

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007283

一种高频拓展的改进地震干涉算法研究^{*}

牟新刚¹, 周 奇¹, 周 晓¹, 刘宏岳²

(1. 武汉理工大学机电工程学院 武汉 430070; 2. 福建省建筑设计研究院有限公司 福州 350001)

摘 要:地震干涉法是一种求解两道检波器之间频散曲线的微动勘探算法,然而频率域中传统的地震干涉法在求解频散曲线时,相干系数拟合使用的是第一个单调递减段贝塞尔函数,计算的有效频散点较少,高频段缺失,在进行微动探测时,浅层结构分辨率低,出现深度近似 1 倍台站距离的勘探盲区。本文提出一种改进的地震干涉法,使用实测信号的信噪比模型来修正两道信号的相干系数,通过第一类零阶贝塞尔函数的单调性把相干系数划分为不同区间段,分段拟合贝塞尔函数来求解面波相速度。工程实践表明,该方法探测效果良好,拓展了高频段,提高了浅层分辨率,有效地解决浅部勘探盲区问题。

关键词:地震干涉;微动勘探;信噪比;频散曲线

中图分类号: TH762 P631 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Study on an improved seismic interference algorithm with high frequency extension

Mou Xin'gang¹, Zhou Qi¹, Zhou Xiao¹, Liu Hongyue²

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: The seismic interferometry is a microtremor survey algorithm for achieving the dispersion curve between two geophones. To obtain the dispersion curve, the traditional seismic interferometry in the frequency domain uses monotonically decreasing Bessel functions to fit the coherence coefficients. The effective dispersion points of calculation are less, and high frequencies are missing. To perform microtremor detection, the resolution of shallow structure is low, and there are exploration blind areas with a depth similar to the station distance. An improved seismic interferometry method is proposed, which uses the signal-to-noise ratio model of the measured signal to correct the coherence coefficients of two signals. The coherence coefficients are divided into different intervals by the monotonicity of the first type of zero-order Bessel curve. Piecewise fitting Bessel function is utilized to solve the surface wave phase velocity. The engineering practice shows that this method has a good detection effectiveness. The high frequency band is expanded, and the detection accuracy is improved. The problem of shallow exploration blind areas is effectively addressed.

Keywords: seismic interference; microtremor survey; signal-to-noise ratio; dispersion curves

0 引 言

微动是一种由体波(P波和S波)和面波(Rayleigh波和Love波)组成的复杂振动,并且面波能量占信号总能量的70%以上^[1],它源于自然界和人类的各种活动。微动勘探方法就是通过阵列观测,以平稳随机过程理论为依据,从微动信号中提取 Rayleigh 波频散曲线,通过对

频散曲线反演,获得地下介质的横波速度结构,从而推断地下介质的一种方法^[2]。

目前,探测地层结构,除了钻孔法、电磁法^[3]等物理方法,使用微动信号研究地下结构,国内外也已经进行了大量研究和应用。徐佩芬等^[4]利用空间自相关(spatial auto-correlation, SPAC)法^[5]估算地壳S波速度结构;何正勤等^[6]基于嵌套三角形台阵采集微动数据应用 SPAC 法进行地热勘探;刘宏岳等^[7]分析了复杂场地条件下的

收稿日期:2020-12-23 Received Date: 2020-12-23

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61701357)项目资助

地球物理探测方法;李浙龙等^[8]研究干涉成像在双安煤矿采空区探测的应用效果,结果表明该方法对采空区定位效果较为显著。Yokoi 等^[9]证明了地震干涉(seismic interferometry, SI)法和 SPAC 法的一致性。虽然 SI 法和 SPAC 法的物理本质是一致的,但是 SPAC 法得到的频散曲线是台阵下方整个区域的平均效应,而 SI 法得到的是任意两个台站路径之间的频散曲线。在相同台阵数量上,地震干涉方法可以得到更多台站间的频散信息,覆盖的探测区域更加全面^[10]。

传统的地震干涉法,使用标准贝塞尔函数的单调递减段直接拟合相干系数来求解面波相速度。由于单调递减段集中在低频,传统方法得到的频散点较少,高频缺失,在进行剖面探测时,浅层分辨率低,出现勘探盲区,容易导致工程建设中的施工误判。本文对传统的地震干涉法进行改进,使用信噪比模型来修正相干系数,并利用贝塞尔函数的单调性来对相干系数曲线分段,采用分段拟合贝塞尔函数求解面波相速度。设计直线型阵列采集微

动数据进行微动勘探试验分析,使用地震干涉法提取 Rayleigh 波频散曲线,经插值计算绘制面波相速度等值线图,进行地质解释,并与钻孔探测结果对比验证。结果表明,改进的地震干涉法扩展了高频段,提高了探测分辨率,解决了浅层勘探盲区问题。

1 微动勘探方法

微动勘探方法是一种基于微动台阵探测的地球物理方法,根据台阵形式和频散曲线的提取方法主要分为空间自相关方法、频率波数法和地震干涉法。其中地震干涉法可以在时域和频域求解,在时域的求解方法又叫背景噪声互相关法。

微动勘探方法的工作原理如图 1 所示。使用台阵形式检波器采集微动信号,利用地震干涉法提取两两检波器信号之间的 Rayleigh 波频散曲线,挑选合适的频散曲线,绘制面波相速度等值线图,进行地质解释。

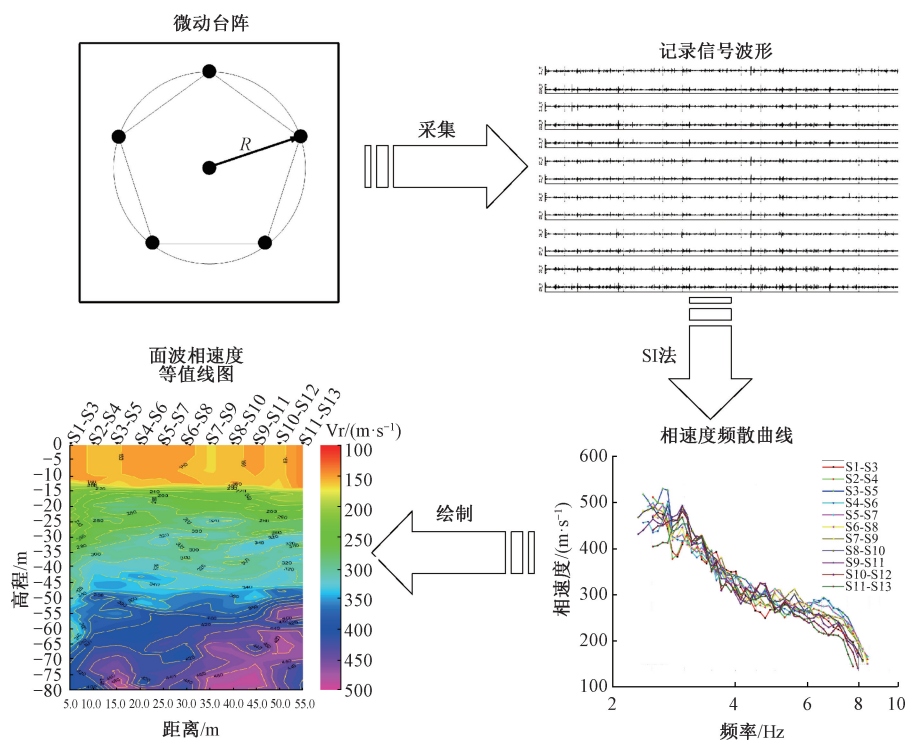


图 1 微动勘探数据处理流程

Fig. 1 Flow chart of microtremor survey data processing

2 高频拓展的改进地震干涉算法

本节首先简述在频率域中 SI 算法求解面波相速度的原理,然后针对 SI 算法的误差因子和拟合方式提出了改进的 SI 算法,并给出改进的 SI 算法处理流程。

2.1 SI 算法原理

地震干涉法的理论并不统一,Gouedard 等^[11]给出了白噪声随机分布的任意介质的互相关函数提取两点之间格林函数的推导公式:

$$\frac{d}{d\tau} C(\tau, \tau_A, \tau_B) \propto \frac{-\sigma^2}{4a} [G_a(\tau, \tau_A, \tau_B) -$$

$$G_a(-\tau, \tau_A, \tau_B)] \quad (1)$$

其中, σ^2 是噪声记录的方差; a 是 A 、 B 两点间介质的衰减因子; $C(\tau, \tau_A, \tau_B)$ 是 A 、 B 两点之间的互相关函数, $G_a(\tau, \tau_A, \tau_B)$ 表示在 0 时刻一个脉冲集中力作用于 A 点, 在 τ 时刻 B 点接收位移记录, $G_a(-\tau, \tau_A, \tau_B)$ 则表示在 0 时刻一个脉冲集中力作用于 B 点, 对应 A 点接收位移记录。该式表明可以利用互相关计算提取两道记录之间的格林函数。进一步可以写成:

$$G_{AB}(t) \propto \frac{dC_{AB}(t)}{dt} \quad (2)$$

式中: $G_{AB}(t)$ 是 A 、 B 两道记录的格林函数; $C_{AB}(t)$ 是互相关函数。

两个台阵间求取格林函数的方法有两种实现方式: 时间域相关算法和频率域相关算法, 其结果具有等效性。时间域算法涉及到远场近似问题, 即台站距离需远大于测量波长, 常用于大尺度地震台阵成像; 频率域算法不涉及远场近似, 需要寻找相干函数的过零点, 可测量的波长近于台站距离^[12-13]。

对于单一经验格林函数, 有多种频散测量方法: 时频分析、Yao 方法和信号复相干的实部拟合零阶第一类贝塞尔函数^[14]。本文采用第 3 种实现方法, 求解瑞雷波相速度。根据 Yokoi 推导的理论公式, 地震干涉法两两之间的互相关函数满足:

$$\gamma_{AB} = J_0(rk) \quad (3)$$

$$\gamma_{AB} = \text{Re} \left(\frac{u_A u_B^*}{|u_A| |u_B|} \right) \quad (4)$$

式(3)表明, 面波相速度可以由互相关函数与第一类零阶贝塞尔函数求得。式(4)是 A 、 B 两信号的相干函数在频率域中的求解方法。结合两式, 可以求得对应频率的波数 k , 相速度满足 $c = 2\pi f/k$ 。

2.2 高频拓展的改进 SI 算法

从微动信号中提取面波频散曲线, 对计算结果影响较大的误差因子^[15]主要有: 1) 存在非相干噪声产生的系统误差; 2) 由有限的测量时间引起的随机误差。非相干噪声是指属于传播波类别以外的所有记录成分, 例如特定于仪器的电子噪声。阵列中的非相干噪声会影响长波长范围内的分析结果, 并且在长波长范围内的分辨率取决于信噪比^[16]。

地震干涉法的系统误差主要来源于非相干噪声。传统的方法在求解相干系数时, 没有考虑非相干噪声的影响。本文所研究的方法将信噪比理论应用在地震干涉法中, 并提出了地震干涉法中相干系数的补偿算法, 用来修正由于非相干噪声带来的系统误差。地震干涉法中信噪比的倒数 ε 满足方程:

$$\Delta = A\varepsilon^2 + B\varepsilon + C \quad (5)$$

$$\text{coh}^2(\omega) = \frac{|G_{\text{z00}}(0, r; \omega)|^2}{G_{\text{z00}}(r, r; \omega) G_{\text{z00}}(0, 0; \omega)} \quad (6)$$

$$A = -\rho^2, B = \frac{\rho^2}{\text{coh}^2} - 2\rho^2 - \frac{1}{2}, C = \rho^2 \left(\frac{1}{\text{coh}^2} - 1 \right) \quad (7)$$

式(6)中: $G_{\text{z00}}(0, r; \omega)$ 是两道信号的互功率谱, 分母为两道信号自功率谱的乘积。在频率域中求解公式为 $\text{coh}^2 = |u_A u_B^* / (|u_A| |u_B|)|^2$ 。假定 Rayleigh 波基阶模式占优 ($\Delta = 0$), 式(5)的解: $\varepsilon = (-B - \sqrt{B^2 - 4AC}) / 2A$ 。

不考虑非相干噪声时, $\gamma = J_0(rk)$, 考虑非相干噪声时, $J_0(rk) / (1 + \varepsilon) = J_0(rk')$ 。使用信噪比来对不考虑非相干噪声的相干系数加权。确定了考虑噪声在內的相关系数的估计值 γ' 与无噪声对应项 γ 的关系, 如式(8)所示。补偿相干系数的地震干涉方法公式变换为式(9)。

$$\gamma' = \frac{1}{1 + \varepsilon} \gamma \quad (8)$$

$$\frac{1}{1 + \varepsilon} \text{Re} \left(\frac{u_A u_B^*}{|u_A| |u_B|} \right) = J_0(r_{A,B} k) \quad (9)$$

图2所示, 标准的第一类零阶贝塞尔曲线包括单调递减段和震荡衰减段。传统的地震干涉方法, 通过式(9)拟合贝塞尔曲线的第一段单调递减区间, 得到对应频率的波数 k , 进而求出面波相速度。而震荡衰减的相干系数段没有被利用, 对应的有效频率范围较小。本文提出分段拟合的方法, 按照标准的贝塞尔曲线的单调性, 把相干系数曲线划分为不同的频率段, 采用分段拟合, 拓展高频段, 增加频散点的数量。

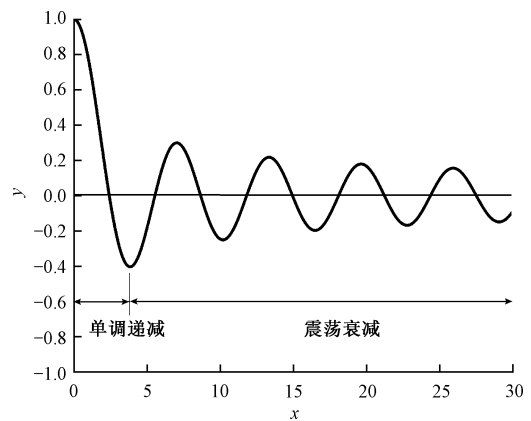


图2 第一类零阶贝塞尔曲线

Fig. 2 Bessel curve of the first kind

第1类零阶贝塞尔曲线的前7个极值点对应的 x 宗量分别为: 0、3.83、7.02、10.17、13.32、16.47、19.62, 可以将曲线划分为6段, 之后的相干系数震荡较剧烈, 可靠性较低, 不予考虑。使用震荡衰减段拟

合得到的频散点,即为在传统算法上扩展的频率点。

使用改进的地震干涉算法提取微动信号面波频散曲线的处理流程如图3所示。与传统的方法相比,计算相干系数时,采用了信噪比进行补偿;求解面波相速度时,划分区段,分段拟合贝塞尔函数,拓展了高频段。

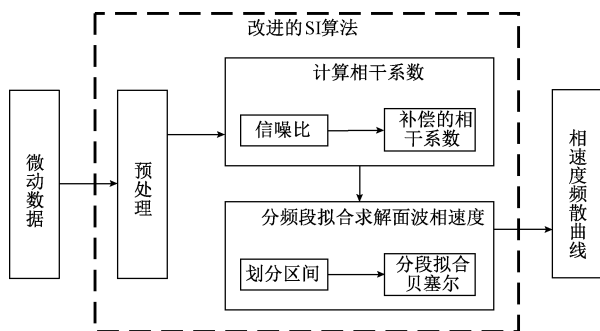


图3 改进的SI算法处理流程

Fig. 3 Flowchart of the improved SI algorithm processing

3 试验数据采集

选取的试验场地位于福州市仓山区金林路的西北侧,测线布置在马路旁人行道上,地表平整。垂直试验地点数百米有城市道路主干道,车辆繁忙,测试线路上偶有车辆通行。

微动数据采集系统由三分量检波器、控制主机等组成^[17]。试验记录采集时间 60 min,采样频率 250 Hz,测线采用直线型阵列,使用 13 个检波器,相邻检波器间隔 5 m。测线及钻孔位置如图4所示。

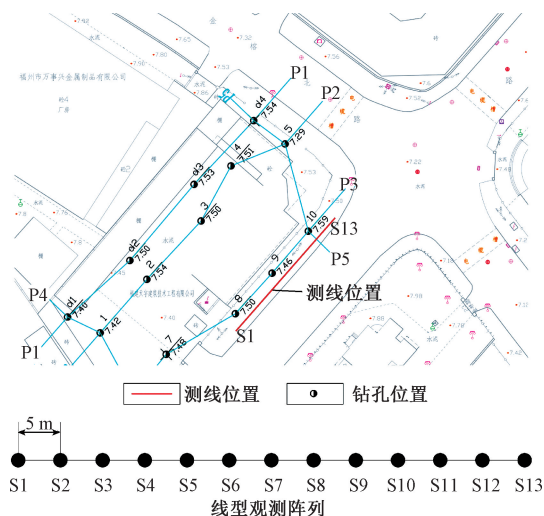


图4 测线及钻孔位置

Fig. 4 Survey line and drilling location map

4 试验结果与分析

4.1 数据的预处理

在频率域处理微动数据之前,一般要拾取地震信号,剔除瞬时强震动干扰,文中选取一种长短时窗比值法(short term average/long term average, STA/LTA)对数据进行处理^[18]。

将微动数据分段后进行傅里叶变换转换到频率域中,利用 Konno-Ohmachi 滤波器^[19]进行平滑滤波,优化傅里叶频谱毛刺太多的缺点,并且能够较好地保留低频波形信息。图5所示为某段信号的 Konno-Ohmachi 平滑滤波效果图。

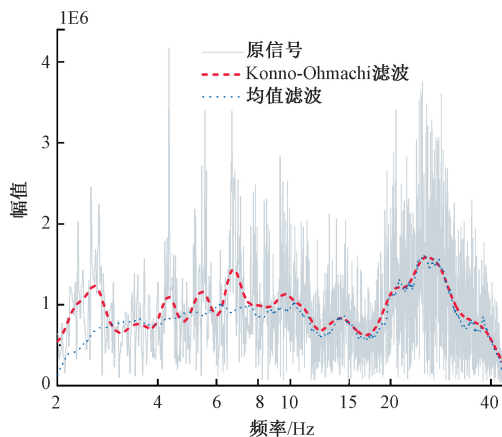


图5 Konno-Ohmachi 平滑滤波

Fig. 5 Konno-Ohmachi smoothing filter

4.2 计算相干系数

在频率域中,计算两两检波器微动信号之间的相干系数曲线。如图6所示,为检波器 S1 和 S10 两道微动信号之间的相干系数曲线。经过信噪比补偿的相干系数曲线的震荡幅值更小,表明补偿处理对于非相干噪声有一定的抑制作用,使曲线形状更符合贝塞尔曲线的形状(标准的贝塞尔曲线极小值为-0.4)。

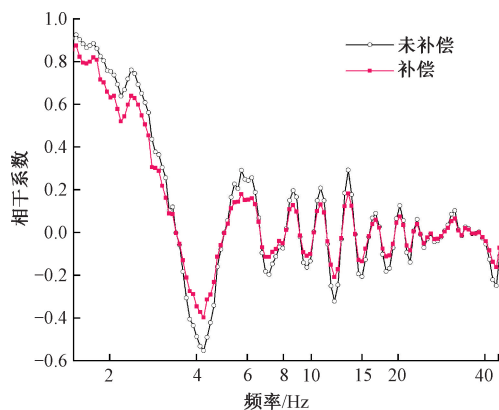


图6 相干系数曲线

Fig. 6 Coherence coefficient curves

4.3 分段求解面波相速度

相干系数拟合贝塞尔函数求解相速度时,参与拟合的频段范围至关重要。通过标准第一类零阶贝塞尔函数的单调性,把相干系数划分为不同的频率区间。表1所示,为S1和S10两个检波器拾取到地震信号的相干系数曲线分段信息,相干系数曲线1.5~9.66 Hz的数据是按照贝塞尔函数的前5段单调区间来划分的,9.66~45 Hz的震荡衰减数据,使用第6段贝塞尔函数拟合。

表1 贝塞尔曲线和相干系数曲线分段

Table 1 Bezier curve and coherence coefficient curve segmentation

贝塞尔曲线	x 宗量	J_0	相干系数曲线 频率 f/Hz
第1段	0~3.83	1~-0.40	1.5~4.24
第2段	3.83~7.02	-0.40~0.30	4.24~5.73
第3段	7.02~10.17	0.30~-0.25	5.73~7.14
第4段	10.17~13.32	-0.25~0.22	7.14~8.65
第5段	13.32~16.47	0.22~-0.20	8.65~9.66
第6段	16.47~19.62	-0.20~0.18	9.66~45

图7相速度曲线来看,大于10 Hz的相速度趋势有误,前5段的计算结果较好,第6段及之后的频段数据应该舍弃。同传统方法相比,将可用频率从4.2 Hz扩展到了9.66 Hz。

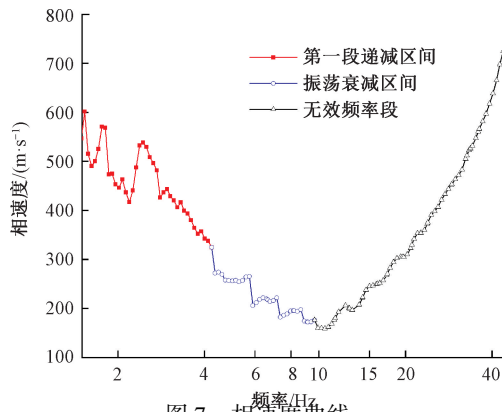


图7 相速度曲线
Fig. 7 Phase velocity curve

根据面波半波长穿透深度理论 $h = v/(2f)$, 可以近似得到微动信号的探测范围。S1和S10两道检波器间隔为45 m,依据经验,检波器的探测深度小于5倍的检波器距离225 m。图8所示为其半波长曲线,未使用信噪比补偿的相干系数的穿透深度最大为254 m,而经过补偿的相干系数的穿透深度为196 m,使用经过信噪比补偿的频散曲线更符合实际经验。结合图5中补偿后的相干系数曲线极值被抑制,更符合标准的贝塞尔曲线形状,可以粗略得出经过补偿的算法提取频散曲线更好的结论。

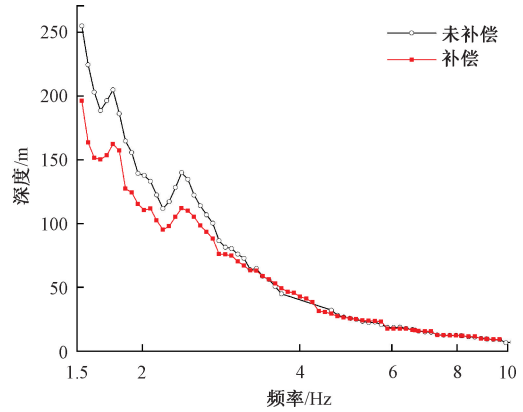
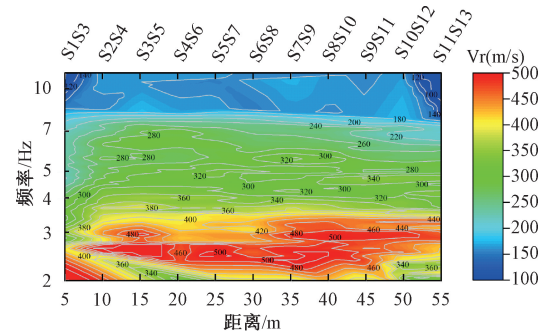


图8 半波长曲线

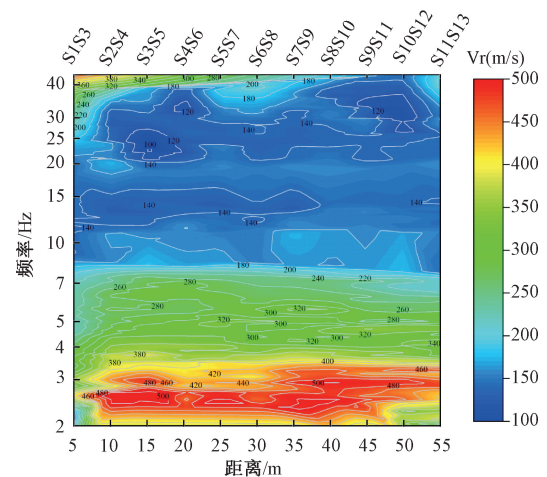
Fig. 8 Half-wavelength curves

4.4 结果分析

使用传统方法和改进方法提取10 m距离检波器微动信号间的相速度频散曲线,绘制面波相速度等值线图,分析地下结构岩性变化。图9所示为频率-相速度等值线图,图9(b)相较于图9(a),频率范围更大,高频信息更多。



(a) 单调递减段
(a) Monotonic decreasing segment fitting



(b) 分段拟合
(b) Piecewise fitting

图9 频率-相速度等值线图

Fig. 9 Frequency-phase velocity contour map

从图 10 所示面波相速度等值线图可以得出,两种方法在 10~80 m 的探测结果基本一致,探测深度均可达到 80 m,探测出的基岩面分界线相同,基岩埋深在 53~61 m 范围,但是图 10(a)在浅部出现深度约 1 倍台站距

离的探测盲区,而图 10(b)在浅部 0~10 m 范围内细节更加丰富,解决了探测盲区问题。从工程建设角度看,改进的地震干涉法浅部探测信息更精细,可提供更准确的施工意见,解决勘探盲区导致的施工误判。

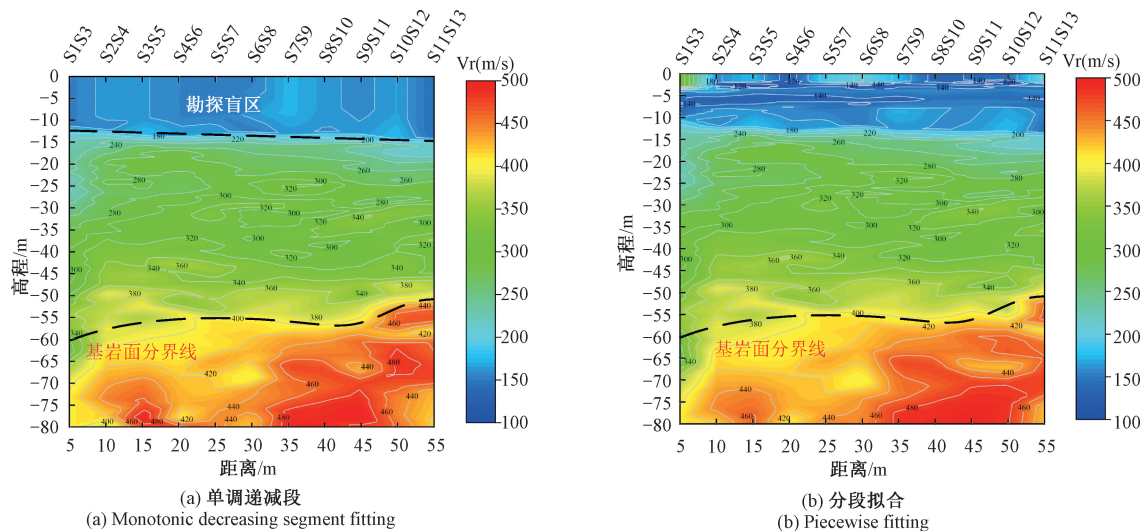
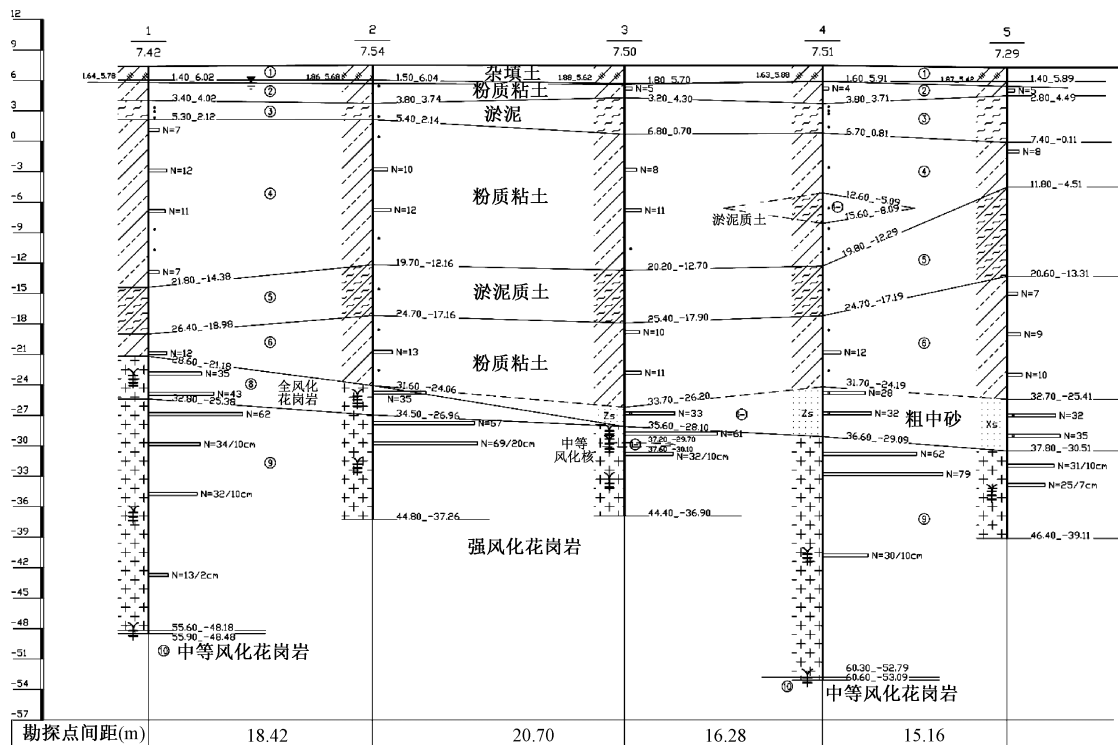


图 10 面波相速度等值线图

Fig. 10 Surface wave phase velocity contour map

试验场地附近测线 P2 的钻孔资料,如图 11 所示,根据微动勘探与钻探结果,可以获得如下结论:

1) 改进的地震干涉法,能够拓展高频段,提高浅层分辨率,有效地解决浅部勘探盲区问题。



工程地质剖面图 P2 比例:水平 1:250 垂直 1:300

图 11 工程地质剖面图

Fig. 11 Engineering geological profile

2)微动勘探的结果与钻探结果得到的地层岩性基本一致。

3)钻孔资料揭示的岩土层除上部的杂填土外,第四系土层主要为粉质粘土和淤泥(质土)(交互层),其下为花岗岩风化而成残积土、强风化花岗岩和中等风化花岗岩,两个钻孔揭露中风化的埋深分别为55.6 m和60.3 m。

4)微动勘探试验揭示的基岩埋深53~61 m,与钻孔结果吻合,并且揭露的基岩分界面是区分强风化层与中等风化层之间的界面。

5 结 论

在频率域内,使用地震干涉法计算两道微动信号之间的相干系数,求解面波相速度频散曲线。将前人研究的信噪比模型,应用到两道之间的地震干涉方法上面,对不考虑信噪比的相干系数进行补偿处理,减少非相干噪声带来的误差。在使用相干系数拟合贝塞尔函数求解相速度方法中,通过利用标准贝塞尔函数的单调性,将相干系数曲线划分为不同区间段,分段拟合求解面波相速度。工程实例表明,同只使用单调递减段拟合的传统方法相比,改进的地震干涉方法拓展了高频段,提高了浅层探测精度,并且相速度剖面较好地反映了测线下方的地下结构面波速度变化情况,有效地解决探测盲区问题,可避免因勘探盲区导致的施工误判。

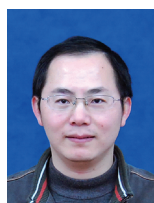
地震干涉方法,是计算两两检波器间的频散曲线,相同数量的检波器,可以计算更多频散曲线,获取的信息量更大。在后续研究中,可以根据不同路径的频散曲线通过层析成像反演获得地下结构的三维剖面信息,有更高的效率,达到事半功倍的效果。

参考文献

- [1] 孙勇军,徐佩芬,凌甦群,等.微动勘查方法及其研究进展[J].地球物理学进展,2009,24(1):326-334.
SUN Y J, XU P F, LING S Q, et al. Microtremor survey method and its progress[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(1): 326-334.
- [2] 刘宏岳,黄佳坤,孙智勇,等.微动探测方法在城市地铁盾构施工“孤石”探测中的应用—以福州地铁1号线为例[J].隧道建设,2016,36(12):1500-1506.
LIU H Y, HUANG J K, SUN ZH Y, et al. Application of microtremor method to boulders detection in urban metro shield construction: case study of Fuzhou metro line No. 1[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(12): 1500-1506.
- [3] 刘长胜,刘鹏,曾新森,等.电磁法勘探中梯度场测量方法研究[J].仪器仪表学报,2017,38(4):886-894.
LIU CH SH, LIU P, ZENG X S, et al. Study on gradient measurement in electromagnetic exploration[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 886-894.
- [4] 徐佩芬,李世豪,凌甦群,等.利用SPAC法估算地壳S波速度结构[J].地球物理学报,2013,56(11):3846-3854.
XU P F, LI SH H, LING S Q, et al. Application of SPAC method to estimate the crustal S-wave velocity structure[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(11): 3846-3854.
- [5] AKI K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 1957, 35: 415-456.
- [6] 何正勤,丁志峰,贾辉,等.用微动中的面波信息探测地壳浅部的速度结构[J].地球物理学报,2007,50(2):492-498.
HE ZH Q, DING ZH F, JIA H, et al. To determine the velocity structure of shallow crust with surface wave information in microtremors[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(2): 492-498.
- [7] 刘宏岳,贺华.复杂场地条件下的地球物理探测方法选择与工程实例[J].工程地球物理学报,2014,11(2):155-159.
LIU H Y, HE H. The geophysical methods choice under the complicated site condition and case study[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2014, 11(2): 155-159.
- [8] 李浙龙,凌丹丹,李德春.干涉成像在双安煤矿采空区探测中的应用[J].地球物理学进展,2015,30(5):2188-2192.
LI X L, LING D D, LI D CH. Application of interferometric imaging in Shuang'an goaf detection[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(5): 2188-2192.
- [9] YOKOI T, MARGARYAN S. Consistency of the spatial autocorrelation method with seismic interferometry and its consequence[J]. Geophysical Prospecting, 2008, 56(3): 435-451.
- [10] 刘庆华,鲁来玉,王凯明.主动源和被动源面波浅勘方法综述[J].地球物理学进展,2015,30(6):480-496.
LIU Q H, LU L Y, WANG K M. A review of surface wave survey methods for active and passive sources[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(6): 480-496.
- [11] GOUEDARD P, STEHLY L, BRENGUIER F, et al.

- Cross-correlation of random fields: Mathematical approach and applications[J]. Geophysical Prospecting, 2008, 56(3): 375-393.
- [12] LAPO B, CORNELIS W, JULIE V, et al. On measuring surface wave phase velocity from station-station cross-correlation of ambient signal[J]. Geophysical Journal International, 2013, 192(1): 346-358.
- [13] YAO H J, ROBERT D. Analysis of ambient noise energy distribution and phase velocity bias in ambient noise tomography, with application to SE Tibet [J]. Geophysical Journal International, 2009, 179 (2): 1113-1132.
- [14] 徐宗博. 高频背景噪声波场模拟与面波成像[D]. 武汉:中国地质大学, 2016.
XU Z B. High-frequency ambient seismic noise simulation and surface-wave imaging[D]. Wuhan: China University of Geosciences. 2016.
- [15] CHO I, TADA T, SHINOZAKI Y. Assessing the applicability of the spatial autocorrelation method: A theoretical approach [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: B06307.
- [16] CHO I, TADA T, SHINOZAKI Y. Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: B09315.
- [17] 王怀秀, 刘红梅, 朱国维. 新型本安分布式矿井三分量地震仪的研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(S2): 347-352.
WANG H X, LIU H M, ZHU G W. Development of new essential safety distributed mine 3-component seismograph[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2008, 22(S2): 347-352.
- [18] 韩若楠. 地震信号去噪及检测方法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
HAN R N. Study on de-noising and detecting methods of seismic signal[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [19] KONNO K, OHMACHI T. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1998, 88 (1): 228-241.

作者简介



牟新刚, 2005 年于华中科技大学获得学士学位, 2010 年于华中科技大学获得博士学位, 现为武汉理工大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为智能仪器设计、嵌入式系统设计和图像处理。

E-mail: sunnymou@whut.edu.cn

Mou Xin'gang received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Huazhong University of Science and Technology in 2005 and 2010, respectively. He is currently an associate professor at Wuhan University of Technology. His main research interests include intelligent instrument design, embedded system design and image processing.



刘宏岳 (通信作者), 1990 年于同济大学获得学士学位, 现为福建省建筑设计研究院有限公司教授级高级工程师, 主要研究方向为地震数据处理和微动探测技术。

E-mail: 475068460@qq.com

Liu Hongyue (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Tongji University in 1990. He is currently a professor-level senior engineer at Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research. His main research interests include seismic data processing and microtremor detection technology.