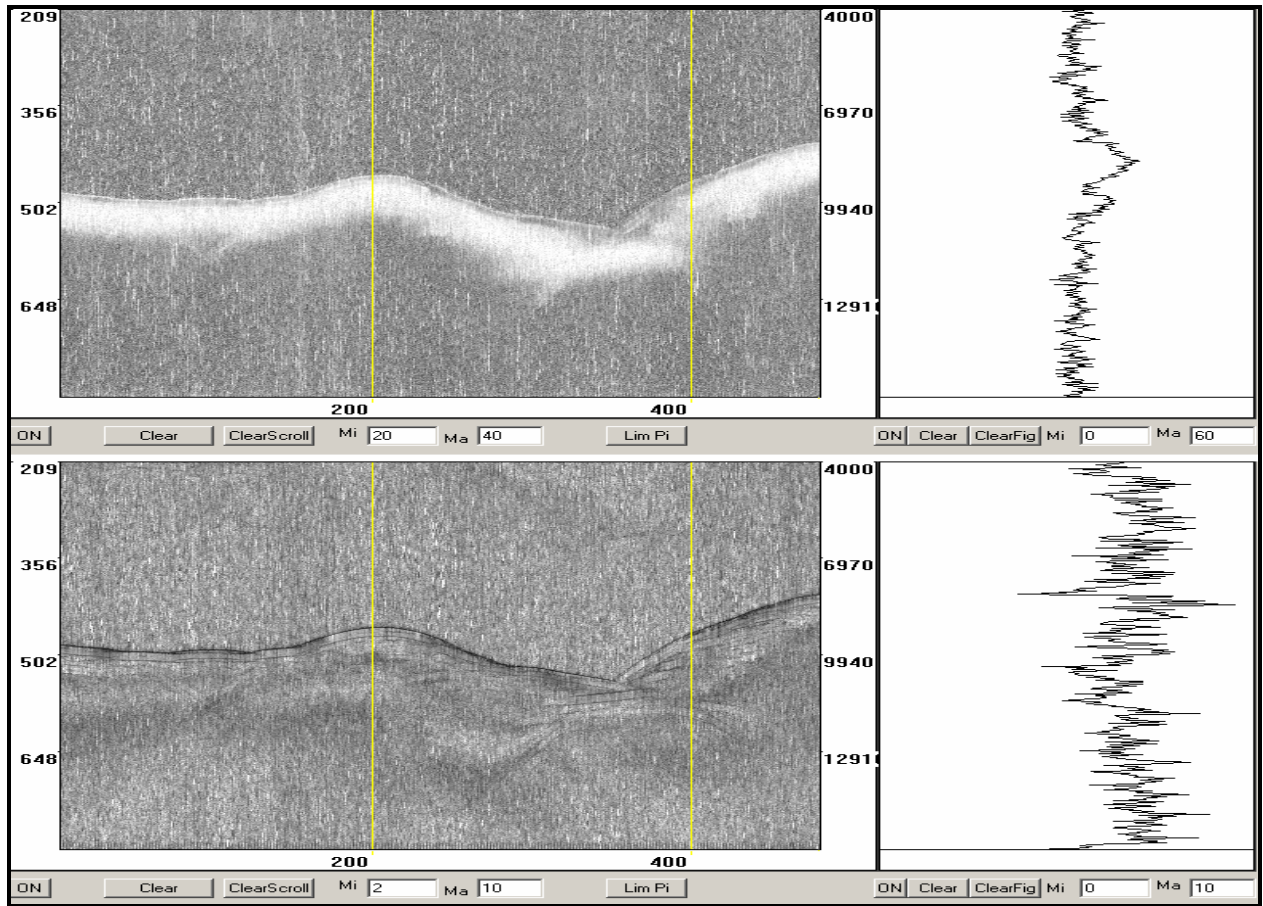


Рис. 4.3. Развертка ширины спектра σ (сверху) и коэффициента эксцесса (снизу).

Из представленных примеров видно, что центральная частота f_0 лучше выделяет трансформацию спектра, чем коэффициент асимметрии. Одна из причин этого, возможно, заключается в том, что при расчетах центральных моментов использовалась вычисляемая центральная частота. Вероятно, в данном случае, более правильно было бы использование центра спектра модели (спектра зондирующего сигнала).

Дальнейшим развитием подобной спектральной методики представления данных профилирования для определения структуры морского дна может являться расчет непосредственно частотного затухания в полосе сигнала.

3. Анализ изменения мгновенной частоты отраженного сигнала.

Приведенным в разделе 2 данным о изменении отдельных характеристик формы спектра отраженного сигнала можно дать несколько иную интерпретацию. Рассмотрим представление комплексного отраженного сигнала $S(t)$ в форме зависящих от времени амплитуды $A(t)$, фазы $\Psi(t)$ и, соответственно, частоты $\Omega(t)$

$$S(t) = A(t)e^{i\Psi(t)} \quad \Omega(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} .$$

С сигналом $S(t)$ связан его фазовый спектр $S(\omega)$ и энергетический спектр $G(\omega)$

$$S(t) = \int S(\omega) \exp(i\omega \cdot t) d\omega, \quad G(\omega) = |S(\omega)|^2$$

Характеристики формы спектра $G(\omega)$ отраженного сигнала и их изменение с глубиной рассмотрены в предыдущем разделе 2. Оказывается, моменты спектра $G(\omega)$ связаны с мгновенной частотой $\Omega(t)$ и мгновенной амплитудой $A(t)$. В частности в [4] показано, что центральная частота ω_0 энергетического спектра $G(\omega)$ связана с мгновенной частотой и амплитудой соотношением

$$\omega_0 = \frac{\int A^2(t)\Omega(t)dt}{\int A^2(t)dt}, \quad \omega_0 = 2\pi \cdot f_0$$

Таким образом, центральная частота спектра есть просто усредненная за период наблюдения средняя мгновенная частота $\omega_0 = \bar{\Omega}$. Это становится совсем точно, если считать амплитуду постоянной $A(t) \equiv 1$, тогда

$$\omega_0 = \frac{\int \Omega(t)dt}{T}, \quad \text{здесь } T \text{ – время наблюдения.}$$

Таким образом, отмеченная в разделе 2 трансформация скользящего спектра должна соответствовать изменению мгновенной частоты отраженного сигнала с глубиной (задержкой), и изменение мгновенной частоты может оказаться информативной характеристикой для выделения структуры морского дна.

Для иллюстрации связи мгновенной частоты и спектра отраженного сигнала ниже приведены результаты обработки данных, показанных на рис.4 и характеризующиеся относительно простой структурой морского дна

На рисунке 5.1 показана растровая развертка мгновенной частоты (приращения фазы) и профили изменения для отдельных строк. Видно, что для данного фрагмента частота имеет пик в окрестности дна, далее следует уменьшение в слое плотной глины и снова увеличение до примерно постоянного уровня.

Видно, что характер изменения мгновенной частоты отраженного сигнала и центральной частоты скользящего спектра практически одинаковы.

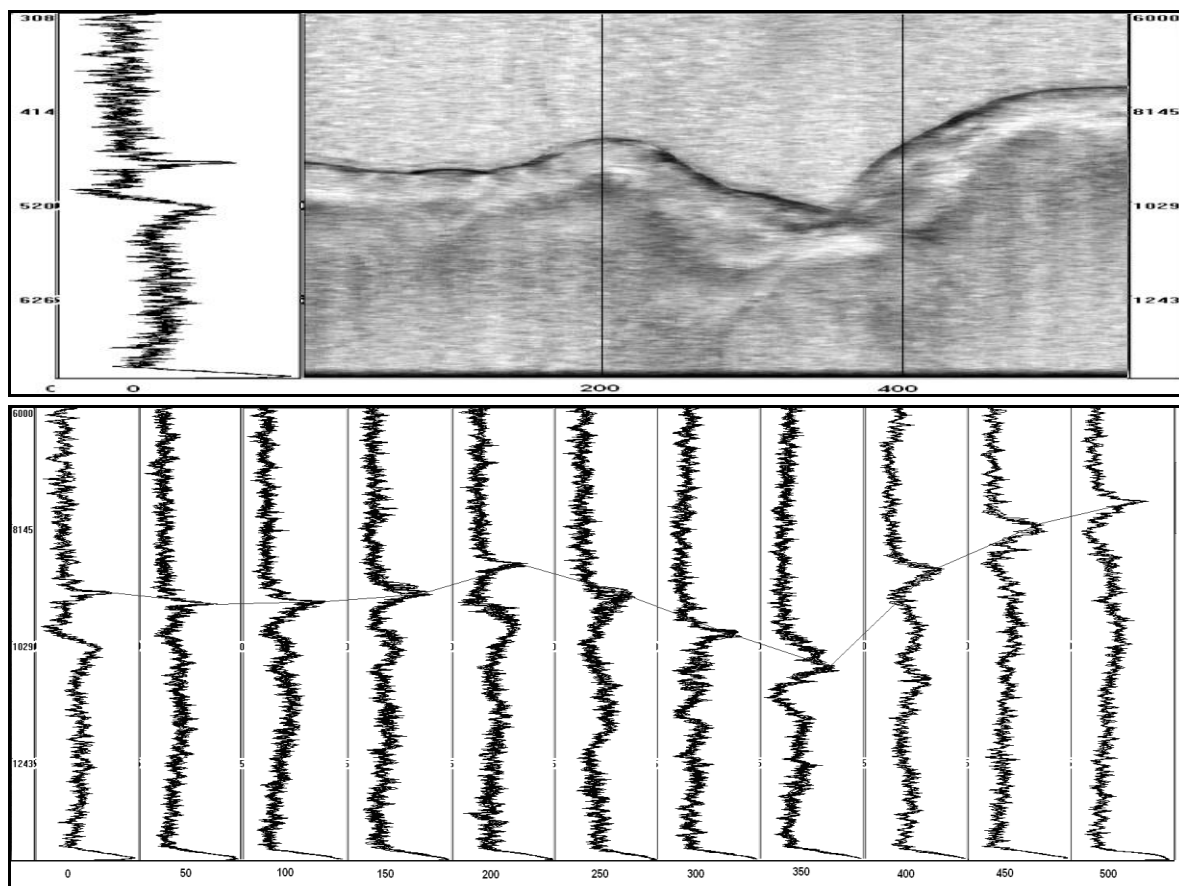


Рис. 5.1. Развертка приращения фазы (частоты) отраженного сигнала и профиль изменения для первой строки (сверху). Снизу профили частоты для отдельных строк, начиная со строки 0 с шагом в 50 строк. Усреднение при обработке частоты по 9 строкам, и 21 отсчету. Ломаная линия на нижней части соответствует линии дна.

Из представленных на рис.4,5 данных следует, что в данном случае спектральные характеристики хорошо отображают наличие тонкого приповерхностного слоя (грязевой глины) и нижележащего более толстого слоя (плотной глины).

На рис. 6 приведены примеры преобразования данных профилирования, полученных в работах в Балтийском море. Слева на этих рисунках представлена развертка (по горизонтали) яркости отраженного сигнала. Справа – развертка мгновенной частоты.

Приведенные данные об изменении характеристик скользящего спектра и мгновенной частоты позволяют сделать вывод, что подобная трансформация входных данных, ориентированная на изменение затухания с частотой, может оказаться полезной дополнительной информацией при изучении структуры морского грунта.

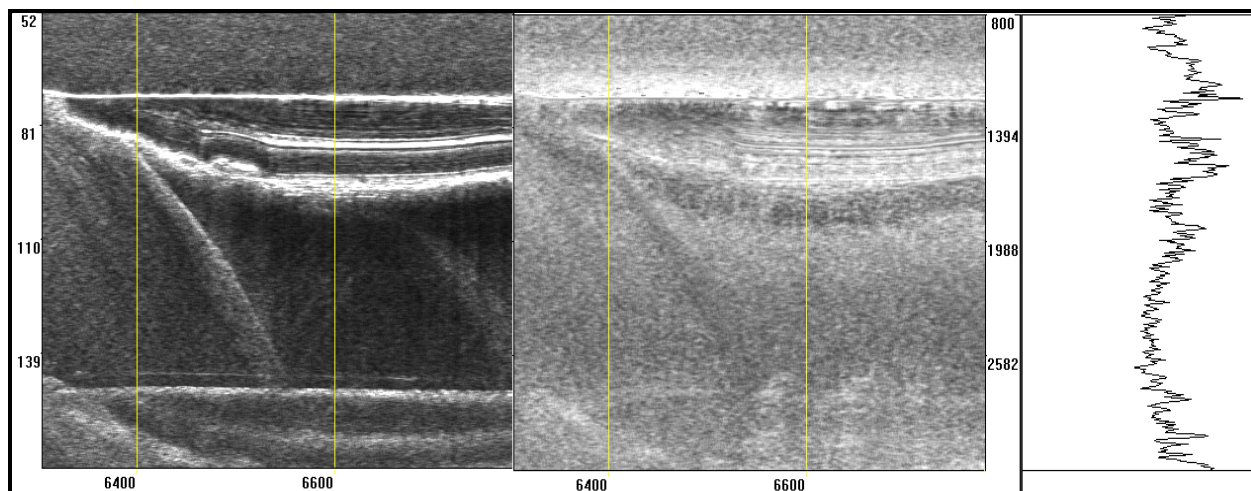


Рис. 6.1 Трансформация данных профилирования. Слева - развертка яркости отраженного сигнала, справа – развертка мгновенной частоты свернутого сигнала. Профиль мгновенной частоты относится к последней строке фрагмента.

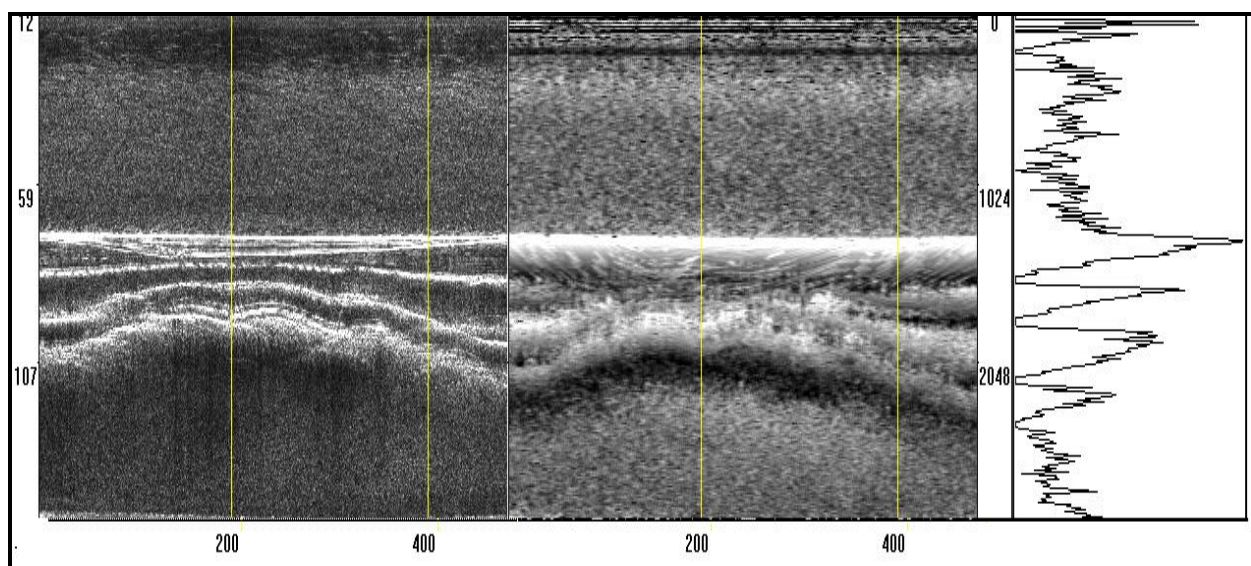


Рис. 6.2 Трансформация данных профилирования. Слева - развертка яркости отраженного сигнала, справа – развертка мгновенной частоты несвернутого сигнала. Профиль мгновенной частоты относится к последней строке фрагмента.

Литература

1. В.И. Каевицер, В.М. Разманов, А.П. Кривцов, И.В. Смольянинов, С.А. Долотов, Дистанционное зондирование морского дна акустическими сигналами с линейной частотной модуляцией, Радиотехника, № 8 август 2008.
2. С.А. Долотов, В.И. Каевицер, В.М. Разманов, И.В. Смольянинов, А.В. Саворский, Применение низкочастотного эхолота-профилографа с многоэлементной излучающей антенной и широкополосным ЛЧМ зондирующим сигналом для исследования морского дна, Известия ТРТУ № 5, Таганрог 2004.
3. Б.Р. Левин, Теоретические основы статистической радиотехники, Сов. радио, Москва, 1969.
4. Л.М. Финк, Соотношение между спектром и мгновенной частотой сигнала, Проблемы передачи информации, том 11, вып. 4, 1966.