Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVI, вып. 2, 1974 г.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГОДОГРАФОВ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН МЕТОДАМИ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Ю. А. Лебедев

Годографы наблюдаемых отраженных волн всегда осложнены различного рода помехами. Некоторые из них связывают с определенными отклонениями реальных условий от допущений, лежащих в основе математической модели годографа (наличие рельефа и ЗМС, эффект преломления сейсмического луча на промежуточных границах среды и т. п.). Такие искажения считают систематическими и обычно исключают их в процессе геологической интерпретации годографов. Остальные помехи, значения которых не удается определить по детерминированным функциональным зависимостям, относят к случайным. Чтобы уменьшить их влияние на результаты интерпретации, оценку параметров модели геологического разреза производят статистическими методами. Существуют достаточно строгие решения, которые позволяют найти оптимальные оценки искомых параметров [1]. В общем случае для этого необходимо иметь обоснованные представления о характере распределения случайных помех, а сами параметры распределения следует включить в число неизвестных. Кроме того, обычно делается предположение о стационарности помех.

В тех случаях, когда считается нежелательным осреднять большое число реализаций помех (например, при изучении узких локальных структур), необходимо предполагать стационарность в узком смысле, т. е. считать помеху эргодическим процессом. Однако изучение экспериментального материала показывает, что последнее условие часто нарушается главным образом из-за влияния интерференции волн, которая проявляется в наличии искажений годографов, коррелируемых на значительных расстояниях. Так, при поисках платформенных структур в осадочном чехле с интервалом наблюдений 400—500 *м* радиус корреляции таких помех составляет 150—200 *м*. Соответствующие автокорреляционные функции имеют глубокий минимум и по своему характеру приближаются к косинусоидальным. Интенсивность интерференционных искажений в несколько раз превышает высокочастотные случайные помехи. Интерпретация одиночных или встречных годографов по алгоритмам оптимальной статистической обработки в этом случае не дает заметного выигрыша в точности сравнительно с методом наименьших квадратов в его простейшей модификации.

Хотя по своему характеру из-за большого, сравнительно с интервалом наблюдений, радиуса корреляции интерференционные помехи

близки к систематическим, все же приходится относить их к разряду случайных. Это связано прежде всего со значительной изменчивостью помех при переходе от одной расстановки приемников к другой. Их изменчивость обусловлена влиянием большого числа факторов (условия возбуждения, прохождения, отражения и регистрации волн), которые невозможно раздельно учесть в математической модели. С другой стороны, явное несоответствие интерференционных искажений характеру традиционных моделей помех, принятых в алгоритмах статистической обработки, приводит к значительному смещению вычисляемых этими способами оценок искомых параметров. Например, при обработке одиночных годографов протяженностью 450 *м* (глубина отражающей границы 600 *м*, средняя скорость 2,4 *км/сек*) обнаруживалось систематическое занижение эффективной скорости относительно средней до 20%.

Наиболее действенным способом борьбы с такого рода помехами на этапе интерпретации является учет априорной информации о допустимом характере годографа, которым аппроксимируется наблюденный. В рамках статистических методов это означает учет априорных вероятностей возможных отклонений в каждой точке наблюдений. Дополнительная информация, которой располагает интерпретатор, приступая к обработке годографов, обычно имеет ясный физический смысл и сводится к указанию диапазона возможных значений средней и пластовой скоростей, угла наклона отражающей границы. Вычисление же априорных вероятностей лишает геофизика наглядности вводимых ограничений.

Поскольку при значительной интенсивности интерференционных искажений учет реального характера распределения высокочастотных случайных помех не оказывает существенного влияния на вычисляемые оценки искомых параметров, во многих случаях целесообразно считать это распределение наиболее простым, а именно равномерным. Это позволяет при линеаризованной задаче применить эффективные приемы учета априорной информации, использовав методы линейного программирования.

Рассмотрим аддитивную модель полезного сигнала и помехи

$$t^2(x) = \bar{t}^2(x) + \bar{\varepsilon}(x), \tag{1}$$

где $t(x)$ — наблюденный годограф; $\bar{t}(x)$ — теоретический годограф, соответствующий искомой модели; $\bar{\varepsilon}(x)$ — помеха.

Аппроксимирующую модель $\bar{t}(x)$ задаем в обычном для метода средних скоростей виде

$$\bar{t}(x) = \frac{1}{v}\sqrt{4H^2 + 4Hx\sin\varphi + x^2}, \tag{2}$$

где v — средняя скорость до отражающей границы; H — глубина границы; x — координата точки наблюдения; φ — угол наклона отражающей границы.

Введем систему ограничений

$$\left.\begin{aligned} &|t^2(x_1) - \alpha - \beta x_1 - \gamma x_1^2| \leqslant \varepsilon; \\ &|t^2(x_2) - \alpha - \beta x_2 - \gamma x_2^2| \leqslant \varepsilon; \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots \\ &|t^2(x_n) - \alpha - \beta x_n - \gamma x_n^2| \leqslant \varepsilon, \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

где

$$\alpha = \frac{4H^2}{v^2}; \quad \beta = \frac{4H\sin\varphi}{v^2}; \quad \gamma = \frac{1}{v^2}; \tag{4}$$

ε — предельное значение помехи.

Для учета априорной информации в систему (3) можно включить дополнительные ограничения, например,

$$\left.\begin{aligned}\alpha' \leqslant \alpha \leqslant \alpha'';\\ \beta' \leqslant \beta \leqslant \beta'';\\ \gamma' \leqslant \gamma \leqslant \gamma'',\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

где α', α'', β', β'', γ', γ'' — соответственно верхние и нижние пределы искомых коэффициентов, вычисляемые через предельные значения неизвестных H, v и φ по формулам (4).

В тех случаях, когда ожидается значительная корреляция оценок H и v, как это обычно бывает при поисках пологих платформенных структур, дополнительные ограничения (5) целесообразно определять иным путем. Независимая подстановка в формулы (4) предельных значений этих параметров приведет к искусственному расширению диапазона допустимых значений α и β. Поэтому выражение для β перепишем в виде

$$\beta = 4H\gamma \sin\varphi. \tag{6}$$

Теперь верхняя и нижняя границы β определяются одним (неизвестным) значением скорости и соответствующими предельными значениями H и φ. Обычно относительный диапазон допустимых значений для параметра H значительно уже, чем для φ. Это позволяет при определении β' и β'' подставлять в формулу (6) одно значение $\bar{H}$, соответствующее среднему из предельно допустимых или предварительно определенное одним из упрощенных способов.

Таким образом, имеем

$$\left.\begin{aligned}\beta' = 4\bar{H}\gamma \sin\varphi';\\ \beta'' = 4\bar{H}\gamma \sin\varphi'',\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

где φ' и φ'' — минимальное и максимальное допустимые значения φ.

Пределы для α могут быть заданы исходя из допустимых невязок (Δt_0) аппроксимирующего и наблюденного годографов на пункте взрыва. Отсюда

$$\left.\begin{aligned}\alpha' \approx t_0^2 - 2t_0\,\Delta t_0;\\ \alpha'' \approx t_0^2 + 2t_0\,\Delta t_0,\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

здесь значение Δt_0, как правило, не должно превышать величину полупериода видимой записи отраженных волн.

Введем новые переменные

$$\left.\begin{aligned}\tilde{\alpha} = \alpha - \alpha';\\ \tilde{\beta} = \beta - \beta';\\ \tilde{\gamma} = \gamma - \gamma'.\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

Подставив их в неравенства (3) и (5) и объединив все ограничения, получим систему

$$\left.\begin{aligned}&\left|T(x_1) - \tilde{\alpha} - \tilde{\beta}x_1 - \tilde{\gamma}x_1^2\right| \leqslant \varepsilon;\\ &\left|T(x_2) - \tilde{\alpha} - \tilde{\beta}x_2 - \tilde{\gamma}x_2^2\right| \leqslant \varepsilon;\\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\\ &\left|T(x_n) - \tilde{\alpha} - \tilde{\beta}x_n - \tilde{\gamma}x_n^2\right| \leqslant \varepsilon;\\ &0 \leqslant \tilde{\alpha} \leqslant \alpha'' - \alpha';\\ &0 \leqslant \tilde{\beta} \leqslant \beta'' - \beta' = \beta(\varphi)\gamma;\\ &0 \leqslant \tilde{\gamma} \leqslant \gamma'' - \gamma'.\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

Требуется найти значения $\tilde{\alpha}$, $\tilde{\beta}$ и $\tilde{\gamma}$, удовлетворяющие системе неравенств (10) при минимальном значении ε, т. е. решить задачу чебышевского приближения заданной функции $T(x)$, преобразующей исходные наблюдения $t(x)$. Эта задача может быть решена одним из методов линейного программирования [2]. Исходная матрица коэффициентов при этом имеет вид (у последнего столбца множитель единица):

$-\tilde{\alpha}$	$-\tilde{\beta}$	$-\tilde{\gamma}$	$-\varepsilon$	1
-1	$-x_1$	$-x_1^2$	-1	$-T(x_1)$
1	x_1	x_1^2	-1	$T(x_1)$
-1	$-x_2$	$-x_2^2$	-1	$-T(x_2)$
1	x_2	x_2^2	-1	$T(x_2)$
$\ldots$	$\ldots$	$\ldots$	$\ldots$	$\ldots$
-1	$-x_n$	$-x_n^2$	-1	$-T(x_n)$
1	x_n	x_n^2	-1	$T(x_n)$
1	0	0	0	$\alpha'' - \alpha'$
0	1	$-\beta(\varphi)$	0	0
0	0	1	0	$\gamma'' - \gamma'$
0	0	0	-1	0

(11)

В последней строке матрицы (11) записаны коэффициенты целевой функции.

Изложенный выше алгоритм был опробован при интерпретации годографов отраженных волн, зарегистрированных в процессе изучения строения осадочного чехла сейсморазведкой МОВ. В программе, составленной для ЭВМ «Минск-2», был реализован двойственный модифицированный симплекс-метод для определения $\tilde{\alpha}$, $\tilde{\beta}$, $\tilde{\gamma}$ и ε. Одиночные и встречные годографы предварительно были обработаны по методу наименьших квадратов [3]. Значения эффективной скорости изменялись от 1,8 до 2,25 *км/сек* в первом случае и от 2,35 до 2,55 *км/сек* во втором. На сглаженных годографах отмечалось смещение минимума от 45 до 100 *м* относительно пункта взрыва, что должно было соответствовать наклону отражающей границы от 2 до 5°. По данным предшествовавших исследований было достоверно известно, что отражающую границу с высокой степенью точности можно считать плоской и почти горизонтальной (с углом наклона не более 10—15′), а среднюю скорость до отражающей границы можно принять постоянной и равной 2,43 *км/сек* с ошибкой не более 0,02 *км/сек*. Отмеченная тесная корреляция ошибок скорости, величины смещения минимума годографа и условий возбуждения (глубины заложения заряда) указывает на интерференционный характер преобладающей части помех.

При обработке годографов по методу линейного программирования первоначально значения параметров $\tilde{\alpha}$, $\tilde{\beta}$ и $\tilde{\gamma}$ не ограничивались. Результаты практически совпали с предшествующими. При ограничении угла наклона отражающей границы до 20′ были получены значения эффективной скорости в интервале 2,27—2,51 *км/сек*. Таким образом, систематическое расхождение с данными способа встречных годографов практически исчезло. После включения в программу предварительной отбраковки «выскочивших» точек на годографе диапазон разброса еди-

ничных оценок скорости сузился до 2,36—2,49 *км/сек*, чего не удава лось достичь при такой же отбраковке в способе встречных годографов Следовательно, применение изложенного алгоритма позволило н только ликвидировать систематические расхождения результатов обра ботки одиночных и встречных годографов, но и повысить приблизи тельно на 35% точность определения скорости.

Решение задачи линейного программирования с исходной матри цей (11) оказывается достаточно эффективным в тех случаях, когд стрела прогиба годографа (полезный сигнал) заметно превышае амплитуду интерференционных помех. Поэтому при интерпретаци годографов глубоких отражений, соответствующих высоким значения эффективной скорости (4 *км/сек* и более) и небольшим интервала наблюдений (до 500 *м*), в столбец коэффициентов для ε полезно вво дить весовой коэффициент, зависящий от координаты x. Так, для обра ботки годографов волн, отраженных от границы, залегающей на глу бине около 2 *км*, и распространяющихся со средней скоростью 3,9—4 *км/сек*, коэффициенты при ε в матрице (11) были домножень на $[1+A_1 \exp(-A_2|x|)]$, коэффициенты A_1 и A_2 были определены эмпи рически по смещению минимума годографа. Вычисленные значени скорости определились в лучшем диапазоне 3,24—4,6 *км/сек* проти 3,66—5,50 *км/сек* в способе встречных годографов при использовани метода наименьших квадратов.

Очевидно, что можно обеспечить дополнительный выигрыш в точ ности, интерпретируя методом линейного программирования не одиночные, а встречные годографы. Для этого достаточно в систему нера венств (3) ввести дополнительное условие

$$|\overleftarrow{t}^2(x_k) - \alpha - \beta(x_k+l) - \gamma(x_k-l)^2| \leqslant \varepsilon \qquad (k=1, 2, \ldots, n),$$

где l — величина взрывного интервала; $\overleftarrow{t}(x)$ — значения встречного годографа.

Хотя предлагаемая методика интерпретации годографов отраженных волн практически опробована лишь на материалах сейсморазведки МОВ, проводившейся в платформенных условиях, она может быть применена и в других районах. Так, например, несмотря на чрезвычайно сложную сейсмогеологическую обстановку, характерную для Балтийского щита в целом, задача интерпретации годографов отраженных волн, регистрируемых в пределах этой территории, в ряде частных случаев может быть линеаризована. Тогда данные геологических и других геофизических методов могут быть использованы в качестве дополнительных условий для повышения надежности интерпретации материалов сейсморазведки МОВ, как это было показано выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольцман Ф. М., Киселев В. С. Алгоритм оптимальной обработки сейсмических годографов.— Прикладн. геофизика, 1967, вып. 49.

2. Зуховицкий С. И., Авдеева Л. И. Линейное и выпуклое программирование. М., «Наука», 1967.

3. Пузырев Н. Н. Интерпретация данных сейсморазведки методом отраженных волн. М., Гостоптехиздат, 1959.