

相空间地震波初至时刻拾取

姜少之, 张志禹

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安, 710048)

摘要:提出了一种新的地震波初至时刻拾取的方法,即将原始时间序列信号映射到相空间当中,通过其相空间图的特征进行初至时刻的拾取。相对于非常耗时的传统方法,本方法使得运算速度提高,结果更加精确稳定。

关键词:相空间; 初至拾取; 映射

中图分类号:P315.3; **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0844(2006)01-0011-04

A New Algorithm for Picking Up the Seismic First Arrival Time by Using the Phase Space Method

JIANG Shao-zhi, ZHANG Zhi-yu

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A new method is proposed for picking up the seismic first arrival time in this paper. The method, which makes the original time serial mapping in the phase space, picks up the seismic first arrival time according to its character of the phase space. Contrast with traditional methods which spends long time for picking up the first arrivals, the new method improves the calculation speed and strengthens the stability of result.

Key words: Phase space; Picking up the first arrivals; Mapping

0 引言

在地震资料处理中地震波的初至拾取是非常重要的,这是地表低速带校正的基础,特别是在地表速度较为复杂的地区,这种静校正更为重要也更为复杂。地震记录的初至波拾取工作非常复杂,因此找到一个既快速又准确的拾取方法,不仅对提高效率,而且对提高静校正的精度,都是非常重要的^[1]。

人们一般采用的地震初至波自动拾取技术就是要确定地震道上纯噪声信号和噪声与地震叠加信号之间的分界时刻,通常都是根据地震信号的振幅、频率和相位等的变化来确定这一时刻。到目前为止,已经提出了许多具体的方法^[1],如相关法、最大振幅法、能量比值法及分形维方法等。

相关法受初至的“续至”影响较大,并且与“子波”的选择关系十分密切,同时要求选择合适的时

窗范围。这些在实际工程中都有一定的难度。能量比值法^[2]使用周期内的信号能量与总时窗能量的比值,对初至比较敏感,对“续至”波衰减比较快,所以将比值的最大值点作为初至的近似值并作适当的时移,即为初至时刻。由于该法的抗干扰能力还不够好,对于初至波形发生明显变化的地区拾取的初至时刻不够准确。时间域分形维方法拾取初至^[3]的过程必须插值,且结果强烈的依靠插值的准确性。对时窗和步长的选取十分敏感,稍有不慎就会严重的影响其结果。

地震波信号是一个一维的时间序列,由于该序列仅仅表明了时间和幅度之间的关系,且有噪声信号的干扰,对直接进行地震波初至的拾取造成了相当大的困难。因此,本文将对一维的地震波时间序列进行相空间映射,在相空间中来分析该信号。

收稿日期:2005-09-05

基金项目:陕西省教育厅科研计划项目(04JK251);西安理工大学科技创新与特色研究项目(210302);国家自然科学基金(40174032)。

作者简介:姜少之(1979-),男(汉族),陕西咸阳人,研究方向为数字信号处理,现主要从事地震波三维CT成像的研究。

1 相空间映射及分维数计算

相空间是状态矢量在状态空间运动产生的,是最常用的非线性动力系统模型。Takens 提出了用混沌系统的物理观察量去获得动力系统几何信息的思想,并从理论上证明,在某种程度上用系统的一个观察量可以重构出原动力系统模型,而且与用来重构的信号成分无关。

Takens 的嵌入定理^[4]叙述如下:设 M 是 u 维紧流体,对于变化对 (X, y) , X 是一个光滑的 (C^2) 矢量场, y 是 M 上的光滑函数,则 $\phi_{X,y}: M \rightarrow R^{2n+1}$ 是一个嵌入,这里

$$\phi_{X,y}(x) = (y(x), y(\phi_1(x)), \dots, y(\phi_{2n}(x))),$$

而 ϕ_i 是 x 的一个流。

时间序列进行相空间映射的理论基础就是 Takens 嵌入定理,对于时间序列 $\{X_i\}_{i=1}^N$, 可以生成一个 d 维位移向量族:

$$Y_1 = \{X_1, X_{1+\tau}, X_{1+2\tau}, \dots, X_{1+(d-1)\tau}\}^T$$
$$Y_2 = \{X_{1+p}, X_{1+p+\tau}, X_{1+p+2\tau}, \dots, X_{1+p+(d-1)\tau}\}^T$$

... ..

$$Y_{M+1} = \{X_{1+Mp}, X_{1+Mp+\tau}, X_{1+Mp+2\tau}, \dots, X_{1+Mp+(d-1)\tau}\}^T$$

其中 p 为相邻位移向量之间的延迟时间; τ 是唯一一向量相邻分量的延迟时间; M 是唯一向量的总数目; d 为嵌入空间的维数,满足 Takens 不等式: $d \geq 2n + 1$; n 为描述原始信号对应的动力学系统所需要微分方程的数目,即自由度^[5]。

把原始地震波时间序列映射到该相空间中,纯噪声部分映射到范围非常小的区域中,映射点均匀地比较密集地分布在以原点为中心的一个邻域内。而噪声信号与实际信号相叠加的部分的映射特征是范围广,具有线状特征。

Hausdorff 分形维的基本过程是用边长为 ϵ , 分形维数等于分形体拓扑分形维的超立方体对分形体进行覆盖(覆盖单元可有多种,这里统一称为超立方体),其计算公式为

$$D_H = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln \frac{1}{\epsilon}}$$

其中 $N(\epsilon)$ 为分形体拓扑覆盖边长 ϵ 的超立方体数。

2 相空间初至拾取

本文使用了一组真实的地震波数据,共 170 个采样点。如图 1 所示。

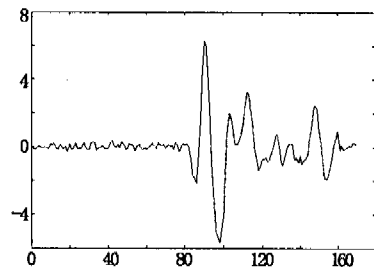


图 1 原始数据图

Fig. 1 Diagram of original data.

上述的一维时间序列可表示为 $\{X_i\}_{i=0}^N$, 将其映射到一个二维的相空间中。映射的规则为 $Y_n = (X_n, X_{n+\tau})$, 此时将 $X_n, X_{n+\tau}$ 取为原序列中的相邻两个点,那么在此二维相空间中上式可变为 $Y_n = (X_n, X_{n+1})$, 其图形如图 2 所示。

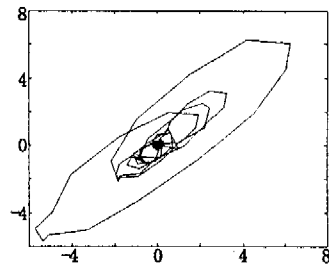


图 2 原始数据相空间映射图一

Fig. 2 No. 1 diagram of original data mapping in the phrase.

而地震波的初至时刻就是要确定地震道上纯噪声信号和噪声与地震叠加信号之间的分界时刻,既然原始的地震波信号在相空间中能够分离成纯噪声信号和噪声与地震叠加信号,那么地震波的初至时刻也就转化成为相空间中从噪声区跳出的点所代表的时刻。下面我们给出在该相空间中进行初至拾取的三个判断准则。

2.1 从信号在相空间的几何形状判断

从图 2 能够看出,原始的时间序列被分成了两部分,一部分是中间比较密集的部分,另外一部分为稀疏的部分,且呈线状特征,分布在直线 $Y = X$ 的周围。

首先我们来分析产生这种现象的原因。中间的比较密集部分全由噪声信号组成。由于噪声信号的振幅比较小且没有规律,所以在相空间中投影的每一个点到坐标原点的距离都比较小,随机地分布在原点附近的邻域内。稀疏的部分则完全是由噪声与地震叠加信号所组成。信号的振幅比噪声的振幅要大的多,相邻采样点幅值是连续的,所以它的相空间投影也是有规律的,呈线状,离原点较远。因此我们就在相空间内实现了原始时间序列中噪声信号和实

际信号的分离。在分离的同时,原始时间序列中除初至点外相邻的两个点幅度差别不大,所以在相空间中所形成的新点的坐标 (X_n, X_{n+1}) ,就在直线 $Y=X$ 周围。

2.2 阈值判断

投影到相空间中的原始时间序列,其信号与噪声相叠加的部分振幅比较大。根据投影的规则 $Y_n = (X_n, X_{n+1})$,存在一个序号为 i 的采样点, i 之前且包括 i 的采样点 (X_0, X_1, \dots, X_i) 全为噪声,而 X_{i+1} 为信号与噪声相叠加的第一个样点,其所处的时刻为初至点。由于 X_{i+2} 幅值比噪声信号的幅值要大,所以相空间中的点 $Y_{i+1} = (X_{i+1}, X_{i+2})$ 到原点的距离 $l = \sqrt{X_{i+1}^2 + X_{i+2}^2}$ 要比噪声部分大,所以当 $i+2$ 时,点 $Y_{i+1} = (X_{i+1}, X_{i+2})$ 就会跳出噪声区(如图3所示)。

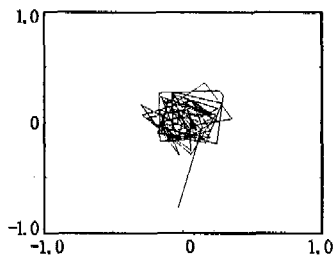


图3 原始数据相空间映射图二

Fig.3 No.2 diagram of original data mapping in the phrase.

从图1可以看出,该地震波数据第81个样点时刻为初至时刻。图3中由第1到第81个点形成的相空间图都是由噪音信号所构成的,第82个点由密集区跳出。所以加一个阈值判断就能拾取到第82个点,然后再向前推一个点,就能够找到第81个点。

阈值的确定是通过计算相空间中的分维数大小来判断映射点在相空间的密集程度,其具体方法为:在相空间中以原点为中心,以一个初始长度为边长做正方形,利用网格法计算该区域内的Hausdorff分维数。当边长较小时该正方形的区域内映射点密集地随机分布在该区域内,代表的是纯噪声部分,在相空间中它的分维数几乎为2。增加边长的长度然后再计算扩大部分的分维数,如果还是几乎为2,就继续扩大边长。当其扩大部分的分维数忽然变小时,就以此时边长的一半为本道地震波信号在相空间中的阈值。

当然,噪音信号中也可能有一个值非常的大,直接就跳出了密集区,从而造成了错误的初至拾取。所以阈值判断只能作为初至拾取的一个条件。下面图4中我们可以找到另外一个条件。

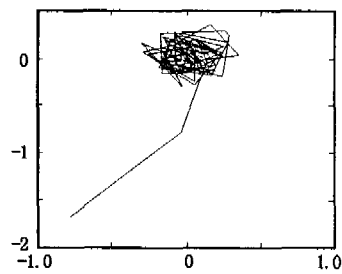


图4 原始数据相空间映射图三

Fig.4 No.3 diagram of original data mapping in the phrase.

2.3 相空间中向量夹角判断

在相空间中,我们可以将相邻两点之间的连线看作为一个向量,而相邻的两个向量之间存在一个夹角。从图2与图4我们可以看出当相空间中的点代表的是噪音信号时,它的夹角比较大,曲线没有任何规律可言。而在稀疏部分的曲线明显要平滑的多,相邻两个向量的夹角要比密集部分中的要小的多,这也是原始信号在相空间映射的一个特征。

综合以上三个判据,我们就得出了在地震波时间序列在相空间中的初至时刻拾取方法。

3 实例计算

取一组实际地震波信号图为数据,其每一道的采样点数为164,采样间隔为4ms。我们取其中的几个片断,其初至拾取如图5所示。可以看出相空间地震波初至时刻拾取的方法在实际当中的应用效果还是很理想的,作者在很多数据中应用了该方法,其效果都比较令人满意。

4 结论

理论研究和实际计算结果表明,本文所提出的相空间地震波初至时刻拾取是可行且有效的。该方法拾取的初至精度高,运算速度快。在该方法中不涉及窗和步长的选取,从而提高了运算结果的可靠性和稳定性。

【参考文献】

- [1] 韩小俊,施泽进,李亚林.利用分形维拾取地震波初至的一种改进算法[J].石油地球物理勘探,2002,37(1):60-63.
- [2] 胡文祥.声波测井资料弱初至波检测新方法[J].江汉石油学院学报,1994,16(增刊):23-25.
- [3] Boschetti F, Dentith M D, List R D. A Fractal-based algorithm for detecting first arrivals on seismic traces[J]. Society of Exploration Geophysicists, 1996, 61(4): 1095-1102.
- [4] 杨绍清,贾传炎.两种实用的相空间重构方法[J].物理学报,2002,51(11):2452-2458.
- [5] 陈亮,张雄伟.基于相空间重构的语音特征研究[J].中文信

息学报,2002,16(1):25-30.

应用数学和力学,2001,21(11):1117-1124.

[6] 卢侃,孙建华,编译.混沌动力学[M].上海:上海远东出版社,1990.

[8] 于水源,苏在滨.语音分析中的相空间方法[J].黑龙江大学自然科学学报,1996,13(1):25-32

[7] 马军海,陈子恕.混沌时序相空间重构的分析和应用研究[J].

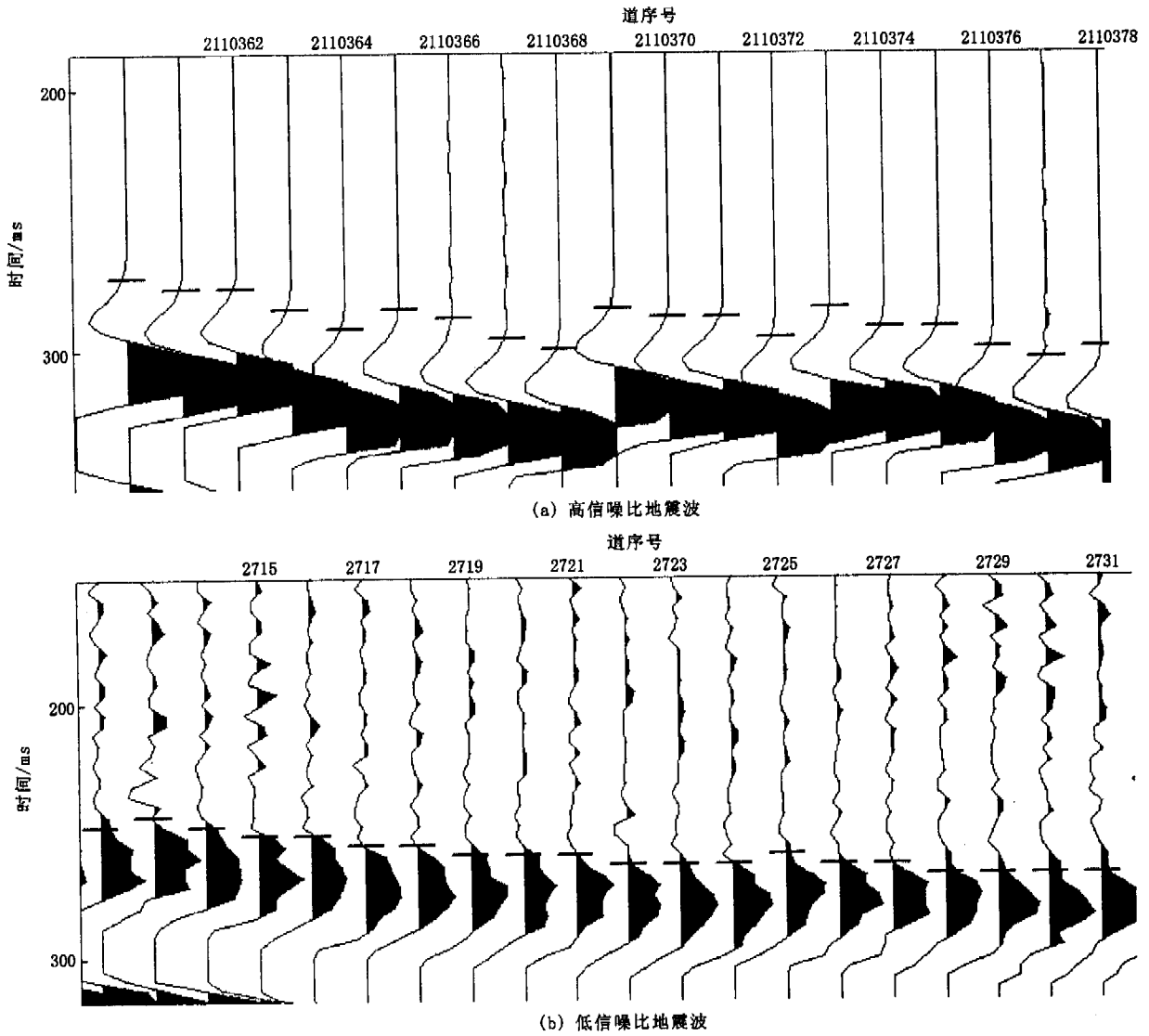


图5 实际地震波初至拾取片段(横杠为初至位置)
Fig. 5 Segments of seismic wave for picking up the first arrivals.