

А.И.Гончар, С.Г.Федосеенков, А.И.Шундель

*Научно-технический центр
панорамных акустических систем НАН Украины, г.Запорожье*

МЕТОДЫ ПОДАВЛЕНИЯ КРАТНЫХ ВОЛН ПРИ ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ ПРОФИЛОГРАММ

Предложены методы подавления кратных волн при обработке информации профилограмм. Рассматриваются возможности предложенных методов при обработке математической модели профилограммы. Приводятся примеры обработки реальных профилограмм.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *параметрический профилограф, профилограмма, кратные волны, преобразование радона, ЛЧМ сигнал.*

Сокращение запасов полезных ископаемых, в особенности нефти и газа, на суше ведет к расширению их разведки и добычи в акваториях морей и океанов. Для этого сооружаются крупные, но в то же время аварийно опасные объекты: буровые платформы, подводные газопроводы, гидротехнические сооружения. Эти проекты требуют серьезного инженерно-геологического обоснования, и не последнюю роль в этом играет метод гидроакустического профилирования, который позволяет изучить геологический разрез на требуемую для этих целей глубину с достаточно высокой детальностью. Для решения подобных задач наиболее перспективными в настоящее время считаются параметрические профилографы, сигналы которых за счет высокой мощности излучения, низкой частоты зондирующего сигнала и узкой характеристики направленности излучателя позволяют проникнуть достаточно глубоко в толщу донного грунта.

В виду этого разработаны алгоритмы обработки информации, полученной при исследовании дна акваторий с помощью профилографа для водонасыщенных грунтов.

Изначально одной из первых проблем обработки профилограмм было устранение кратных волн. Кратными называются волны, которые на своем пути распространения испытали более одного отражения [1]. В настоящее время кратные волны рассматриваются как когерентные помехи, поскольку они взаимодействуют с первичными волнами, или могут быть по ошибке интерпретированы как первичные. Они так же отрицательно влияют на процессы отображения, которые предполагают отсутствие кратных волн в данных профилограммы. Классификация и природа возникновения помогают распознать кратные волны в процессе обработки профилограммы. В литературе [1] вводятся такие их характеристики, как периодичность, геометрия (особенности), положение на разрезе. На геометрию влияют углы наклона слоя и характеристики слоев (мощность, импеданс).

Для определения первичных волн в профилограмме используется алгоритм на основе преобразования Радона. Классическое преобразование Радона как фильтрация для двухмерного случая отображает функцию, опреде-

ленную на плоскости R^2 во множестве её линейных интегралов и записывается в следующем виде [2]:

$$F(x, y, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x + t \cos \theta, y + t \sin \theta) dt$$

где f – функции по прямой, проходящей через пиксель x, y в направлении θ .

Выделив с помощью преобразования Радона все данные на профилограмме, можно применить формулу алгоритма *VDMUL* [1]:

$$p = d + d * d + d * d * d + \dots, \quad (1)$$

где p – первичные отражения; d – данные профилограммы; $[*]$ – операция свертки.

Получается бесконечный ряд Тейлора, который выражает p как функцию от d . Следовательно, можно выделить первичное поле из необработанных данных, повторяя свертки.

Также для выявления первичных волн можно использовать спектр отраженного сигнала [3]. Анализ данных заключается в исследовании изменения спектра отраженного сигнала в зависимости от глубины H проникновения зондирующего сигнала в морской грунт. Спектральный анализ проводится на фиксированных по длине последовательных интервалах времени с перекрытием. При этом данные качественно показывают трансформацию скользящего спектра отраженного сигнала. В окрестности отражения от поверхности раздела вода-грунт начинает преобладать высокочастотная часть спектра, по мере проникновения в грунт высокочастотная часть спектра затухает, начинает преобладать низкочастотная часть спектра.

В линейной зависимости затухания от частоты по степени асимметрии спектра отраженного сигнала можно определить коэффициент частотной зависимости затухания в пределах полосы сигнала. Изменение формы спектра сигнала с глубиной приводит к частотному затуханию, поэтому можно использовать интегральные характеристики формы, принятые в статистике [4].

В статистике для характеристики формы функции распределения используется несколько интегральных характеристик. Эти величины можно использовать и для описания формы спектра $G(f)$. Такими характеристиками являются: средняя частота и моменты спектра.

Средняя частота f_0 – центр тяжести спектра – дает возможность по выборке определить мощность пиков, то есть дать информацию о возможном наличии границ слоев по профилю на выбранном участке профилограммы [4]:

$$f_0 = \int f \cdot G(f) df.$$

Моменты спектра [4]:

$$M_n = \int (f - f_0)^n G(f) df, \quad \delta^2 = M_2 = \int (f - f_0)^2 G(f) df,$$

где M_n – n -ий момент спектра; δ^2 – второй момент, он же дисперсия спектра

Величину δ можно рассматривать как один из вариантов определения «ширины» спектра.

Коэффициент асимметрии k характеризует симметрию спектра относительно центральной частоты [4]:

$$k = M_3 / \sqrt{M_2^3}. \quad (1)$$

Коэффициент эксцесса ν характеризует сглаженность спектра в окрестности центральной частоты [4]:

$$\nu = \frac{M_4}{M_2^2} - 3. \quad (2)$$

Вычислив и выделив локальные максимумы распределения коэффициента эксцесса (2), можно получить фактические границы слоев. Алгоритм расчета отдельных характеристик формы можно рассматривать как вариант преобразования данных профилирования, ориентированный на частотное затухание – изменение амплитуды по частоте в зависимости от глубины. Обработка данных производится следующим образом. Выбирается интервал спектрального анализа. На интервале с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) вычисляется спектр и для него вычисляются коэффициенты статистического анализа. Далее интервал смещается на один отсчет. Таким образом, проводится преобразование данных по всей строке. Далее строится двумерное изображение (интерпретация) полученных результатов и проводится соответствующий анализ.

Т а б л и ц а 1. Характеристики слоев модели структуры донных отложений на рис.1, а.

№ слоя	ρ , кг/м ³	c , м/с	тип слоя
1	1000	1500	вода
2	1325	1480	жидкий ил
3	1850	1617	песчаный ил
4	1975	1645	тонкий песок
5	2050	1817	грубый песок

Рассмотрим реализацию данного метода с применением математической модели параметрического профилографа, разработанной в [5]. В табл.1 приведены параметры модели слоистой структуры дна (рис.1, а)).

В качестве зондирующего сигнала использовался ЛЧМ сигнал с параметрами: нижняя частота $f_H = 5$ кГц, девиация частоты $\Delta f = 6$ кГц, длительность импульса $\tau = 4$ мс.

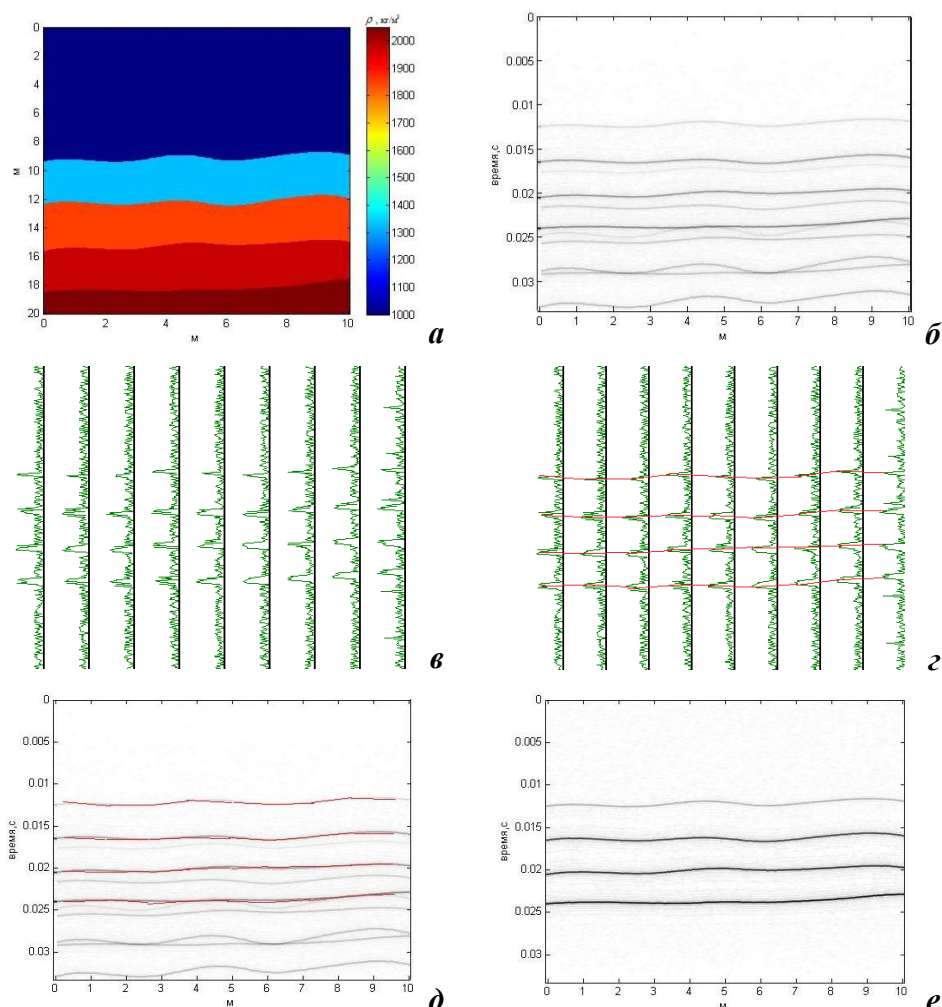
На рис.1 показана последовательность обработки информации.

В целях наглядности работы алгоритма из исходной профилограммы (рис.1, б) для анализа взята каждая пятидесятая выборка и для нее вычислен график распределения коэффициента эксцесса (рис.1, в) как оценка сглаженности спектра в окрестности центральной частоты. Соединением максимумов (рис.1, з) получены кривые (рис.1, д), которые есть не что иное как аппроксимация фактических границ разделов слоев (рис.1, е) или, другими словами, первичных волн. При применении этого алгоритма ко всем выборкам получены гладкие кривые фактических границ разделов слоев. Рис.1, д, е подтверждают эффективность предложенного алгоритма.

На рис.2 показан пример выявления границ слоев по реальной профилограмме с использованием интегральных характеристик спектра отраженного сигнала.

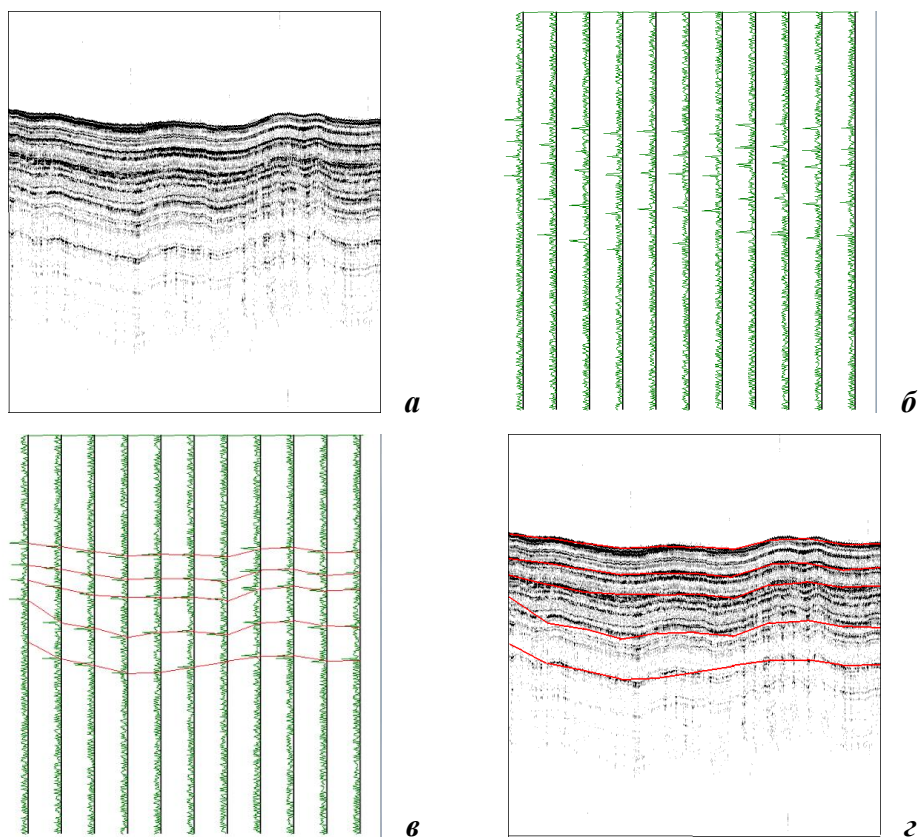
На рис.3 показан результат работы разработанного алгоритма выделения первичных волн с помощью преобразования Радона и метода *VDMUL*.

Таким образом оба предложенных метода позволяют эффективно выявлять и подавлять кратные волны, тем самым определять фактические границы слоев донных отложений для последующей их стратификации. Если

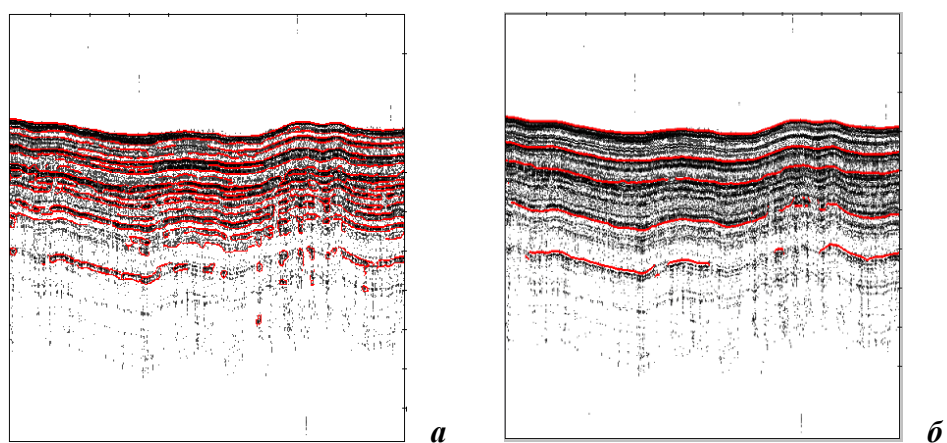


Р и с . 1 . Математическая модель метода определения первичных волн с помощью интегральных характеристик формы спектра отраженного сигнала: модель слоистой структуры морского дна с показаниями плотности (а); модель профилограммы (первичные и кратные волны) (б); распределение коэффициентов эксцесса по выборкам с шагом 50 (в); выделение пиков распределения коэффициентов эксцесса (г); определенные границы слоев по профилю (д); модель профилограммы (первичные волны) (е).

сравнивать работу двух алгоритмов [6], то можно сказать, что алгоритм с применением спектра отраженного сигнала требует использовать в качестве зондирующего широкополосные сигналы, что ограничивает его применимость. При использовании алгоритма на основе преобразования Радона и метода *VDMUL* нужно учитывать тот факт что ряд (1) бесконечный, и выделение первичных данных производится с погрешностью, связанной с количеством взятых членов ряда (1). В дальнейших исследованиях представляет интерес разработка методов, которые могли бы применять характеристики и особенности кратных волн как дополнительный признак при стратификации слоев донных отложений.



Р и с . 2 . Анализ интегральных характеристик формы спектра отраженного сигнала: исходная профилограмма (а); распределение коэффициентов эксцесса по выборкам с шагом 50 (б); выделение пиков распределение коэффициентов эксцесса (в); определенные границы слоев по профилю (г).



Р и с . 3 . Обработка информации в профилограмме: выявление всех волн на профилограмме с помощью преобразования Радона (а), первичные волны, распознанные алгоритмом VDMUL (б).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уильямсон Д. Кратные волны и их подавления: курс лекций / пер. с англ. Иванов С.В. – Тюмень: Проком, 2001. – 369 с.
2. Рашевский П.К. Курс дифференциальной геометрии. – М.: Гостехиздат, 1956. – 396 с.
3. Каевицер В.И., Разманов В.М., Долотов С.А. Акустическая локация морских осадков когерентными ЛЧМ сигналами // Журнал радиоэлектроники. – 2009. – № 9. – С.52-63.
4. Нефедова Г.А. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Наука, 1986. – 532 с.
5. Гончар А.И., Федосеенков С.Г., Шундель А.И. Цифровое моделирование параметрического профилографа // IV межд. конф. «Проблемы, методы и средства исследования мирового океана» (Запорожье, 14-15 мая 2013 г.). – Запорожье, 2013. – С.132-144.
6. Створення технології автоматизованої дистанційної профільної ґрунтової зйомки морського дна: Звіт по НДР / НТЦ ПАС НАН України; № 0110U003681. – Запоріжжя, 2012. – 70 с.

Материал поступил в редакцию 08.06.2013 г.

АНОТАЦІЯ Запропоновано методи усунення кратних хвиль при обробці інформації профілограм. Розглядаються можливості запропонованих методів при обробці математичної моделі профілограми. Наводяться приклади обробки реальних профілограм.

ABSTRACT The paper proposes methods for multiple attenuation in the processing of information profilograms. The possibilities of the proposed methods in processing mathematical model profilograms. Are considered examples of real-world processing profilograms are given.