АДАПТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К КОРРЕКЦИИ СТАТИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПОПРАВОК В ЗАДАЧЕ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ[1]

Татяна Ступина

***Аннотация**: В работе рассматриваются проблемы, возникающие в цифровой обработке сейсмических данных. Основной акцент делается на недостатки в изученности несоответствия математической и физической модели объекта. Не смотря на то, что любой граф обработки сейсмических данных содержит процедуру коррекции статических и кинематических поправок., учитывающих неоднородности верхней части сред, задача остаётся актуальной поскольку качество конечных результатов, представленных сейсмическими и глубинными разрезами и в настоящее время оставляет желать лучшего. Для регрессионной модели коррекции статики без искажения кинематики предлагается три подхода к реализации численного метода, максимально учитывающего априорную информацию, представленную количеством опорных точек на сейсмическом профиле.*

***Ключевые слова**: модель остаточных времен отражений, кинематические и статические поправки, линейная регрессия, мера априорной информации.*

***ACM Classification Keywords**: G1.10 Numerical Analysis - Applications, G3 Probability and statistics - Correlation and regression analysis.*

***Conference**: The paper is selected from XIVth International Conference "Knowledge-Dialogue-Solution" KDS 2008, Varna, Bulgaria, June-July 2008*

Введение

Результаты обработки сейсмических данных зависят от того, насколько экспериментальные (полевые) данные соответствуют принятой теоретической модели изучаемой среды. Такие искажения, как правило, относятся к искажениям времён прихода волн за счет неоднородностей в верхней части разреза (статические поправки) и различий во временах прихода полезных отраженных волн, вызванных неодинаковым удалением пункта приёма и источника (кинематические поправки). К настоящему времени в современных обрабатывающих пакетах используются достаточно эффективные процедуры коррекции статических и кинематических поправок [В.С. Козырев и др] но, как правило, они основываются на предположении о вертикальности распространения лучей от уровня приведения до дневной поверхности. Такие предположения не всегда приводят к ожидаемому или удовлетворительному результату [А.П. Сысоев], поскольку не учитывается полная информация о неоднородности верхней части разреза, которую можно охарактеризовать:

1. зоной малых скоростей,
2. рельефом дневной поверхности,
3. погруженными неоднородностями.

Учет всех этих параметров в общей модели коррекции остаточных времен может дать более удовлетворительный результат.

Цель исследований проблемы учета поверхностных неоднородностей для задачи кинематической интерпретации точно определена в названии работы [В.М. Глоговский и др.] – получение неискаженных кинематических параметров временного поля, пересчитанного на линию приведения с учетом априорной информации о структуре рельефа дневной поверхности. Не смотря на большое количество работ по данной тематике, не существует достаточно чёткой постановки о количественной или качественной мере априорной информации необходимой для получения удовлетворительного результата. Это обусловлено

[1] Работа выполнена при поддержке РФФИ 07-01-00331-а

«сложностью» задачи - большим набором предопределяемых факторов: выбор модели покрывающей толщи и сейсмической границы, обобщение значений скоростей, система наблюдений и др.

В настоящей работе рассматривается линейная модель остаточных времен отражений [Л. Хаттон и др], проводится её анализ для задачи с фиксированной системой наблюдений, задаётся мера априорной информации, предлагается несколько адаптивных подходов к уточнению решения, т.е. учитывающих априорную информацию, основанную на введении комбинированных функционалов качества.

Модель остаточных времен отражений

Сначала будем рассматривать модель остаточных времен отражений в следующем представлении:

$$\tau_{ij} = S_i + R_j + G_k + M_k x_{ij}^2 + N_{ij} \tag{1}$$

где τ – двойное время отражения после введения первичных априорных статических и кинематических поправок, i, j, k – индексы положения источника, приёмника и общей срединной точки (ОСТ) соответственно, G – структурная компонента (двойное время пробега волны от уровня приведения до отражающей границы в средней точке между источником и приёмником), S – поверхностно согласованная статическая поправка за источник (пункт возбуждения), R – то же за приёмник, M - коэффициент остаточной кинематической поправки, x – удаление приёмника от источника, N – компонента шума.

Модель (1) получается из уравнения относительно времен T_{ij} отраженной волны:

$$T(x,l) = a(x-l) + b(x+l) + \sqrt{t_0^2(x) + 4l^2 / v^2(x)}\,, \tag{2}$$

описывающей годограф ОСТ для однослойной модели среды, пересчитанный на линию приведения в системе координат (x,l): x - координата ОСТ, l - полурасстояние приемник-источник. Благодаря возможности получения и учета априорной информации, осуществляемой путем ввода априорной модели годографа $T_a(x,l)$ с параметрами $a_a(x\text{-}l)$, $b_a(x\text{+}l)$, t_{0a}, v_a, и сделав процедуру линеаризации модели (2) (разложение в ряд Тейлора функции $\sqrt{(\bullet)}$ в окрестности l=0), получим:

$$\tau(x,l) = T(x,l) - a_a(x-l) - b_a(x+l) - \sqrt{t_{0a}^2(x) + 4l^2 / v_a^2(x)} \approx$$

$$\approx s(x-l) + r(x+l) + g(x) + m(x)l^2 \tag{3}$$

модель, определяющую остаточные временные сдвиги $\tau(x,l) = \tau_{ij}$ в виде (1). Окончательным решением являются времена отражений

$$T(x,l)=T_a(x,l)+ \tau(x,l). \tag{4}$$

Восстановление факторов, определяющих влияние параметров ВЧР на времена прихода волны отражения, по наблюдённым данным эквивалентно решению системы уравнений (1) минимизацией функционала $F_1 = \|\tau - \tilde{\tau}\|_{L_2}$. Отметим, что оценки факторов - мнк-оценки, которые обладают свойством оптимальности в случае независимости оцениваемых параметров и некоррелируемости шума, что не всегда выполнимо на практике. Так же при решении задач на практике возникают дополнительные трудности в реализации вычислительного алгоритма. Переписав уравнение (1) в операторной форме:

$$A\, p = \tau + \delta\tau, \tag{5}$$

можно увидеть, что матрица A сильно разреженная, состоящая из 0,1 и x_{ij}^2, $p = (S_i, R_j, G_k, M_k)^T$ – вектор оцениваемых факторов, τ – вектор наблюдений, $\delta\tau$ – вектор помех. В связи с большой размерностью входных параметров и наличием между ними определённых связей система уравнений является плохо обусловленной, а решения - неустойчивыми [А.П. Сысоев]. При решении таких систем прибегают к различным методам регуляризации и итерационным методам решения систем уравнений, а также к привлечению дополнительной (априорной) информации, к упрощению моделей до меньшего числа параметров или сужая класс решающих функций. Однако, различные методы регуляризации не всегда являются эффективны в получении удовлетворительного конечного результата (временной или глубинный разрез среды), поскольку по своей идее направлены скорее на улучшение только алгоритмической части решения задачи.

Таким образом, не смотря на математическую простоту модели (1), возникают сопутствующие проблемы в её практической реализации и получении корректного результата. Видимо ещё и поэтому имеет смысл уделять должное внимание применению априорной информации об исследуемом объекте на всех этапах решения задачи, которая влияет как на адекватность физической модели, так и на реализацию вычислительного алгоритма.

Экономическая актуальность решения обратных задач сейсмики и по настоящее время – в грамотном использовании априорной информации в связи с большими затратами на её получение.

Определим одну из количественных мер априорной информации через число μ опорных точек, необходимых для интерполирования формы $f_a(x)$ рельефа дневной поверхности. Будем пока считать, что все остальные параметры модели известны или имеются достаточно точные оценки. Сформулируем идейные подходы к решению обратной кинематической задачи с учётом априорной информации о рельефе дневной поверхности.

О подходах к решению обратной кинематической задачи с учётом априорной информации

При решении систем уравнений, подобных модели (1) с сильно разряженными матрицами на практике, как правило, применяются итерационные методы. Здесь возникает дополнительная задача – выбор устойчивого алгоритма решения в общем случае некорректной задачи. Неплохо зарекомендовал себя итерационный метод Гаусса-Зейделя [[Л. Хаттон и др.]. В целях исследования применим этот метод с учетом выполнения условий на решение, которое будет состоять в том, чтобы в определённых (опорных) точках, образующих множество D_a, функция рельефа f сохраняла бы значения близкие к априорно заданным (как правило, полученным в результате проведения работ по микросейсмокаротажу), т. е.

$$F_2 = \| f(x) - f_a(x) \|_{L_2} \to \min_{x \in D_a} .$$

По сути, можно сказать, что задача коррекции статических поправок без искажения кинематических факторов отражённых волн сводится к задаче адекватного восстановления многоэкстремальной функции рельефа по априорно заданным опорным точкам.

Покажем, что минимизация только функционала F_1 не всегда может привести к желаемому результату. Обозначим через g^*, f^* (параметры x и l опустим) истинные, по существу неизвестные функции годографа и рельефа, через g_a, f_a – априорные функции годографа и рельефа, через $\tilde{g}, \tilde{f}$ - кинематические и статические поправки. Тогда подставляя равенство (4) в уравнение функционала F_1 получим оценку

$$\|\tau - \tilde{\tau}\| \le \|g^* - g_a\| + \|f^* - f_a\| + \|\tilde{g}\| + \|\tilde{f}\| = \varepsilon_g + \varepsilon_f + \|\tilde{g}\| + \|\tilde{f}\| = \varepsilon ,$$

из которой видно, что одному значению критерия могут соответствовать различные значения входящих в сумму слагаемых. Даже при условии достаточно точно заданной априорной модели среды (два первых слагаемых, которые так же можно назвать неустранимыми погрешностями модели) кинематические и статические поправки могут быть взаимно заменяемыми.

Для того, чтобы скорректировать возникающую неоднозначность предлагается несколько идейных подходов при решении задачи:

1. Последовательная поправка априорного решения на каждом шаге итерационного метода решения системы уравнений (5).
2. Введение нового функционала качества, как линейной комбинации F_1 и F_2, т. е. $F = \sum \lambda_i F_i \to \min$.
3. Построение усредненного с весовым функциям решения на множестве «пробных» решений. Введение весовой функции на вектора решений с максимальным весом в априорно заданных точках рельефа.

Для оценки обобщающей способности алгоритма предлагается дополнительно исследовать норму невязки по контрольным точкам (исключенным из обучающей матрицы A). Хотя такой подход, как правило, применяется в задачах распознавания образов, автором не обнаружено его использование (или опровержение) в работах по обработке сейсмических данных.

В рассматриваемой задаче сильная разреженность операторной матрицы позволяет выписать итерационные формулы получения мнк-оценок для модели (1) не прибегая к непосредственному транспонированию:

$$G_k = \frac{1}{n_k}\sum_{(k)}^{n_k}(\tau_{ij} - S_i - R_j - M_k x_{ij}^2)\ ,$$

$$S_i = \frac{1}{n_i}\sum_{(i)}^{n_i}(\tau_{ij} - G_k - R_j - M_k x_{ij}^2)\ ,$$

$$R_j = \frac{1}{n_j}\sum_{(j)}^{n_j}(\tau_{ij} - S_i - G_k - M_k x_{ij}^2)\ ,$$

$$M_k = \frac{1}{\sum\limits_{(k)}^{n_k} x_{ij}^2}\sum_{(k)}^{n_k}(\tau_{ij} - S_i - R_j - G_k)\ , \tag{6}$$

где n_k, n_i, n_j означают кратность, с которой k-ая ОСТ, i-ый пункт возбуждения и j-ый пункт приёма присутствуют в наблюдениях, суммирование ведётся по трассам, в которых они участвуют. Из представленных зависимостей (6) видно, что начальное приближение возможно по любому из факторов S_i, R_j, G_k, M_k .

Стратегия нахождения искомого решения состоит в реализации двух основных процедур:

1. Проверки условия сходимости итерационного процесса, например, по относительной невязке на n – ой итерации, либо по количеству допустимых итераций n > *maxiter*.
2. Проверки априорных условий, устанавливаемых предложенными подходами.

Пусть на n-ой итерации, $n = 1, 2, 3...$ получено решение $p^{(n)} = (f^{(n)}, g^{(n)})^T$ системы $\tau^{(n)} = Ap^{(n)} = (A_1 f^{(n)}, A_2 g^{(n)})^T$, со значением невязки равным $\varepsilon^{(n)} = \left\|\tau - \tau^{(n)}\right\|$. Решение $p^{(n)}$ корректируется до $\tilde{p}^{(n)} = p^{(n)} + p_1$ следующим образом.

1. Для первого подхода:

$\left\|\tau - \tilde{\tau}^{(n)}\right\| \le \varepsilon^{(n)} + \varepsilon_1$ и $\left\|\tilde{f}^{(n)}\right\| \le \left\|f^{(n)}\right\|$, где $\varepsilon^{(n)} + \varepsilon_1 \le \left\|\delta\tau\right\|$.

2. Для второго подхода:

$F = \lambda_1\left\|\tau - \tilde{\tau}^{(n)}\right\| + \lambda_2\left\|\tilde{f}^{(n)}\right\| \to \min\limits_{x \in D_a}$, где $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$.

Условие $\lambda_2 > \lambda_1$ означает более сильные требования к выполнению априорных условий.

3. Для третьего подхода:

Обозначим через $D_p = \left\{p^{(n)} : \delta_{\min} \le \left\|\tau - Ap^{(n)}\right\| \le \delta_{\max}, n_{\min} \le n \le n_{\max}\right\}$ множество «пробных» решений, т.е. множество решений, которые в пределах нескольких итераций удовлетворяют допустимому качеству по норме невязки, тогда окончательное решение формируется как $\tilde{p} = \sum\limits_n \lambda_n p^{(n)}$, где $\sum\limits_n \lambda_n = 1$ и весовой ряд $\{\lambda_n\}$ ранжирован с максимальным значением для минимальной нормы $\left\|f^{(n)}\right\|$.

Экспериментальное исследование устойчивости решения

При численном исследовании задачи на устойчивость возникают две составляющие, влияющие в целом на результат:

1. устойчивость численного алгоритма, когда желательно заранее оценить обусловленность матрицы A,

2. устойчивость самой модели (1), когда оценивается мера отклонения решения в зависимости от уровня шума $\left\|\delta\tau\right\|$.

На практике часто бывает трудно оценить число обусловленности матрицы A. Поэтому предлагается использовать один из приёмов, который хотя и не даёт строгий ответ об устойчивости применяемого метода и полученного решения, но все же позволяет сделать некоторые предположения о характере решения. Такой подход несколько напоминает метод регуляризации решения и заключается в уточнении полученного решения и оценки его погрешности следующим образом.

Пусть получено приближенное решение системы (1) $\overline{p}^{(0)}$. Вычислим невязку уравнения $\overline{\xi} = \overline{\tau} - A\overline{p}^{(0)}$. Если норма невязки $\overline{\xi}$ велика, то можно искать вектор-поправку $\widetilde{p}$ такой, что точное решение системы $\overline{p} = \overline{p}^{(0)} + \widetilde{p}$. Следовательно $A \cdot (\overline{p}^{(0)} + \widetilde{p}) = \overline{p}$, отсюда $A\widetilde{p} = \overline{\xi}$. После этого уточняется решение системы $\overline{p}^{(1)} = \overline{p}^{(0)} + \widetilde{p}$. Если относительная погрешность $\frac{\|\widetilde{p}\|}{\|\overline{p}^{(1)}\|}$ велика, то можно повторить процесс уточнения. Если процесс уточнения, повторенный два три раза, не приводит к повышению точности, то это говорит скорей всего о том, что данная система плохо обусловлена и ее решение не может быть найдено с требуемой точностью.

Приведённый алгоритм экспериментального исследования устойчивости решения применим ко всем трём подходам, сформулированным выше, причём на этапе последовательного формирования решения.

Заключение

В настоящей работе представлена линейная модель остаточных времен отражений, учитывающая статические и кинематические поправки за рельеф с учётом априорной информации о самой модели. Было отмечено, что такого рода задачи остаются актуальными в связи с большой обусловленностью их решений. Предложено три адаптивных подхода к получению решения, т.е. максимально учитывающих априорную информацию, представленную количеством опорных точек на сейсмическом профиле. Предложенные подходы основаны на введении комбинированных функционалов качества модели и корректировки решения на этапе итерационного формирования решения. Для однородной однослойной изотропной среды заданной мощности, фиксированной системы наблюдений определённой длины, планируется численное моделирование по представленной в работе методике.

В заключении отметим, что кроме применения математического аппарата, используемого для четкого обоснования методов, любая практическая задача всегда требует индивидуального подхода к её решению, не смотря на общепринятые подходы.

Литература

[В.С. Козырев и др.] В.С. Козырев, А.П. Жуков, И.П. Коротков, А.А. Жуков, М.Б. Шнеерсон. Учёт неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке. Современные технологии, М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003, 227 с.

[А.П. Сысоев] А.П. Сысоев. Анализ устойчивости оценивания статических и кинематических параметров в МОВ. Математические проблемы интерпретации данных сейсморазведки, Новосибирск, Наука, 1988.

[Л. Хаттон и др.] Л. Хаттон, М. Уэрдингтон, Дж. Мейкин. Обработка сейсмических данных. Теория и практика. Изд-во: М.: Мир, 1989, 216 с.

[В.М. Глоговский] В.М. Глоговский, А.Р. Хачатрян. Коррекция статических поправок без искажения кинематических параметров отражённых волн. Геология и геофизика. 1984, №10,

Информация об авторе

Tatyana A. Stupina *– Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophisics of SBRAS, Koptyug Ave 3, Novosibirsk, 630090, Russia; e-mail: stupinata@ipgg.nsc.ru*