

基于干涉成像的微震定位方法^①

凌丹丹, 李德春

(中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:提出了一种基于光学干涉原理,用地震波代替光波进行地震成像的一种新的成像方法:地震干涉成像方法。用这种方法进行微震定位的特点是不需要进行初至拾取,观测系统也可以使用任意阵列检波器。模拟了一个地下震源的二维时间延迟记录,编制了基于 C 语言的震源定位程序,对接收的记录使用此方法进行成像。通过程序运行结果验证了此方法的可行性,且定位效果明显。

关键词:微震定位;地震干涉成像;算法

中图分类号: P315.63

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2012)02-0138-04

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2012.02.0138

A Microseismic Sources Location Method Based on Interferometric Seismic Imaging

LING Dan-dan, LI De-chun

(Faculty of Resource, China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221116, China)

Abstract:Based on the optical interferometric principle, a new seismic imaging method which use seismic wave to replace optical wave, named seismic interferometric imaging method is presented. This method needn't to pick up first arrival, and can use any array detectors as the observation system. A two-dimensional time delay record from a subsurface source is simulated, and a C-based positioning procedure for seismic source is established, then use this method to invert. The result of this program indicates that the method is feasible and high in location accuracy.

Key words: Microseism location; Interferometric seismic imaging; Algorithm

0 前言

微地震监测技术通常是以声发射学和地震学为基础的。微地震监测技术的一个主要任务是确定震源的位置,即微震定位。微震定位一般指确定微震的震源位置经度、纬度和深度及发震时刻,并适当给出对定位结果的评价。

计算定位起源于 1912 年,由德国物理学家 Geiger^[1]提出,其实质是将非线性方程组线性化,并通过最小二乘原理求解。随着计算方法和计算机技术的发展,许多定位方法得到发展,如:Powell 法、联合定位法、双差定位法等;随着多学科的相互交流与渗透,其它学科的最优化方法也得以借鉴,如生物学中的遗传算法和物理学中的模拟退火法等。尤其是

近年来基于现代数字地震观测技术和科学计算以及计算机技术的智能化数值自动定位方法得到了迅速发展,并已成为当前地震定位的主流方法。随着全球及区域速度结构三维层析成像的研究,在此基础上应用三维结构的地震定位已经被人们所关注。

从数学观点来说这些方法的实质在于求由观测到时和理论到时之差所构造的以假想震源位置为函数的目标函数的极小值。这就要求提高震相拾取的精度和准确度,不然定位的准确性很难保证^[2-3]。

本文根据前人对地震波干涉成像所作的工作,研究实验了一种新的微震定位方法,这种方法主要运用互相关道集进行成像,不需要进行初至的拾取,且观测系统可以任意使用阵列检波器。为了验证此

^① 收稿日期:2011-03-08

作者简介:凌丹丹(1989-),女,江苏沭阳人,硕士在读,主修地震勘探,微震定位。

方法的可行性,本文以一个均匀速度模型合成了时间延迟地震记录,采用干涉成像进行定位并对其可行性以及效果进行评价。

1 干涉成像的原理

1.1 光的干涉

图 1 所示的是油膜干涉图,其目的是测量油膜厚度。基本原理是通过光源 S 发出一束光,光束进入油膜后一部分直接从油膜顶面透射出去;另一部分在油膜顶面反射到油膜底部后又反射并从顶部透射出去。从油膜中直接透射出去的光束 sA 称为直达波;经过反射后出去的称为虚反射波。在油膜上部直达波光束 sA 与虚反射波光束 $sArB$ 相互干涉。由于干涉中两束光的相同路径部分大小相等,故干涉后相互抵消,剩下的部分为光束在油膜中相位差。而相位差与油膜厚度有关,这样通过测量相位差就可以得到油膜的厚度,得到油膜的几何成像结果。这里直达波作为参考光束,虚反射波作为被干涉光束,直达波的表达式和反射波的表达式为

$$\tilde{d}_A = e^{i\omega\tau_{sA}} \quad (1)$$

$$\tilde{d}_B = R^2 e^{i\omega(\tau_{sA} + \tau_{Ar} + \tau_{rB})} \quad (2)$$

其中, τ_{sA} 、 τ_{Ar} 和 τ_{rB} 分别是相应路径上光的传播时间; R 是油膜与空气分界面处的反射系数; ω 是光波角频率。干涉图中的黑线表示反射光束和直达光束的反相区域,同相区域表明是一致干涉。直达波和反射波的相位变化反映出油膜厚度的不规则变化,于是在干涉图中圆环状的干涉条纹出现扭曲现象。

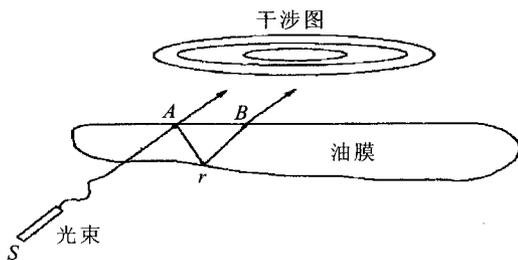


图 1 油膜中直达波 sA 和反射波 $sArB$ 的干涉
Fig. 1 Interferogram produced by interference between direct arrivals (sA) and reflected arrivals ($sArB$) in oil film.

干涉条纹为直达波和虚反射波叠加后的光强,可表示为

$$I = (\tilde{d}_A + \tilde{d}_B)(\tilde{d}_A + \tilde{d}_B)^* = 1 + 2R^2 \cos[\omega(\tau_{Ar} + \tau_{rB})] + R^4 \quad (3)$$

其中光强 I 是由射线路径的反射部分的相位 $\omega(\tau_{Ar} + \tau_{rB})$ 决定。值得注意的是:强度或圆环状图案与震

源相位或激光束的位置部分 sA 无关^[4]。这就意味着在对油膜几何形状成像的时候不必要先知道震源的位置和震源子波。

1.2 地震干涉成像

地震波干涉与光波干涉相似,区别只是地震波干涉用的是地震波不是光波,而且干涉图是由相邻的道进行互相关得到的。

本文采用如图 2 所示的观察系统:地下某处有一震源 S 激发地震波,在地面放置一系列检波器用来接收上行信号。这里检波器接收到的都是直达波。

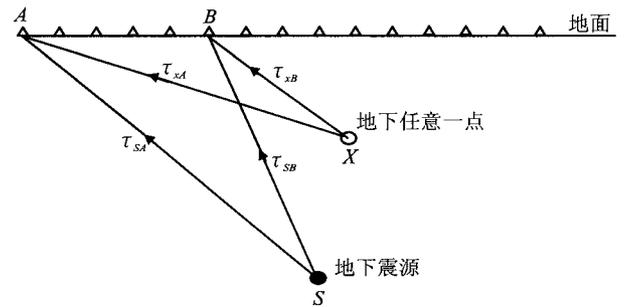


图 2 干涉成像示意图

Fig. 2 Interferometric imaging.

(1) 检波器 A 和 B 接收到的频域信号分别表示为

$$\tilde{d}_A = \tilde{W}(\omega) e^{i\omega\tau_{sA}} \quad (4)$$

$$\tilde{d}_B = \tilde{W}(\omega) e^{i\omega\tau_{sB}} \quad (5)$$

其中 $W(\omega)$ 表示频域内震源子波, τ_{sA} 和 τ_{sB} 分别表示相应路径上地震波的传播时间。

(2) 我们将 A, B 道记录进行互相关运算,得到干涉图:

$$\tilde{\Phi}(A, B) = \tilde{d}_A^* \cdot \tilde{d}_B = |\tilde{W}(\omega)|^2 e^{i\omega(\tau_{sB} - \tau_{sA})} \quad (6)$$

在时间域中,上述结果就是 A, B 两道的互相关。即对 A, B 两道进行互相关运算则可得到 $\tilde{\Phi}(A, B)$, 随后的偏移也是对互相关道集的偏移。

(3) 对相干数据 $\tilde{\Phi}(A, B)$ 进行偏移,与常规的标准偏移一样,选择 $e^{-i\omega(\tau_{rB} - \tau_{rA})}$ 作为偏移核函数,并且对所有频率求和则得到将地下任一点 x 作为震源点的偏移值 $m(x)$:

$$m(x) = \sum_{\omega} \sum_{A, B} \tilde{\Phi}(A, B) e^{-i\omega(\tau_{rB} - \tau_{rA})} = \sum_{A, B} \varphi(A, B, \tau_{rB} - \tau_{rA}) \quad (7)$$

其中 $\varphi(A, B, t)$ 表示 A, B 两道在时间域的干涉结果。当 x 就是实际的震源点 S 时,对所有的频率成分的波来说, $x \rightarrow S$, 有最大的偏移振幅值^[5-6]。

2 干涉成像的结果分析

2.1 均匀模型时间延迟地震图合成

速度模型为均匀模型,其速度为 $4\ 000\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,震源位于 $x = 250\ \text{m}$ 的正下方 $100\ \text{m}$ 处 ($y = 100\ \text{m}$),从地下震源向地面发射地震波,51道接收,每道间距为 $10\ \text{m}$ 。采用的子波为雷克子波并假设震源多次激发,选取二次激发的记录,第一次是零时刻激发, $0.02\ \text{s}$ 后第二次激发。第二次激发得到的地面记录波场如图3所示。

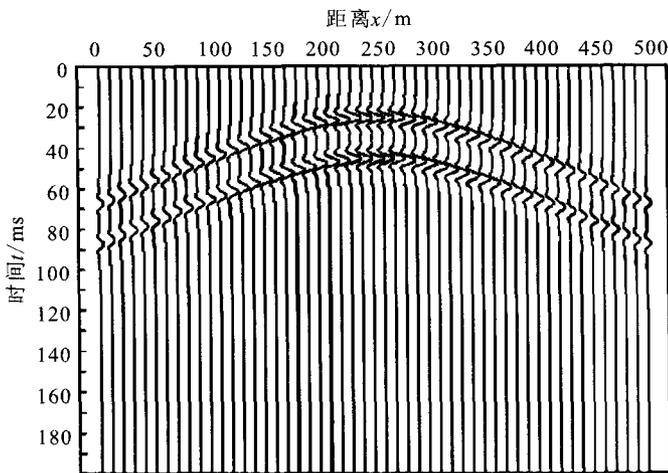


图3 地震记录示意图

Fig. 3 Seismic record.

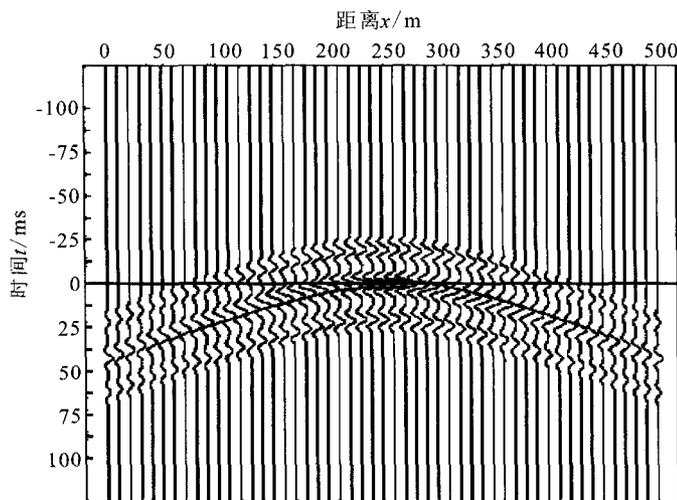


图4 第25道与其余道的互相关结果

Fig. 4 Crosscorrelating among trace 25 and the others.

2.2 计算结果

首先对上述记录做互相关运算,这里只给出将第25道与其余道做互相关后的结果(图4)。然后使用干涉成像方法对记录进行成像,分别得到波形显示结果与灰度显示结果(图5和图6)。两干涉图中能量最强点在 $(250\ \text{m}, 100\ \text{m})$ 处,震源点的振幅比周围点振幅要大的多,能量更强,即说明成像结果

正确。

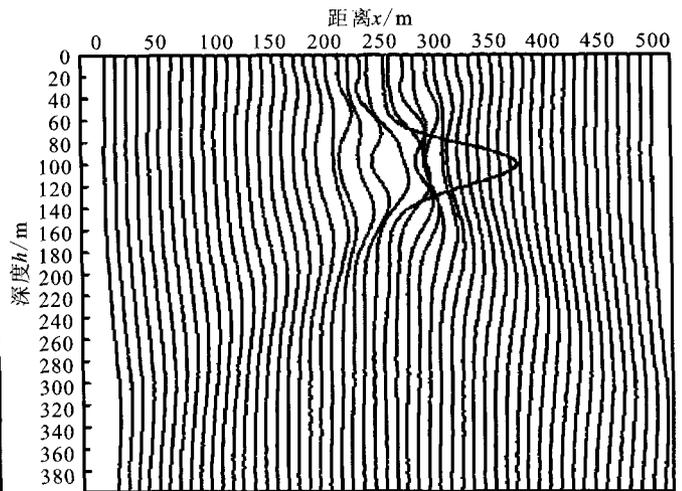


图5 干涉偏移的波形

Fig. 5 The wave shape of Crosscorrelation migration.

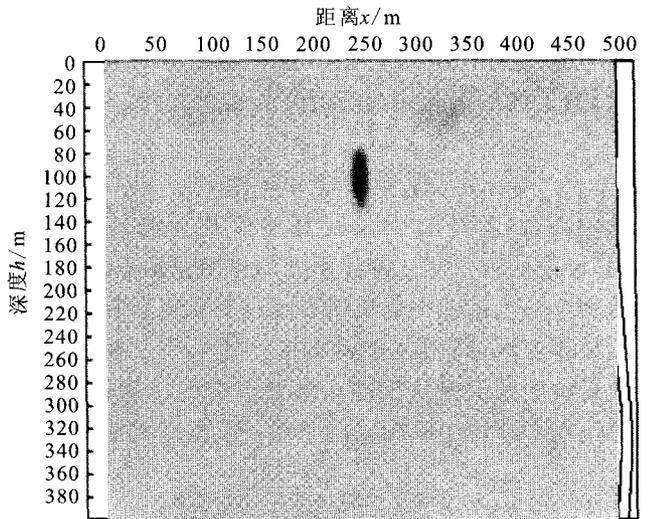


图6 干涉成像灰度图

Fig. 6 The gray image of interferometric.

3 结论

进行微震监测时,并不知道接收记录中震源的激发时间以及震源的激发次数,即一般检波器记录的都是这种接收时间未知的地震记录。实验证明,相比于其他方法,干涉成像对这样记录的成像有一定的优势。首先干涉成像是运用每道记录的互相关道集来进行偏移的,而不同的延迟时间的记录互相关后结果基本不变,都是反映的每道接收记录的时间差,因此干涉成像不需要进行初至拾取;另外从程序结果上看,干涉成像的定位可行并且定位效果明显。

目前以微震为基础的新技术正在进入工业界,

将补充或改善现有的技术,同时降低成本和风险。这些技术利用自然发生的地震或声波能量等作为震源,因此对震源定位的方法及精度研究有着重要的意义。

[参考文献]

- [1] Geiger L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from arrival time only[R]. Bull. St. Louis, Univ., 912:60-71.
- [2] 杨文东,金星. 地震定位研究及应用综述[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(1):15-25.
- [3] 田玥,成晓非. 地震定位研究综述[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(1):148-152.
- [4] Schuster G. Seismic interferometric imaging with waveforms [R]. UTAM Midyear Report, 1999:121-130.
- [5] Schuster G T, Liu Z, Followill F. Migration of autocorrelograms[A]// Abstracts of 67th SEG meeting[C]. 1997:1893-1896.
- [6] Schuster G, Followill F, Katz L, et al. Autocorrelogram migration: Theory[J]. Geophysics, 2003, 68:1685-1694.
- [7] Kapotas S, G Tselentis, M Martakis. The leap to passive seismic imaging, is it time? [A]// Expanded Abstracts of 74th Annual International Meeting SEG[C]. [S. l.]: [s. n.], 2004, 576-579
- [8] Maxwell S G, Urbancic T I. The Robe of Passive Microseismic Monitoring in the Instrumented Oil Field[J]. The Leading Edge, 2001, 20:636-639.
- [9] Keck R G, Withers R J. A field demonstration of hydraulic fracturing for soild waste injection with real-time passive seismic monitoring: paper SPE 28459 [A] // SPE 69th Annual Technical Conference and Exhibition of Soc. Petro. Eng. [C]. New Orleans, Louisiana: [s. n.], 1994:25-28.
- [10] Phillips W S. Precise microearthquake locations and fluid flow in the geothermal reservoir at Soultz-sous-Forêts, France[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 2000, 90, 212-228.
- [11] Sykes L R. Earthquake swarms and sea-floor spreading[J]. Geophys. Res., 1970, 75, 6598-6611.
- *****
- (上接 131 页)
- [8] 刘菁华,王祝文,刘树田,等. 城市活动断裂带的土壤氡气评价方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(2): 295-304.
- [9] 兰晓雯,晏信飞,王成虎. 地震正演模拟在高分辨率隐伏断层地震勘探中的应用[J]. 西北地震学报, 2008, 30(4): 354-359.
- [10] 高景华,徐明才,荣立新,等. 利用地震剖面研究夏垫断裂西南段的活动性[J]. 地震地质, 2008, 30(2): 497-504.
- [11] 卢育霞,王振明,王兰民,等. 兰州盆地活断层的高分辨率浅层地震勘探技术[J]. 西北地震学报, 2008, 30(4): 344-353.
- [12] 何文贵,袁道阳,葛伟鹏,等. 对兰州市刘家堡断层的新认识[J]. 西北地震学报, 2009, 31(1): 40-45.
- [13] 徐锡伟,计凤桔,于贵华,等. 用钻孔地层剖面记录恢复古地震序列——河北夏垫断裂古地震研究[J]. 地震地质, 2000, 22(1): 9-19.
- [14] 李传友,汪一鹏,王志才. 中国东部城市地区隐伏断裂上断点与最新活动时代关系的初步分析——以邢台—唐山地震区为例[J]. 地震地质, 2007, 29(2): 431-445.
- [15] 张世民,王丹丹,刘旭东,等. 北京南口—孙河断裂晚第四纪古地震事件的钻孔剖面对比与分析[J]. 中国科学(D辑), 2008, 38(7): 881-895.
- [16] 雷启云,柴焱章,孟广魁,等. 银川隐伏断层钻孔联合剖面探测[J]. 地震地质, 2008, 30(1): 250-262.
- [17] 朱金芳,徐锡伟,黄宗林,等. 福州市活断层探测与地震危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [18] 朱金芳,谢志招,曲国胜,等. 闽南地区城市活动构造与地震[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [19] 徐锡伟,计凤桔,于贵华,等. 用钻孔地层剖面记录恢复古地震序列: 河北夏垫断裂古地震研究[J]. 地震地质, 2000, 22(1): 9-19.