

УДК 681.883.03

РАСЧЁТ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ ДОННЫХ СТРУКТУР

© А.И. Гончар, С.И. Неверова, А.И. Шундель, Л.И. Шлычек, 2010

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

У статті розглянуто створену математичну модель гідроакустичного відгуку, що реєструється на антені при профілюванні донних структур з використанням зондувального сигналу будь-якої складності. Розрахована модельна профілограма від моделі розрізу геологічної структури, що містить вуглеводневу сировину.

В статье рассмотрена созданная математическая модель гидроакустического отклика, регистрируемого на антенне при профилировании донных структур с использованием зондирующего сигнала любой сложности. Рассчитана модельная профилограмма от модели разреза геологической структуры, содержащей углеводородное сырье.

Generated mathematical model of hydroacoustic response recorded on the array during profiling of bottom structures with probing signal any complexity is considered in the paper. Modeling profilogram from the section model of geological structure containing hydrocarbon raw material is estimated.

СЛОИСТОЕ ДНО, ПРОФИЛИРОВАНИЕ, КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗАТУХАНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ, ЗОНДИРУЮЩИЙ СИГНАЛ, ИМПЕДАНС, ОТРАЖЁННЫЙ СИГНАЛ, МОДЕЛЬ СИГНАЛА

В исследованиях, связанных с разработкой и созданием новых моделей гидроакустических средств освещения подводной обстановки, возникает необходимость проведения численного моделирования работы данных средств. В подобных случаях зачастую возникают трудности из-за высокой стоимости и трудоемкости организации и проведения натурных наблюдений для предоставления реальной гидроакустической информации. Эти особенности гидроакустических наблюдений являются побудительным мотивом к созданию различного рода имитационных моделей и имитаторов гидроакустического эхо-сигнала и вызывают необходимость дифференцированного подхода к полноте описания физических процессов, происходящих при формировании эхо-сигнала в конкретной обстановке.

Существует два подхода к созданию модели эхо-сигнала. Первый заключается в создании модели для некоторого обобщенного эхо-сигнала, обладающего достаточно общими свойствами, второй - в создании модели эхо-сигнала для конкретного типа гидроакустического средства.

Имеется также градация моделей, вытекающая из методологических различий в решении волнового уравнения. Теоретически точные модели, главным образом, предназначены для решения задач рассеяния полей на телах простейшей формы. При анализе полей объектов сложной формы применяются различные упрощения и допущения при решении уравнений. Сочетание этих приближений и очевидный физический смысл акустических процессов и определяет группу физических моделей.

Подход к построению внутренней структуры моделей эхо-сигнала определяется классификацией гидроакустических моделей наблюдаемых объектов: точечные или распределенные, сосредоточенные или протяженные, линейные или поверхностные и т.п.

Существующие в настоящее время методы моделирования эхо-сигнала можно разделить на: детерминированный метод и, соответственно, класс детерминированных моделей; статистический метод и, соответственно, класс статистических моделей. Для детерминированных моделей характерно наличие заданного текущего положения наблюдаемых объектов и известных зависимостей их отражательных характеристик. Статистическое моделирование используется в случае, когда отражательные свойства наблюдаемых объектов имеют случайный характер либо в составе эхо-сигнала присутствуют помеховые компоненты.

Предметом данной статьи является задача синтеза имитационной модели гидроакустического эхо-сигнала, адекватно отражающей формирование эхо-сигнала от слоистого неоднородного дна и учитывающей параметры излучаемого сигнала.

Такая имитационная модель эхо-сигнала предназначена для создания на ее основе компьютерного имитатора, обеспечивающего имитационной измерительной информацией численные исследования различного рода моделей, например, таких как модели профилографа с тональным и сложным сигналом, необходимых для определения тонкой структуры донных отложений, поиска полезных ископаемых, в том числе углеводородного сырья.

Рассмотрим среду, состоящую из n слоев, заключенных между водным полупространством с параметрами $\rho_0 c_0$ и подстилающим полупространством с параметрами $\rho_{n+1} c_{n+1}$.

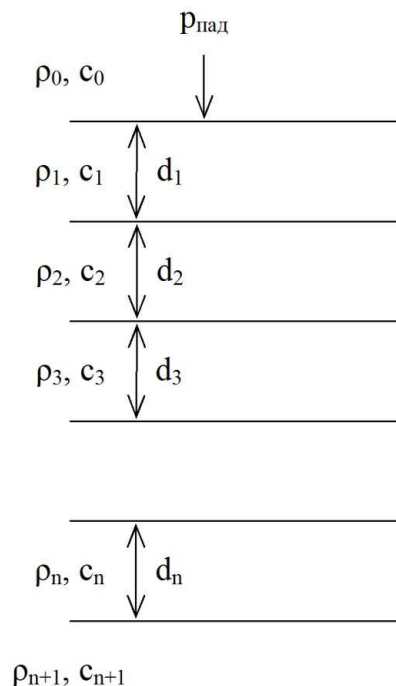


Рис. 1 – Определение коэффициентов отражения и прохождения системы слоев [1]

В предположении однократного отражения волн от границ слоев коэффициент отражения от верхней границы первого слоя с учётом затухания равен [1]:

$$V_{10} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} e^{-2\beta_0 H}, \quad (1)$$

где β_0 – коэффициент поглощения звука в воде;

H – глубина;

Z_0, Z_1 – импеданс соответственно нулевого и первого слоя.

Аналогично коэффициент отражения для верхней границы второго слоя относительно верхней границы первого равен:

$$V_{20} = W_{01} V_{21} W_{10} e^{-2\beta_0 H} e^{-2\beta_1 d_1}, \quad (2)$$

где β_1 – коэффициент поглощения звука в первом слое;

d_1 – толщина первого слоя.

Коэффициент отражения для верхней границы третьего слоя относительно верхней границы первого:

$$V_{30} = W_{01} W_{12} V_{32} W_{21} W_{10} e^{-2\beta_0 H} e^{-2\beta_1 d_1} e^{-2\beta_2 d_2}, \quad (3)$$

где β_2 – коэффициент поглощения звука во втором слое;

d_2 – толщина второго слоя.

Таким образом, коэффициент отражения от верхней границы N -го слоя относительно верхней границы первого равен:

$$\begin{aligned} V_{N0} &= \left[\prod_{i=1}^{N-1} W_{i-1,i} V_{N,N-1} W_{i,i-1} e^{-2\beta_i d_i} \right] e^{-2\beta_0 H} = \\ &= V_{N,N-1} e^{-2\beta_0 H} \left[\prod_{i=1}^{N-1} W_{i-1,i} W_{i,i-1} e^{-2\beta_i d_i} \right], \quad N \geq 2. \end{aligned} \quad (4)$$

Учитывая, что $W_{i-1,i} = 1 + V_{i,i-1} = 1 - V_{i-1,i}$, $W_{i,i-1} = 1 + V_{i-1,i} = 1 - V_{i,i-1}$, $V_{i,i-1} - V_{i-1,i}$, выражение (4) можно записать в виде:

$$V_{N0} = V_{N,N-1} e^{-2\beta_0 H} \left[\prod_{i=1}^{N-1} (1 - V_{i,i-1}^2) e^{-2\beta_i d_i} \right]. \quad (5)$$

Акустическое давление эхо-сигнала отражённого от слоистого дна, состоящего из N слоев, на входе антенны определяется как:

$$p_{omp} = V_{10} e^{-2\beta_0 H} p_{uzl} (t - 2c_0 H) + \sum_{N=2}^{n+1} \left\{ V_{N,0} \cdot p_{uzl} \left(t - 2c_0 H - 2 \sum_{i=1}^{N-1} c_i d_i \right) \right\} + p_N, \quad (6)$$

где p_N – давление на антенне, создаваемое шумом;

p_{uzl} – зондирующий сигнал, который может быть как простым, так и сложным.

Или с учётом (5) выражение (6) примет вид:

$$p_{omp} = V_{10} e^{-2\beta_0 H} p_{uzl} (t - 2c_0 H) + e^{-2\beta_0 H} \sum_{N=2}^{n+1} \left\{ V_{N,N-1} \left[\prod_{i=1}^{N-1} (1 - V_{i,i-1}^2) e^{-2\beta_i d_i} \right] p_{uzl} \left(t - 2c_0 H - 2 \sum_{i=1}^{N-1} c_i d_i \right) \right\} + p_N. \quad (7)$$

Существует другой способ, позволяющий рассчитать отражённый сигнал от слоистого неоднородного дна. Модельный акустический отклик представляет собой суперпозицию всех акустических сигналов, отраженных от геологических границ, имеющих различные коэффициенты отражения. Акустический отклик может быть описан так называемой свёрточной моделью [2, 3]:

$$p_{omp} = (p_{uzl}(t) \otimes V(t)) + p_N, \quad (8)$$

где $V(t)$ - импульсная характеристика среды, определяемая последовательностью коэффициентов отражения от всех границ,

$V(t)$ – это трансформированные во временной масштаб коэффициенты $V_{N,0}$. Данная функция определяется следующим выражением:

$$V(t) = \delta \left(t - \frac{2d_i}{c_i} \right) V_{i,0}, \quad i = 1 \dots N, \quad (9)$$

где δ – дельта-функция.

Расчёт гидроакустического отклика по формуле (8) производится гораздо быстрее, чем по (7), т.к. свёртку можно выполнять не во временной области, а в частотной, используя быстрое преобразование Фурье (БПФ). Однако формула (7) имеет более наглядный вид формирования отражённого сигнала от геологической структуры дна.

Для математической модели дна (рис. 2), представляющей вертикальный срез геологической структуры с характеристиками слоёв, приведёнными в табл. 1, и содержащей залежь нефти, по формулам (1-6) и (7) либо (8-9) выполнен компьютерный расчёт имитационной модели гидроакустического эхо-сигнала, адекватно отражающей формирование эхо-сигнала от слоистого неоднородного дна при вертикальном профилировании.

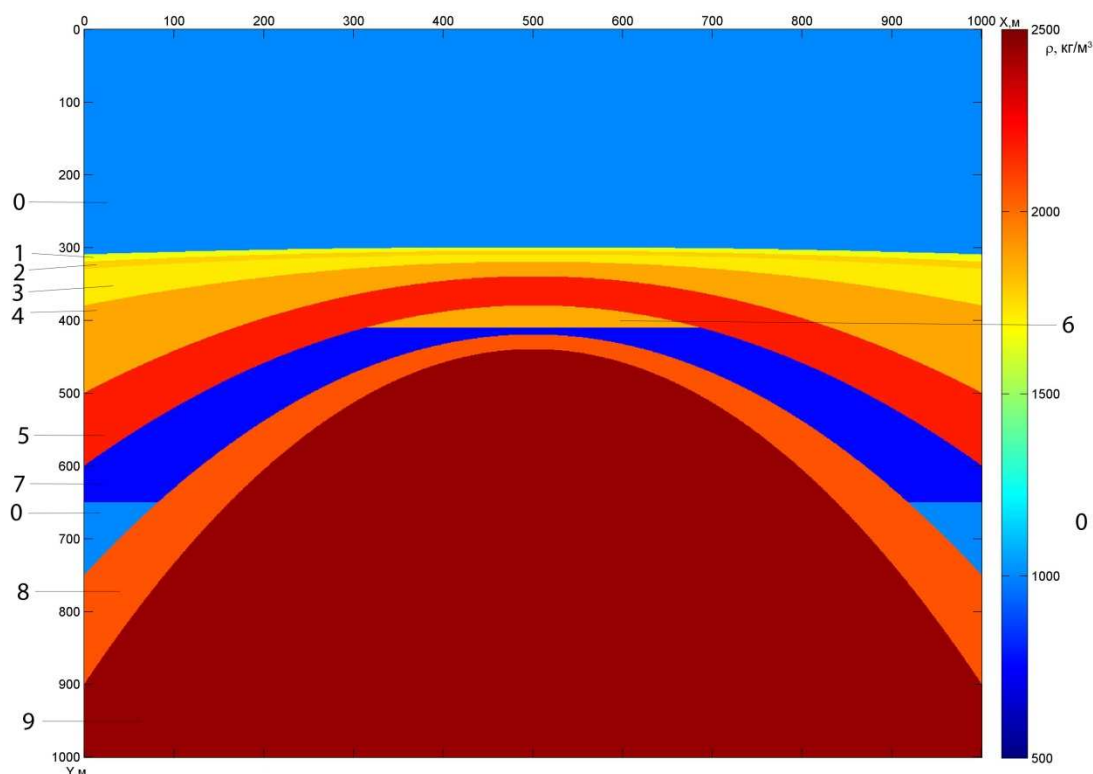


Рис. 2 – Математическая модель геологической структуры, содержащей залежь нефти

Таблица 1 – Акустические параметры модели геологического разреза [4]

номер типа осадков	тип осадков	плотность, ρ , кг/м ³	скорость звука, c , м/с	коэффициент затухания, β , 1/м
0	вода	1000	1500	0
1	ил	1650	1460	$1,2 \cdot 10^{-1}$
2	песчано-илистая глина	1780	1580	$4 \cdot 10^{-2}$
3	песчано-илистая глина	1720	1540	$4 \cdot 10^{-2}$
4	илистый песок	1870	1640	$1 \cdot 10^{-2}$
5	грубый песок	2180	1800	$1 \cdot 10^{-3}$
6	илистый песок	1860	1900	$2,3 \cdot 10^{-1}$
7	нефть	750	1300	0
8	грубый песок	2060	2000	$7 \cdot 10^{-3}$
9	алеврит	2450	2100	$2,9 \cdot 10^{-2}$

Расчёт проводился в среде Matlab Version 7.9.0.529(R2009b) с помощью специализированных script-функций, написанных нами. Пример рассчитанной модельной профилограммы приведён на рис. 3.

При расчёте профилограммы использовались следующие параметры излучающего импульса: частота $f = 3$ кГц, длительность $\tau = 3$ мс, период зондирования $T = 1,333$ с, амплитуда нормированная на единицу.

Из рис. 3 видно, что амплитуда отражённого сигнала от границы с нефтью больше, чем от других границ, это объясняется большей разницей импедансов между нефтяным пластом и вышележащим слоем, чем между любыми другими слоями. Граница раздела

между последними слоями практически не видна, вследствие затухания волнового поля при распространении.

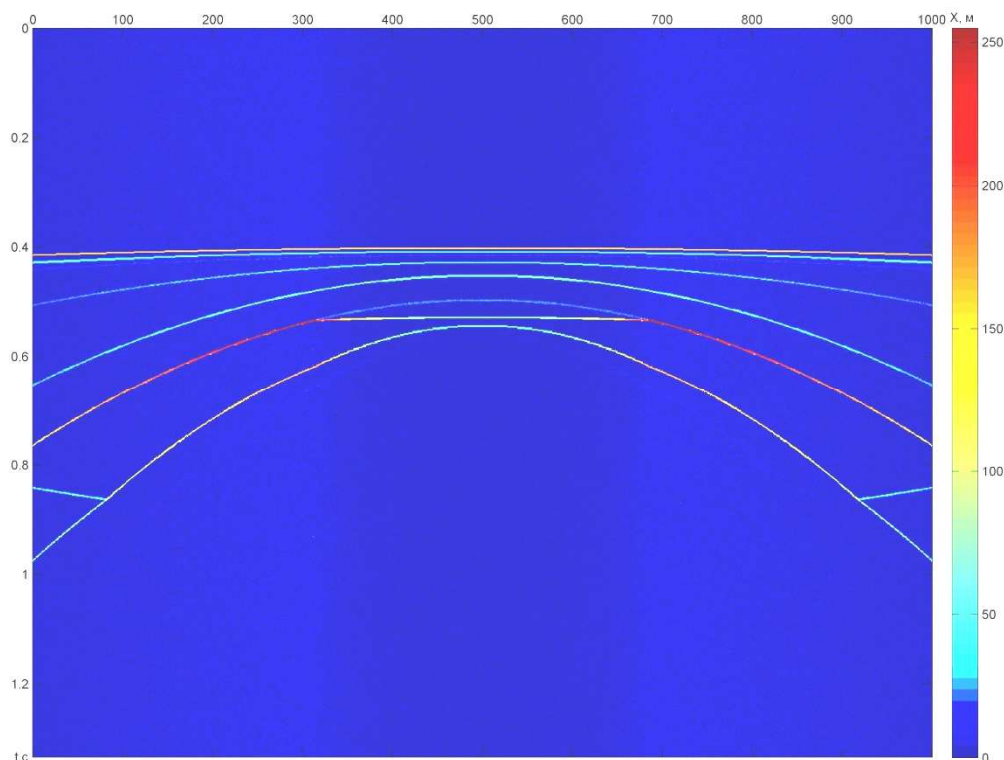


Рис. 3 – Расчётная профилограмма

Очень часто ошибки в исходных данных не позволяют добиться абсолютного сходства модельного и реального волнового поля. Поэтому сложно использовать модельные отклики для численных оценок и построения зависимостей амплитуд от параметров геологической модели. Но даже качественная информация о связи акустического волнового поля с физическими параметрами пластов может принести ощутимую пользу при интерпретации данных профилирования.

Таким образом, в работе просчитана математическая модель гидроакустического отклика, регистрируемого при профилировании донных структур, используя в качестве зондирующего сигнала сигнал любой сложности. Рассчитана модельная профилограмма от модели разреза геологической структуры, содержащей углеводородное сырье.

Литература

1. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит., – 1989. – 416с.
2. Шевченко А.А. Скважинная сейсморазведка. – М: РГУ нефти и газа, 2002. – 129с.
3. Кири П., Брукс М. Введение в геофизическую разведку. М.: Мир, 1988. – 382 с.
4. Берзон Н.С., Вейцман П.С., Капустян Н.К. Опыт построения тонкослоистой модели области границы Мохоровича // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, №2, – 1975. – С. 25-36