

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС MCWD ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА

Свиридов М.В.¹, Мосин А.П.¹, Антонов Ю.Е.¹, Никитенко М.Н.¹, Мартаков С.В.²

¹ – Новосибирский Технологический Центр компании Baker Hughes,
² – Хьюстонский Технологический Центр компании Baker Hughes.

Аннотация: рассматривается программный комплекс MCWD предназначенный для интерпретации данных электромагнитного каротажа. Разработанное программное обеспечение может использоваться как во время бурения – в целях оптимального позиционирования скважины в среде, так и для постобработки – в целях определения параметров среды, вмещающей скважину. Работоспособность комплекса показана на примере обработки полевых данных.

Ключевые слова: электромагнитный каротаж, инверсия данных каротажа, метод наиболее вероятного ансамбля, программный комплекс MCWD, геонавигация, прибор AziTrak.

Целью геофизического исследования земных недр является определение параметров среды. По данным скважинного каротажа можно восстановить параметры среды в некоторой области вокруг ствола скважины. Размеры данной области зависят от свойств формации, вмещающей каротажный прибор, а также от глубинности измерений прибора и могут варьироваться от нескольких сантиметров до нескольких метров.

Известно, что электромагнитный каротаж обладает наибольшей глубинностью измерений среди всех каротажных методов. Приборы нейтронного, плотностного и гамма-каротажа принято использовать в целях надежного определения параметров среды в непосредственной близости от скважины, а для определения свойств удаленных зон традиционно применяются приборы электромагнитного каротажа.

Искомыми параметрами, описывающими среду с точки зрения электромагнитных методов исследования, считаются удельное электрическое сопротивление пластов, пластовая электрическая анизотропия, толщина пластов и их ориентация в пространстве. Определение указанных параметров в реальном времени в ходе бурения в целях поиска продуктивного пласта и оптимального расположения ствола скважины относительно границ резервуара является задачей геонавигации. Успешно проведенная процедура геонавигации позволяет максимизировать приток углеводородов и упростить работы по заканчиванию скважины.

Большинство программных пакетов, используемых в индустрии для геонавигации, базируются на простейших моделях сред, используя которые не удастся качественно описать реальную геологическую формацию. Программный комплекс MCWD лишен указанных недостатков, поскольку опирается на одномерную горизонтально-слоистую модель среды с произвольным количеством слоев и произвольным расположением в ней каротажного прибора. Комплекс позволяет производить обработку произвольной комбинации измерений каротажных приборов в реальном времени.

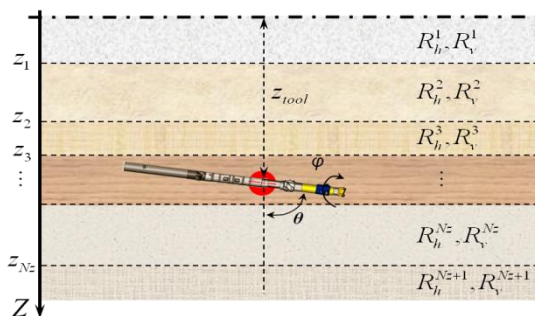


Рис. 1. Одномерная горизонтально-слоистая модель. Параметрами модели являются значения горизонтального и вертикального УЭС, координаты границ слоев, относительный угол наклона и угол вращения прибора вокруг своей оси.

Каротажный прибор

Наиболее распространенным электромагнитным индукционным прибором компании Baker Hughes, применяемым для каротажа во время бурения, является прибор AziTrak. Схематически прибор изображен на Рис.2. Он содержит:

- четыре генераторные катушки T1, T2, T3 и T4 с моментом направленным вдоль оси Z прибора
- 2 приемные катушки: R1 и R2 с моментом направленным вдоль оси Z прибора
- 2 приемные катушки: R3 и R4 с моментом направленным вдоль оси X прибора

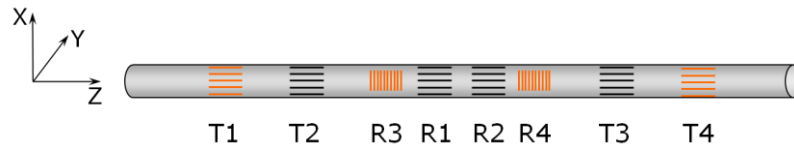


Рис. 2. Схема прибора AziTrak

Прибор работает на двух частотах – 400 кГц и 2 МГц, измеряя величину ЭДС в приемных катушках. Сигнал, измеренный в катушках R1 и R2, принято называть ZZ сигналом, а сигнал, измеренный в катушках R3 и R4 – ZX сигналом. Для интерпретации может быть использовано до 16 различных трансформаций ZZ и ZX сигналов.

Для сигналов AziTrak'a используется следующая модель ошибки: $\varepsilon = |S| \cdot \sigma_r + \sigma_a$, где S – величина измеряемого сигнала. Предполагается, что относительная часть ошибки σ_r составляет 2% от абсолютной величины сигнала; абсолютная часть ошибки σ_a зависит от типа измерений и равна 0.01 дБ для относительной амплитуды, 0.1 градуса для разностей фаз и 10 нВ для величины ЭДС.

Измерения во время бурения проводятся на постоянно вращающейся буровой колонне, это вносит дополнительные трудности, так как ZX сигналы, в отличие от ZZ сигналов, являются зависимыми от угла вращения. Тем не менее, для задач направленного бурения эта зависимость является важнейшим преимуществом ZX сигналов – они позволяют определить пространственное направление, в котором прибор приближается к неоднородности в формации.

Алгоритм инверсии

С появлением многокомпонентных и разноглубинных измерений простых методик интерпретации вроде визуального анализа каротажных кривых стало недостаточно. Единственным способом обработать набор измерений приборов, имеющих разную чувствительность к различным параметрам среды, является многопараметрическая инверсия данных.

В силу ограниченного количества независимых каротажных измерений, недостаточной чувствительности сигналов к некоторым из определяемых параметров и влияния ошибок измерений, результаты инверсии могут быть неединственными. В этих условиях единственным средством, позволяющим выбрать верный ответ, является учет априорной информации.

Ядром программного комплекса MCWD является алгоритм инверсии, основанный на методе наиболее вероятного ансамбля [1]. Цель метода – поиск минимума следующей целевой функции:

$$\Delta F^T C_F^{-1} \Delta F + \alpha^2 \Delta X^T C_X^{-1} \Delta X + P^T P$$

Здесь ΔF – невязка между теоретическими и измеренными сигналами, ΔX – расстояние между априорными и вычисленными значениями параметров модели, вектор P состоит из «штрафов» за выход параметров за пределы заданной области, α – параметр регуляризации. C_X и C_F – корреляционные матрицы параметров и сигналов соответственно.

Первое слагаемое представляет собой невязку, второе (регуляризационное) слагаемое стабилизирует сходимость, «подталкивая» решение в сторону ожидаемой (априорной) модели. Третье слагаемое не позволяет параметрам модели выйти из заданной области. Кроме того, при вычислениях используются трансформации параметров модели, чтобы упростить вид целевого функционала. Регуляризационный параметр α выбирается либо по методу квазиоптимального выбора [2], либо по методу согласования по независимым наборам данных [3].

Для локальной оптимизации функционала используется один из следующих методов:

- Метод комплексов Бокса [4], являющийся модификацией симплекс-метода Нелдера-Мида
- Модификация метода Левенберга-Марквардта [5]

Для поиска глобального минимума целевой функции используется эвристический алгоритм сканирования области параметров задачи.

Применение программного комплекса MCWD для обработки данных каротажа

Для иллюстрации работоспособности комплекса MCWD рассмотрим пример обработки полевых данных AziTrak'a, полученных при бурении скважины на шельфе Северного моря. В данном случае перед инженерами стояла задача проложить горизонтальную секцию скважины в нефтенасыщенном песчанике на расстоянии около 1.5 м от глинистой покрывки.

При бурении участка 6600-6750 ф траектория скважины была расположена практически параллельно границе раздела сред на требуемом расстоянии от линии раздела, а затем глинистая покрывка начала постепенно приближаться к стволу скважины. В районе отметки 6800 ф инженеры начали изменять направление бурения, чтобы избежать входа в глинистый сланец. Однако, вследствие достаточно резкого изменения глубины залегания пластов, был допущен выход в глинистую покрывку резервуара на интервале 6810-6970 ф.

Интерпретация сигналов каротажного зонда посредством комплекса MCWD позволила определить параметры среды и показала неоднородность глинистой покрывки. Восстановленная геоэлектрическая модель изображена на Рис. 3, о надежности этой модели можно судить по качеству приближения измеренных сигналов модельными (Рис. 4а и 4б).

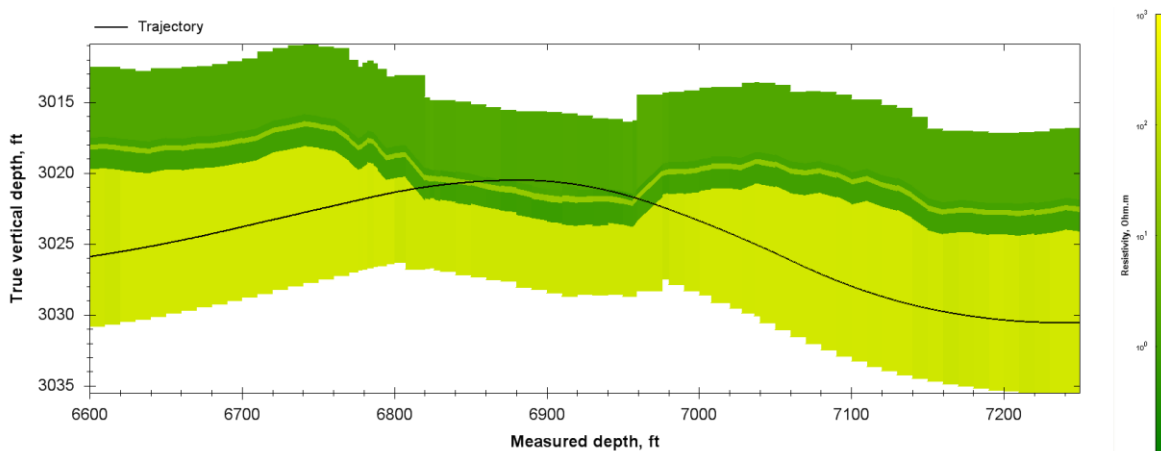


Рис. 3. Геоэлектрическая модель среды, полученная с помощью инверсии измерений каротажного зонда AziTrak, для скважины, пробуренной на шельфе в Северном море. По оси X отложено расстояние в футах вдоль скважины, траектория которой отмечена линией черного цвета. По оси Y отложено восстановленное расстояние в футах до границ раздела пластов. Расшифровка значений УЭС пластов в Ом·м показана на цветовой палитре справа. Модель строилась в предположении, что толщины и параметры верхних четырех слоев, восстановленные в интервале 6810-6970 ф, за пределами этого интервала меняются несущественно.

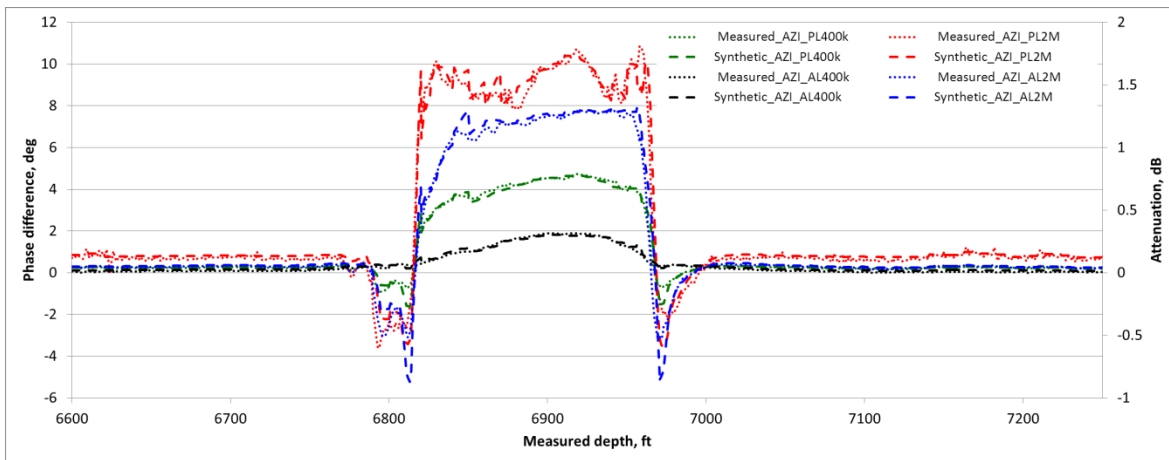


Рис. 4а. Измеренные и подобранные в ходе инверсии ZZ-сигналы каротажного зонда. Измеренные сигналы показаны точками, подобранные – пунктирными линиями.

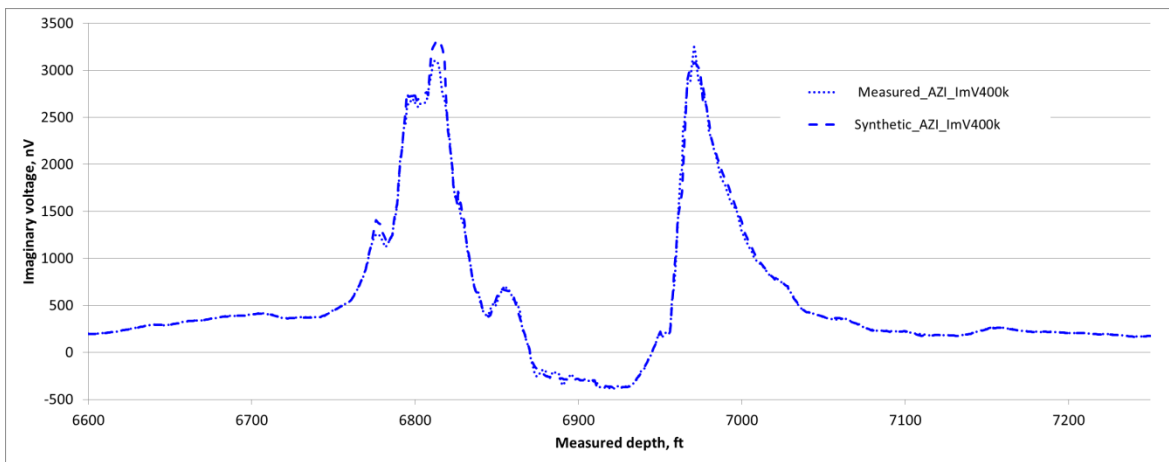


Рис. 4б. Измеренный и подобранный в ходе инверсии ZX-сигнал каротажного зонда. Измеренный сигнал изображен точками, подобранный – пунктирной линией.

1. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Справочник. Киев: Наукова думка, 1986, 544 с
2. Яновская Т. Б., Порохова Л. Н., Обратные задачи геофизики. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1983. 212 с.
3. Stone, M., 1974, Cross-Validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions, Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological) Vol. 36, No. 2, pp. 111-147
4. Гилл Ф., Мюррей У. Численные методы условной оптимизации. М.: Мир, 1977. 287 с.
5. Дэннис Дж., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. М.: Мир, 1988, 504 с.