

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.05.010

基于两阶段优化的初至波自动拾取算法

高磊 梁宇

(西南石油大学计算机科学学院, 成都, 610500)

摘要: 拾取初至波是近地表建模方法中的重要步骤。初至波的精确拾取可以影响到很多方面的工作,例如静校正和速度建模等,但是初至波受到强烈的背景噪声和复杂的近地表结构的影响,拾取的精确性会减低。本文提出了基于两阶段优化的初至波自动拾取算法。本文把初至拾取问题分成了两个子问题,分别产生两个优化目标,根据优化目标,生成优化函数。算法采用两个步骤:(1)先用纵向滑动窗口把初至波可能存在的范围带找出来;(2)改进了能量比率算法,在第 1 步找到的范围带中拾取初至波。在两个数据集上,将 FPTO 算法与反向传播神经网络方法(Backpropagation neural networks method, BNN)、直接相关方法(Direct correlation method, DC)以及 Coppens 的改进方法(Modified Coppens's method, MCM)3 种算法进行了对比,精确度得到了很大提升,算法的稳定性得到证明。

关键词: 初至波拾取;纵向滑动窗口;两阶段优化;能量比率

中图分类号: TP399 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2019)05-0652-08

First-Arrival Automatic Picking Algorithm Based on Two-Stage Optimization

GAO Lei, LIANG Yu

(School of Computer Science, Southwest Petroleum University, Chengdu, 610500, China)

Abstract: Picking the first arrivals is an important step in the near-surface modeling method. The precise picking of the first arrivals can affect many aspects of the work, such as static correction and velocity modeling, etc. However, the first arrivals are affected by strong background noise and complex near-surface structure, which lead to the reducing accuracy. This paper proposes the first-arrival automatic picking algorithm based on two-stage optimization (FPTO). First-arrival automatic picking algorithm based on two-stage optimization divides the picking question into two sub-questions. According to these two sub-questions, two optimization targets are generated respectively. Next, two optimization functions are generated by these two optimization targets. First-arrival automatic picking algorithm based on two-stage optimization takes two steps: the first step is to use the vertical sliding window to find out the possible range of the first arrivals; the second step improves the energy ratio algorithm and picks up the first arrivals in the range found in the first step. Compared with three algorithms (Backpropagation neural networks method, BNN; Direct correlation method, DC; Modified Coppens's method, MCM) on the two data sets, experimental results show that the accuracy and the stability of the FPTO algorithm are greatly improved.

Key words: first-arrival picking; vertical sliding windows; two-stage optimization; energy ratio

地震折射数据分析是近地表建模当中的主要方法之一^[1],该方法的关键步骤是初至波的自动拾

取,它影响许多步骤的有效性,例如静校正等^[2-3]。对初至波的错误识别可能会对震源产生重大影

基金项目: 国家自然科学基金(41604114)资助项目;四川省科技厅应用基础研究基金(2019YJ0314)资助项目。

收稿日期: 2019-03-31; **修订日期:** 2019-07-10

通信作者: 高磊,女,副教授, E-mail: largeleier@163.com。

引用格式: 高磊,梁宇. 基于两阶段优化的初至波自动拾取算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(5): 652-659.
GAO Lei, LIANG Yu. First-arrival Automatic Picking Algorithm Based on Two-Stage Optimization[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(5): 652-659.

响^[4]。然而,原始地震数据总是被强烈的背景噪声和复杂的近地表结构所影响^[5],所以迫切需要一种精确拾取初至波的方法。

地震折射数据分析的历史可以追溯到20世纪20年代^[3]。地震折射数据分析任务包括反褶积、静校正、动校正、速度分析和迁移等^[3]。拾取初至波是这些任务的重要预处理阶段。最初的初至波拾取方法是手动拾取,完全依赖于专家,因此耗时且偶尔不准确^[6]。这种策略会导致偏见和不一致的选择。后来发展为人机交互,专家先拾取一些初至波,然后人机交互软件将自动拾取余下的初至波^[7]。在此过程中,专家可以进行干预。这种策略更有效率。然而,整个过程仍然是非常耗时和主观的。再后来发展为自动化策略,旨在提供更高效、更智能的解决方案^[6]。它需要开发先进的机器学习和数据挖掘算法,可以自动拾取出初至,专家可以检查结果并在必要时予以纠正。当然,如果算法运行良好,可以减少人工干预。

目前,有许多众所周知的地震数据处理系统,例如Promax,CGG,Focus和Grisys。它们都包含了初至波自动拾取的关键步骤。受数据质量和参数设置的影响,每个软件的结果都有很大差异。因此,需要一种更准确、有效和稳定的算法来解决这个问题。很多学者对初至波自动拾取方法进行了研究。Coppens方法使用两个窗口内的能量比处理数据^[8]。Al-Ghamdi通过使用自适应阈值改进了这种方法^[9]。多窗口算法使用3个移动窗口。此外,它使用每个窗口中的绝对振幅的平均值来区分信号与噪声。Sabbione和Velis改进了Coppens方法,以熵和分形维数方法来选择初至波^[6]。Molyneux提出直接相关法^[10],使用最大互相关值作为标准,但在具有低信噪比的数据集中效果不好。McCormack将反向传播神经网络方法^[11]应用于初至波的自动拾取中。Zhu等提出了一种基于模糊c-均值的新算法来处理低信噪比数据^[12]。它根据信号和噪声之间的不同相似性水平将微震数据分成两个簇。因此信号簇的初始时间被视为初至波到达时间。此外,还有些其他的方案,如数字图像分割^[7],STA/LTA方法^[13],Akaike信息准则^[14],基于分形的算法^[15]和TDEE^[16]。然而,现有算法的检测准确率仍然不能令人满意。

1 问题描述

本节将构建数据模型,并定义初至拾取问题。

1.1 数据模型

共炮点道集是地球物理勘探领域的基本概

念。它是记录同一炮点激发的,由不同检波器接收的所有地震道的数据集合,且各地震道按照炮点到检波器的距离进行排列^[17]。地震道是由一系列等间隔采样的地震数据(样点)所组成的一组时间序列信号,用一维向量来表示^[18]。本文采用共炮点道集作为数据集,进行初至波拾取。

定义1 共炮点道集。将共炮点道集表示为一个大小为 $m \times n$ 的矩阵 $S = [s_{i,j}]$,其中 n 是地震道的数量, m 是每道的样点数量, $s_{i,j}$ 是第 j 道的第 i 个样点能量值。

图1(a)中显示了共炮点道集。它由800个地震道组成,其中每道含有1000个样点。图中样点的振幅由样点的能量值表示。每道的振幅纵向排列,其中振幅为正的部分填充为黑色。因不同的地震检波器具有不同的电气特性,为了避免不同检波器之间的差异造成影响,需要预先对数据进行预处理,将每道的能量值归一化到 $[-1,1]$ 范围^[19]。

1.2 初至波拾取

在地震勘探中,从炮点激发并最先到达检波点的地震波称为初至波。初至波到达时间称为地震波初至时间,简称地震波初至。初至拾取是通过振幅、频率等特征,对地震信号和环境噪声进行区分^[20],将初至波从地震数据中提取出来的过程。初至波的准确拾取是地震勘探中的一个基础问题^[21]。

问题1 初至波拾取问题

输入:共炮点道集 $S = [s_{i,j}]$;

输出: $F = [f(1), f(2), \dots, f(n)]$ 。

目标:最大化初至波拾取准确率。

式中:输入为大小为 $m \times n$ 的共炮点道集 S , $s_{i,j}$ 是第 j 道的第 i 个样点能量值;输出为初至波位置数组 F , $f(j)$ 为第 j 道的初至波位置。

图1(a)中显示了初至波拾取过程的输入,输出如图1(b)中所示。每道都有一个初至波,是每道的初至波位置。

2 基于两阶段优化的初至波自动拾取算法

本算法采取两阶段方案对初至波进行拾取。第一阶段是数据的预处理过程,它是通过基于模板的范围带检测算法获得初至范围带。此阶段极大压缩了数据集的大小,减少了噪声。第2阶段是初至波的拾取过程,它是在第1阶段获得的初至范围带上,通过改进的能量比率初至拾取算法拾取初至波。

2.1 基于模板的范围带检测算法

基于模板的范围带检测算法在每道数据上用

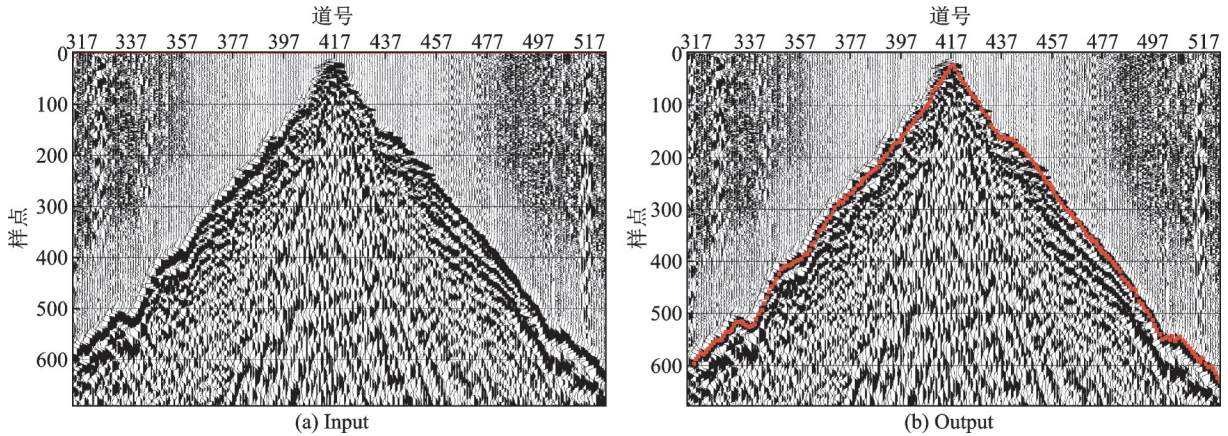


图1 共炮点道集和初至波

Fig. 1 Common shot gather and first arrivals

纵向窗口进行滑动,与模板(一维数组)进行相关性计算,获得初至范围带(纵向滑动窗口与模板的长度一致)。初至范围带是由每个地震道上包含初至波的区间组成。

2.1.1 子问题定义

对基于模板的范围带检测子问题进行定义,提出该子问题的目标。

子问题1 基于模板的范围带检测

输入:共炮点道集 $S = [s_{i,j}]$,模板数组 T ;

输出:范围带起始下标数组 D ,范围带矩阵 $R = [s_{i,j}]$ 。

目标:最大化初至范围带内包含的初至波数量。

其中:输入是 $m \times n$ 的共炮点道集 S 和长度为 l 的模板数组 T ,且 $l < m$ 。输出包含两部分:(1)大小为 n 的范围带起始下标数组 D ;(2)大小为 $l \times n$ 范围带矩阵 R 。

2.1.2 子问题分析

基于模板的范围带检测问题的目标是最大化初至范围带内包含的初至波数量。本文构造了初至区间模板,将纵向滑动窗口与模板的相关性作为评价标准,相关性越大的窗口越可能包含初至波。

根据基于模板的范围带检测子问题,结合初至波的特性,得到3个优化目标:(1)最小化窗口和模板之间的距离。因为在初至波到来之前,检波器接收到的能量极小,而在地震初至波到来之后,能量通常会变得较大^[22]。为此设计了一个地震初至区间模板,该模板分为两部分,前半部分设置为极小的数值,后半部分设置为较大的数值。令一个与模板等长的窗口在每道数据上纵向滑动,寻找与模板距离最小的窗口位置。(2)最小化窗口与相邻初至区间的位置差距。原因是相邻初至波的位置差距通常较小。(3)最小化窗口位置。因为初至波是由炮点激发的检波器最先记录的地震波,窗口位置越

靠前,时间就越早,初至波就越可能包含在该窗口中。

在该问题中,上述3个优化目标不是独立的,任何一个目标独立考虑都可能导致窗口对于该特性过拟合。所以本文将基于模板的范围带检测子问题转化成多目标优化问题,寻找到一个折中解,使这3个目标在给定的约束条件下尽可能达到最佳。因此,其相关性的确定由该位置的窗口与模板的差距、窗口本身位置和窗口与相邻初至区间的位置差距共同决定。令窗口大小为 l ,第 j 道数据的当前窗口的起始位置下标为 d_j ,第 j 道数据的相邻道初至区间平均起始位置下标为 d'_j ,模板数组为 T ,提出了如下优化目标函数

$$\min_{d_j} r(l, d_j, d'_j, T) = a \sum_{i=1}^l (s_{d_j+i, j} - T_i)^2 + b \sqrt{(d_j - d'_j)^2} + cd_j \quad (1)$$

式中: a, b 和 c 均为加权调节因子。式(1)的第1部分表示当前窗口与模板之间的距离评价,第2部分表示当前窗口与相邻的初至区间的位置差距评价,第3部分表示当前窗口的位置评价。

2.1.3 算法描述

根据优化目标函数,确定每道数据的初至区间,该算法具体实现如下。

算法1 基于模板的范围带检测算法

输入:第 j 道数据 $s_{\cdot, j} = [s_{1, j}, s_{2, j}, \dots, s_{m, j}]$,第 j 道数据的相邻道初至区间平均起始位置下标 d'_j ,模板数组 T ,模板大小 l ,调整因子 a, b 和 c 。

输出:该道初至区间起始下标 d_j 。

① $r^* = +\infty$; //初始化目标函数最小值

② for ($i = 1$ to $m - l$) do

③ $w = \sum_i^{i+l} (s_{i, j} - T_i)^2$; //计算窗口与模板

距离

④ $r = a \times w + b \times \sqrt{(d_j - d'_j)^2} + c \times i;$ // 式(1)
 ⑤ if ($r < r^*$) do
 ⑥ $r^* = r;$ //更新 r^*
 ⑦ $d_j = i;$ //更新起始下标 d_j
 ⑧ end if
 ⑨ end for
 ⑩ return d_j

算法 1 描述了基于模板的范围带检测算法在单道数据上的实现过程。该算法的输入为子问题 1 中共炮点道集 S 的某一道数据和 d'_j , 输出为这道数据的初至波位置。其中 d'_j 为该道数据相邻道初至区间平均起始位置下标, 可通过本算法在相应道上执行获得, 调整因子 a, b 和 c 对应于优化目标函数中的加权调节因子。①行初始化优化目标函数的最小值 r^* 。②~⑨行表示窗口在单道数据上滑动比较相关性的全过程。③行计算该窗口与模板的距离 w 。④行根据式(1)计算当前窗口的目标函数值。⑤~⑨行确定是否已达到更新条件。如果已经达到条件, ⑥行更新目标函数值的最小值 r^* , ⑦更新起始下标 d_j 。⑩行返回该道的初至区间的起始下标 d_j 。

经过上述步骤, 范围带检测过程已全部完成, 每道地震数据的初至区间的起始下标得以确定。通过范围带起始下标数组 $D = [d_1, d_2, \dots, d_n]$ 和窗口大小 l , 在 $m \times n$ 的原数据矩阵 S 上获得 $l \times n$ 的范围带矩阵 $R = [s_{i,j}]$ 。该过程输出的范围带矩阵 R 包含所有道的初至波, 并将作为下一阶段算法的输入。

2.2 改进的能量比率初至拾取算法

对能量比率算法进行改进, 在初至范围带中, 利用改进的能量比率算法拾取初至波。

2.2.1 子问题定义

对改进的能量比率初至拾取子问题进行定义, 并提出该问题的目标。

子问题 2 改进的能量比率初至拾取

输入: 范围带矩阵 $R = [s_{i,j}]$ 、范围带起始下标数组 $D = [d_1, d_2, \dots, d_n]$;

输出: $F = [f(1), f(2), \dots, f(n)]$ 。

目标: 最大化能量比率求取初至波位置。

范围带矩阵 R 为子问题 1 的输出。本问题的输出 F 为每道数据的初至波位置。其中, $f(j)$ 是第 j 道的初至波位置。

2.2.2 子问题分析

式(2—4)是由 Coppens^[8]提出的方法, 令 $p =$

$t - ns + 1, q = t - nl + 1$, 有

$$E_1(t) = \sum_{i=p}^t s_{i,j}^2 \tag{2}$$

$$E_2(t) = \sum_{i=q}^t s_{i,j}^2 \tag{3}$$

$$f(j) = \arg \max_p \frac{E_1(t)}{E_2(t)} \tag{4}$$

式中: $i \in [1, m]$ 为样点下标, $j \in [1, n]$ 为地震道下标, $t \in [nl, m]$ 为滑动窗口位置。 $E_1(t)$ 是短窗口中样点的能量平方和, $E_2(t)$ 是长窗口中样点的能量平方和。 ns, nl 分别指代短窗口和长窗口的大小, 并且 $ns < nl$ 。 $f(j)$ 是第 j 道拾取的初至波位置。通过式(4)中, 短窗口比长窗口的比值来定位初至波。由于波形的不确定性以及背景噪声的干扰, 初至波定位的精确度较低。

Sabbione 和 Velis^[6]在式(4)中引入了一个常系数 β 来提高结果的精确度, 有

$$f(j) = \arg \max_p \frac{E_1(t)}{E_2(t) + \beta} \tag{5}$$

引入常数 β 后, 可对比值进行适当调整。但是在背景噪声较强的情况下, β 的调整作用依然有限。

Allen 提出了 STA/LTA^[13]方法, 如式(6—8)所示

$$STA = \frac{1}{ns} \sum_{i=p}^t s_{i,j}^2 \tag{6}$$

$$LTA = \frac{1}{nl} \sum_{i=q}^t s_{i,j}^2 \tag{7}$$

$$f(j) = \arg \max_p \frac{STA}{LTA} \tag{8}$$

Wong 等^[23]对 STA/LTA 方法进行了修改

$$er = \frac{\sum_{i=p}^t s_{i,j}^2}{\sum_{i=q}^t s_{i,j}^2} \tag{9}$$

$$f(j) = \arg \max_p (\text{abs}(s_{i,j}) * er)^3 \tag{10}$$

本文结合了 Sabbione, Velis 和 Wong 的方法, 有

$$E_1(t) = \frac{1}{ns} \sum_{i=p}^t s_{i,j}^2 \tag{11}$$

$$E_2(t) = \frac{1}{nl} \sum_{i=q}^t s_{i,j}^2 \tag{12}$$

$$\lambda(t) = \frac{E_1(t)}{E_2(t) + \beta} \tag{13}$$

$$M\lambda(t) = |s_{i,j} * \lambda(t)|^\alpha \tag{14}$$

本算法在式(13)的基础上, 增加式(14)。经过

这两个步骤,算法对初至波能量更加敏感,进一步提高初至波拾取的精确度。在实验中,参数 $\alpha=3$ 时效果最好利用式(14)推导出子问题2的优化目标

$$f = \arg \max_p \left| s_{i,j} * \lambda(t) \right|^\alpha \quad (15)$$

利用式(15)求得 $M\lambda(t)$ 最大值时, p 即为初至波位置。

2.2.3 算法描述

改进的能量比率初至拾取算法的核心是式(11—15),利用范围带矩阵 R 求出每个地震道的初至波位置。

算法2 改进的能量比率初至拾取算法

输入:初至范围带高度 l 、范围带矩阵 R 、范围带起始下标数组 D 、长窗口大小 nl 、短窗口大小 ns 、参数 β ;

输出: $F = [f(1), f(2), \dots, f(n)]$ 。

① for ($j = 1$ to n) do

② for ($i = nl$ to l) do

③ $E_{1,j}(i) = \frac{1}{ns} \sum_{k=i-ns+1}^i R_{k,j}^2$; //式(11)

④ $E_{2,j}(i) = \frac{1}{nl} \sum_{k=i-nl+1}^i R_{k,j}^2$; //式(12)

⑤ $\lambda_j(i) = \frac{E_{1,j}(i)}{E_{2,j}(i) + \beta}$; //式(13)

⑥ $M\lambda_j(i) = \left| s_{i,j} * \lambda_j(i) \right|^\alpha$; //式(14)

⑦ end for

⑧ $F_j = \arg \max (M\lambda_j) + D_j$

⑨ end for

⑩ return F

算法2描述了能量比率初至拾取算法的步骤。

①~②行分别定义了循环范围,③~⑥行按照公式进行计算。⑧行计算每个地震道能量比率最大值元素的下标,即初至波的位置。⑩行返回所有地震道中初至波所在的样点下标。

3 实验与结果

在本节中,将本文的算法与3种算法(BNN, DC, MCM),分别在两个数据集上进行测试。其中BNN是反向传播神经网络方法,DC是直接相关方法,MCM是Coppens方法的改进。将人工拾取初至波的结果作为参考标准,把4种算法的拾取结果与参考标准进行比较,来验证算法的有效性。

3.1 数据集

图2(a)显示数据集1,它来源于新疆地区,共200炮,每炮有400道数据,样点之间的时间间隔为2 ms。本文选取其中100道数据,每道数据截取850个样点,作为展示结果。图2(b)显示数据集2,它来源于四川地区,共100炮,每炮有500道数据,样点之间的时间间隔为2 ms。本文选取其中64道数据,每道数据截取850个样点作为展示结果。

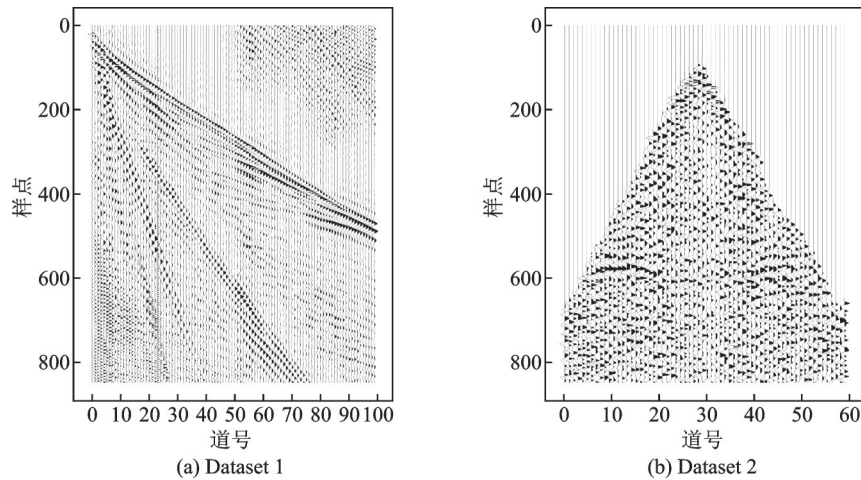


图2 地震数据

Fig. 2 Seismic data

3.2 实验结果描述

基于两阶段优化的初至波自动拾取算法中,初至波拾取过程分为两个阶段。第1阶段通过基于模板的范围带检测算法获得初至范围带,第2阶段改进了能量比率初至拾取算法,在初至范围带中拾取初至波。

3.2.1 基于模板的范围带检测算法

基于模板的范围带检测算法是基于两阶段优化的初至波自动拾取算法的第1阶段。此算法分别在两个数据集上进行测试,获得初至范围带。结果如图3所示。区域部分表示在两个数据集上获得的初至范围带。图3(a)中的初至范围带将框内

的噪声排除在外,并包含了所有的初至波。图 3(b) 中的初至范围带也包含了所有的初至波。

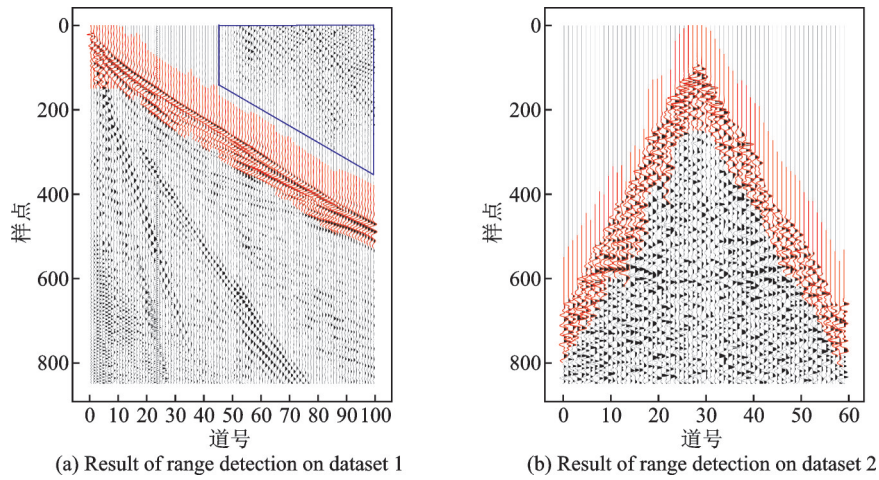


图 3 初至范围带结果

Fig. 3 First-arrival range results

3.2.2 改进的能量比率初至拾取算法

改进的能量比率初至拾取算法是基于两阶段优化的初至波自动拾取算法的第 2 阶段。在第 1

阶段确定的初至范围带中拾取初至波,结果如图 4 所示。从图 4 来看,拾取的结果与实际初至波比较符合,拾取的准确率基本满足要求。

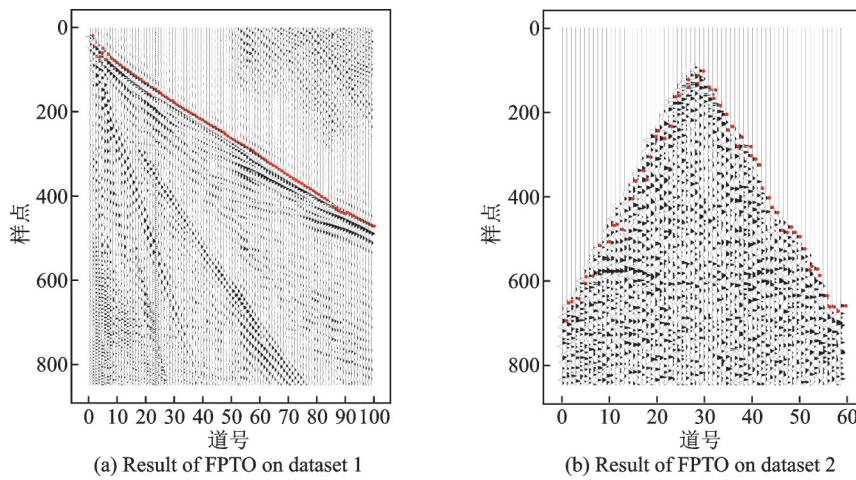


图 4 初至波的拾取结果

Fig. 4 First-arrival picking results

3.3 与其他 3 种算法的实验结果

使用本文的算法(FPTO)与其他 3 种算法

(BNN,DC,MCM)进行对比试验,分别在两个数据集中进行测试。实验结果如图 5 所示。图 5(a)表示

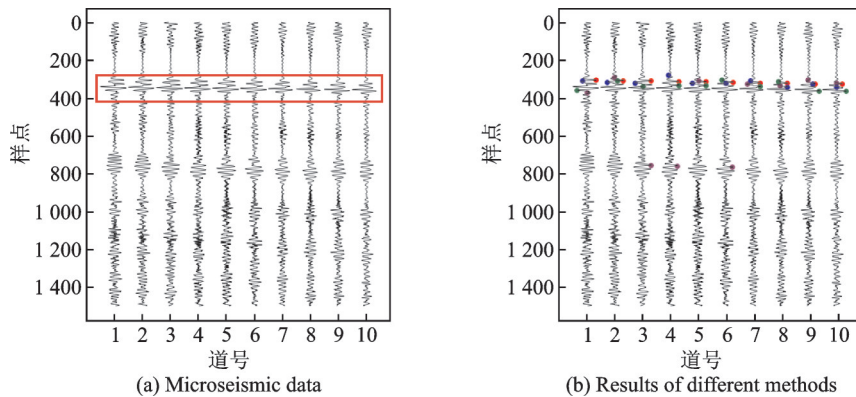


图 5 4 种算法(BNN,DC,MCM,FPTO)的结果

Fig. 5 Results of four algorithms (BNN,DC,MCM and FPTO)

地震波的波形,红色方框内表示初至波出现的位置。图5(b)表示不同方法拾取的初至波位置:其中紫色圆点表示MCM算法拾取的初至波;蓝色圆点表示DC算法拾取的初至波;绿色圆点表示BNN算法拾取的初至波;本文提出的算法用红色圆点表示。从图5(b)来看,本文提出的基于两阶段优化的初至波自动拾取算法能更加准确拾取初至波,总体上呈现出更加一致的连续性。将算法拾取结果与人工拾取结果之间偏差小于20 ms的结果,视为正确拾取。基于两阶段优化的初至波自动拾取算法与其他3种方法的准确率对比见表1。实验结果表明,相较于其他3种算法,本文提出的算法能够更加准确地找到初至波的位置。在两个数据集中,基于两阶段优化的初至波自动拾取算法拾取初至波的效果最好。

表1 4种算法拾取(BNN, DC, MCM, FPTO)与人工拾取结果差值小于20 ms内的统计

Tab. 1 Accuracy among the manual picking and four algorithm(BNN, DC, MCM, FPTO)within 20 ms

Data sources	manual-BNN < 20 ms	manual-DC < 20 ms	manual-MCM < 20 ms	manual-FPTO < 20 ms
Dataset 1	33%	81%	91%	93%
Dataset 2	15.6	12.5	62.5	64

4 结 论

本文提出了一种基于两阶段优化的初至波自动拾取算法。本算法不直接拾取初至,而是先把初至波所在的范围带找出来,然后再在初至范围带里拾取初至波。范围带通过纵向滑动窗口进行确定:根据3个优化目标得到优化函数,对每一道数据进行纵向窗口的滑动,与设计的模板进行相关性计算,继而得到每一道的范围带。范围带被确定以后,再利用改进的能量比率算法在范围带内进行初至波拾取。这样做的好处是:(1)拾取初至波只需要考虑范围带里的数据,数据量大大减少;(2)范围带会把很多噪音排除,减少噪音的影响;(3)范围带里包含初至波,在范围带里进行拾取能提高精确度。

通过在两个数据集上进行实验,本算法与其他3种算法进行对比,发现本文提出的算法可以有效地拾取初至,精确度有所提升。

参考文献:

- [1] WAHEED U B, FLAGG G, YARMAN C E. First-arrival traveltimes tomography for anisotropic media using the adjoint-state method[J]. *Geophysics*, 2016, 81(4): R147-R155.
- [2] KAHRIZI A, HASHEMI H. Neuron curve as a tool for performance evaluation of MLP and RBF architecture in first break picking of seismic data[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2014, 108: 159-166.
- [3] YILMAZ Ö. Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data[M]. USA: Society of Exploration Geophysicists, 2001.
- [4] LI Yue, WANG Yue, LIN Hongbo, et al. First arrival time picking for microseismic data based on DSW algorithm[J]. *Journal of Seismology*, 2018, 22(4): 833-840.
- [5] AN Shengpei, HU Tianyue, PENG Gengxin. Three-dimensional cumulant-based coherent integration method to enhance first-break seismic signals[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(4): 2089-2096.
- [6] SABBIONE J I, VELIS D. Automatic first-breaks picking: New strategies and algorithms[J]. *Geophysics*, 2010, 75(4): V67-V76.
- [7] MOUSA W A, AL-SHUHAIL A A, AL-LEHYANI A. A new technique for first-arrival picking of refracted seismic data based on digital image segmentation[J]. *Geophysics*, 2011, 76(5): V79-V89.
- [8] COPPENS F. First arrival picking on common-offset trace collections for automatic estimation of static Corrections[J]. *Geophysical Prospecting*, 1985, 33(8): 1212-1231.
- [9] AL-GHAMDI A S. Automatic first arrival picking using energy ratios[M]. USA: ProQuest, 2007.
- [10] MOLYNEUX J B, SCHMITT D R. First-break timing: Arrival onset times by direct correlation[J]. *Geophysics*, 1999, 64(5): 1492-1501.
- [11] MCCORMACK M D, ZAUCHA D E, DUSHEK D W. First-break refraction event picking and seismic data trace editing using neural networks[J]. *Geophysics*, 1993, 58(1): 67-78.
- [12] ZHU Dan, LI Yue, ZHANG Chao. Automatic time picking for microseismic data based on a fuzzy C-means clustering algorithm[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(12): 1900-1904.
- [13] ALLEN R V. Automatic earthquake recognition and timing from single traces[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1978, 68(5): 1521-1532.
- [14] TAKANAMI T, KITAGAWA G. Estimation of the arrival times of seismic waves by multivariate time series model[J]. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 1991, 43(3): 407-433.
- [15] BOSCHETTI F, DENTITH M D, LIST R D. A fractal-based algorithm for detecting first arrivals on seismic traces[J]. *Geophysics*, 1996, 61(4): 1095-1102.

- [16] LAN Haiqiang, ZHANG Zhongjie. A high-order fast-sweeping scheme for calculating first-arrival travel times with an irregular surface [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103 (3) : 2070-2082.
- [17] GADALLAH M R. 石油科技知识系列读本:储层地震学[M]. 刘怀山,译. 北京:石油工业出版社, 2009. GADALLAH M R. Reservoir seismology: Geophysics in nontechnical language[M]. LIU Huaishan, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [18] 李丕龙,宋玉龙,王新红,等. 滩浅海地区高精度地震勘探技术[M]. 北京:石油工业出版社, 2006. LI Pilong, SONG Yulong, WANG Xinhong, et al. High-precision seismic exploration technology in shallow sea areas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [19] GAO Lei, JIANG Zhenyun, MIN Fan. First-arrival travel times picking through sliding windows and fuzzy C-means[J]. Mathematics, 2019, 7(3): 221.
- [20] 谭玉阳,于静,冯刚,等. 微地震事件初至拾取 SLPEA 算法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(1): 185-196. TAN Yuyang, YU Jing, FENG Gang, et al. Arrival picking of microseismic events using the SLPEA algorithm [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59 (1): 185-196.
- [21] 顾汉明,周鸿秋,张学强. 初至时间的自动拾取[J]. 物探与化探, 1992, 16(2): 120-129. GU Hanming, ZHOU Hongqiu, ZHANG Xueqiang. Automatic pick of first arrival time [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1992, 16(2): 120-129.
- [22] 张元鹏,梁晨,吴文佳. 基于 QT 的能量比法地震波初至拾取系统设计[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45 (1): 156-159. ZHANG Yuanpeng, LIANG Chen, Wu Wenjia. Energy ratio method seismic wave first break picking-up system designing based on QT developing platform [J]. Oil geophysical prospecting, 2010, 45 (1) : 156-159.
- [23] WONG J, HAN Lejia, BANCROFT J, et al. Automatic time-picking of first arrivals on noisy microseismic data[J]. Canadian Society of Exploration Geophysics, 2009, 1(1/2): 1-4.

(编辑:刘彦东)