

地质雷达隧道超前地质预报检测信号的 HHT 分析法

凌同华, 张 胜, 李升冉

(长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 隧道工程建设因开挖而诱发的各种地质灾害时有发生, 为确保隧道施工安全, 目前普遍运用超前地质预报探明掌子面前方的地质情况, 如何提高超前地质预报的判释水平显得尤为重要。针对隧道超前地质预报地质雷达信号的特点, 采用 HHT 分析法提取原始图像各 IMF 分量的瞬时剖面图及其单道信号的瞬时幅值、瞬时相位、瞬时频率。结果表明, HHT 分析法分解出的瞬时参数突显了原始信号的特征信息, 能较好地定量识别不良地质体位置与形状, 提高地质雷达原始图像解释的精度和可信程度。

关键词: 隧道工程; 地质预报; 地质雷达; EMD 方法; HHT 分析

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)07 - 1422 - 07

HILBERT-HUANG TRANSFORM METHOD FOR DETECTION SIGNAL OF TUNNEL GEOLOGICAL PREDICTION USING GROUND PENETRATING RADAR

LING Tonghua, ZHANG Sheng, LI Shengran

(School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: Geological hazard accidents induced by excavation occur frequently in the course of tunnel constructions. In order to ensure tunnel construction safety, geological prediction for exploring potential geological conditions in front of tunnel face is widely adopted. Therefore, it is of vital importance to explore how to improve the interpretation level of geological prediction. Based on the characteristics of ground penetrating radar(GPR) signals in tunnel geological prediction, the Hilbert-Huang transform(HHT) method is used to extract instantaneous profiles of each IMF(intrinsic mode function) component in the original image and instantaneous parameters of the single trace signal, such as instantaneous amplitude, instantaneous phase and instantaneous frequency. The results show that instantaneous parameters decomposed by HHT method highlight the characteristics of the original signal, which can qualitatively identify the position and shape of catastrophic geological body, and improve the accuracy and credibility of the original image interpretation of ground penetrating radar.

Key words: tunnelling engineering; geological prediction; ground penetrating radar; EMD method; HHT analysis

1 引 言

随着我国高速公路及铁路建设逐渐进入更加复

杂的地质区域, 地质条件对山岭隧道和城市地下工程施工的影响日益突出。在隧道施工过程中, 不良地质和施工地质灾害常常成为制约隧道建设的主要因素^[1]。隧道施工掌子面前方的地质情况预报是隧

收稿日期: 2012 - 03 - 26; **修回日期:** 2012 - 05 - 09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078043)

作者简介: 凌同华(1968 -), 男, 博士, 2004 年于中南大学资源与安全工程学院采矿工程专业获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土工程及灾害控制技术方面的教学与研究工作。E-mail: lingtonghua@163.com

道工程界普遍关注而又没有得到很好解决的难题^[2]。开展隧道超前地质预报, 进行隧道信息化施工, 对减少施工盲目性、确保工程安全有着重要意义^[3]。近年来, 超前地质预报在我国隧道施工中已经开始发挥作用, 特别在一些长、大隧道施工中, 超前地质预报已被列为必不可少的技术环节^[4]。

隧道施工超前地质预报方法有地质分析法、超前钻探法、地震反射波法、地质雷达法、瞬变电磁法、陆地声纳法、地震波层析成像法等, 每种方法都有各自的优、缺点及适用范围^[5-6]。地质雷达法是近年来应用于短距离超前地质预报较为普遍的一种物探手段。地质雷达法具有对隧道掌子面实施快速、连续扫描、结果显示直观的优点。目前, 地质雷达信号处理方法普遍采用的是基于传统的傅里叶分析理论的仪器自带的分析软件, 而傅里叶分析理论没有时频局部化分析功能, 无法对掌子面前方的地质缺陷所处的空间位置及其几何尺寸进行精确计算, 严重影响了地质雷达法进行超前地质预报的实际应用效果, 探索与之相适应的科学信号解释技术成为广大研究者共同关注的问题。

D. Gabor^[7]在 1946 年首先提出复信号概念, 之后, 许多学者试图将复信号分析技术引入到地质雷达处理领域。该方法在将地质雷达记录的实信号分解出多个相互独立的参数的过程中, 放大了记录中的噪声, 使得多参数剖面中的大量有用信息被干扰, 从而无法从根本上克服地质雷达抗干扰能力弱的缺点^[8]。小波(包)分析具备时域 - 频域双重良好的局部性特点, 是信号处理和分析的好工具, 然而, 不同的小波基具有不同的时频特征, 用不同的小波基分析同一个信号会产生不同的结果^[9]。相对小波(包)等分析方法而言, Hilbert-Huang 变换是一种全新而优越的具有自适应的时频分析方法^[10-12]。本文针对隧道施工超前地质预报地质雷达时间 - 深度剖面图及单道信号的特点, 采用 HHT(Hilbert-Huang transform)方法提取各 IMF(intrinsic mode function)分量的瞬时剖面图, 并结合单道信号的瞬时幅值、瞬时相位、瞬时频率等参数, 对地质雷达信号进行处理与分析, 从而达到对地质雷达原始图像进行定量解释和表征的目的。

2 HHT 方法

HHT 方法是近年提出的适合处理稳态信号和非平稳信号的有效方法, 它由 EMD(empirical mode

decomposition)方法和 Hilbert 变换 2 部分组成。HHT 方法与建立在先验性谐波基函数上的傅里叶变换和建立在小波基函数上的小波变换不同, 它依据数据本身的时间尺度特性进行分解, 是当前国际上公认的最新的时频局部化分析方法之一^[13]。该方法消除了人为因素的影响, 克服了传统方法中用毫无意义的谐波分量来表示非平稳、非线性信号的缺陷, 并可得到极高的时频分辨率, 具有良好的时频聚集性。自 1998 年 HHT 法被提出以来, 已被广泛应用于潮汐、地震信号、结构分析、语音信号、故障诊断、图像处理等领域的信号分析与处理。

2.1 EMD 方法

EMD 方法具有多尺度分析的特点, 信号分解时, 不需要构造基函数, 其基函数由数据自身构造, 是一种特殊的自适应小波分解方法。EMD 分解的基本原理是将信号分解为一系列 IMF 分量。IMF 分量是满足单分量信号物理解释的一类信号, 和简单的单调函数相比, 一个 IMF 分量代表了一个简单的振动模态。EMD 分解方法利用局部极大值和极小值的包络来进行分解, 一旦获得所有极值点, 所有的局部极大值用三次样条插值函数连接起来形成上包络线, 同样, 所有的局部极小值连接起来形成下包络线。

最终原始信号 $x(t)$ 可由 n 个 IMF 分量 $c_i(t)$ 和残余函数 $r_n(t)$ 构成^[14], 即

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

2.2 Hilbert 变换

原始信号 $x(t)$ 经 EMD 方法分解后得到多个 IMF 分量的组合, 分别对每个 IMF 分量 $c_i(t)$ 进行 Hilbert 变换^[15], $c_i(t)$ 变换后可表示为

$$\hat{c}_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2)$$

构造解析信号 $z_i(t)$:

$$z_i(t) = c_i(t) + j\hat{c}_i(t) = a_i(t)e^{j\varphi_i(t)} \quad (3)$$

显然有:

$$a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + \hat{c}_i^2(t)} \quad (4)$$

$$\varphi_i(t) = \arctan \frac{\hat{c}_i(t)}{c_i(t)} \quad (5)$$

式中: $a_i(t)$ 为信号 $c_i(t)$ 的瞬时幅值, $\varphi_i(t)$ 为信号 $c_i(t)$ 的瞬时相位。根据式(4)可知 $a_i(t) \geq c_i(t)$, 这就意味着 $|c_i(t)|$ 的曲线包络于 $a_i(t)$ 的曲线。

在此基础上, 将信号 $x(t)$ 的瞬时频率定义为

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} w_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_i(t)}{dt} \quad (6)$$

式中： $w_i(t)$ 为圆频率。

对分解后得到的各 IMF 分量进行 Hilbert 变换后，则可把原始信号表示成：

$$x(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\varphi_i(t)} = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int w_i(t) dt} \quad (7)$$

式(7)中省略了残余函数 $r_n(t)$ ，Re 表示实部。式(7)称为 Hilbert 时频谱，简称 Hilbert 谱，记为

$$H(w, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int w_i(t) dt} \quad (8)$$

3 隧道掌子面超前地质预报

3.1 工程概况

将军山隧道为清(远)连(州)一级公路升级改造(高速)工程，位于连州—凤埠段的连南改线段(左半幅)，进口位于广东省连南县龙口村东、开丫山北侧斜坡地带，出口位于老广村，为单洞隧道。隧道起点里程桩号为 ZK2112+285，地面标高 161.18 m，设计高程 157.27 m，底板埋深 3.91 m；终点里程桩号为 ZK2113+615，地面标高 199.10 m，设计高程 192.65 m，底板埋深 6.45 m，全长 1 330 m。隧道区大的地貌属碳酸盐岩溶蚀低山丘陵地貌，微地貌属于较坚硬碳酸盐岩类丘陵地貌和松散岩类沟谷地貌，总体呈南东向展布。隧道出口端桩号 ZK2113+515 附近围岩为强中风化灰岩、白云质灰岩，岩体破碎，岩溶、裂隙发育，地表溶蚀现象强烈，岩体无自稳能力，拱部和侧壁易坍塌，围岩等级为 IV 级。

3.2 仪器参数的设置

在本次隧道施工超前地质预报过程中，现场采用 RAMAC/GPR 系列地质雷达，配以 100 MHz 天线。按照奈奎斯特采样定理，采样频率至少应为反射波最高频率的 2 倍，但在频率比仅仅为 2 时，雷达信号失真很明显。地质雷达在实际应用过程中，为了达到良好的探测效果，其采样频率应该是天线主频率的 10 倍以上，即 100 MHz 天线应采取的采样频率为 1 024 MHz^[16]。记录时间和叠加次数根据天线中心频率相应选取，还可参照地质雷达野外工作参数选择的基本原则^[17]。

3.3 测线布置

由于隧道掌子面采用上、下台阶法开挖，工作面很狭小，根据掌子面的具体情况，在检测过程中

采用一条横线的布线方式，如图 1(a)所示。根据现场情况灵活布置测线，其原则就是尽可能靠近掌子面轴心位置，使测线距离尽可能长，尽可能多地采集数据，以备后期数据的分析处理。具体测试过程见图 1(b)。

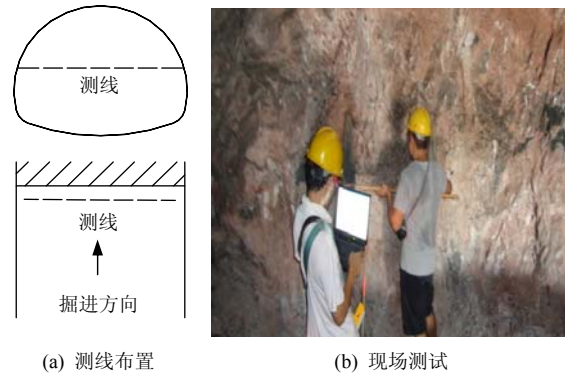


图 1 地质雷达测线布置及现场测试图
Fig.1 Layout of GPR lines and field test

4 超前地质预报信号分析的 HHT 法

以将军山隧道掌子面桩号 ZK2113+515 的地质雷达探测结果分析为例，对地质雷达自带分析软件与 HHT 分析方法得出的结果进行比较，分析了自带分析软件存在的问题，说明了 HHT 分析的特性。

4.1 采用自带软件对雷达图像进行分析

采用地质雷达分析软件 REFLEXW5.0 对原始雷达图像(见图 2(a))进行一系列的数字化信号处理，包括：漂移去除、零线设定、背景去噪、自动增益、谱值平衡、道间平衡、滑动平均、混波处理、单道漂移去除等，其滤波后的地质雷达图像解释结果见图 2(b)。图 2 中，左半部分为剖面图，右半部分为单道信号。从图 2(b)中可以看出，掌子面左半部分前方从左侧深 6 m 至掌子面中心处深 1 m 范围有一个斜分界面，反射强烈，反射波强度大，其中，前方深 4~6 m 处有较大溶沟或破碎带，溶沟或破碎带内有泥或软弱岩体，溶沟或破碎带至 20 m 范围内岩体很破碎；掌子面右半部分前方 20 m 范围内岩体破碎，岩溶、裂隙发育。然而，地质雷达自带分析软件普遍基于传统的傅里叶分析理论，而傅里叶分析理论没有时频局部化分析功能，无法对掌子面前方的地质缺陷所处空间位置及其几何尺寸进行精确计算。

4.2 超前地质预报信号的 HHT 分析

HHT 方法能对非平稳、非线性信号进行平稳化、线性化处理，并在分解的过程中保留原始信号的固有特性。因此，在 Matlab 语言平台上采用 EMD

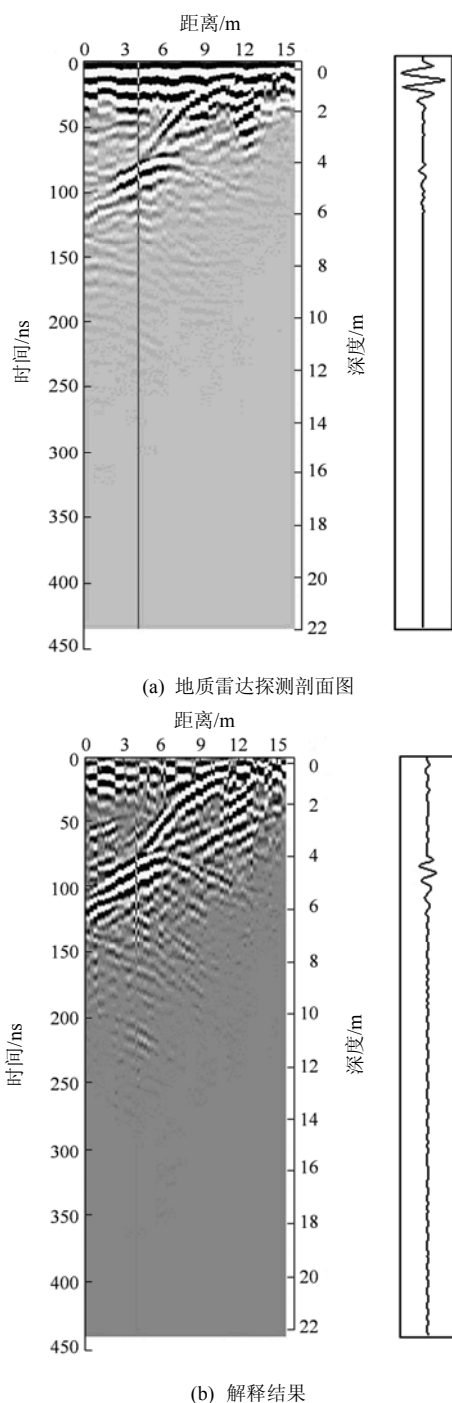


图 2 地质雷达探测剖面图及解释结果

Fig.2 GPR detection profiles and explanation results

方法对隧道超前地质预报地质雷达信号进行分解得到 n 个 IMF 分量，每个 IMF 分量都包含了不同的特征尺度信息，通过 EMD 分解，原始信号的特征完全可以由这 n 个 IMF 分量来表征。图 3(a), (b) 和(c)分别为原始图像分解得到的前三阶 IMF 分量的瞬时幅值剖面图，从图 3 中可以看出地质雷达信号能量的瞬时变化情况，可以用来判断地质体有关岩性状况。图 4(a), 4(b)和(c)分别为原始图像分解得到的前三阶 IMF 分量的瞬时相位剖面图。利用与

瞬时振幅无关这一特点，对追踪连续性差的弱反射波及极性变化的反射波独具优点。图 3, 4 中，椭圆内为溶洞的具体位置。从图 3, 4 可以看出，随着探测剖面上时间或探测深度的增加，地质雷达信号第一阶 IMF 分量剖面衰减缓慢，而其他低频 IMF 分量剖面的有效成份所剩无几，因此，原始雷达图像的特征信号主要集中在第一阶 IMF 分量内。

拾取图 2(a)中第 30, 50 道信号，参照图 3 和 4，对探测结果作进一步分析。图 2(a)中，第 30, 50 道信号的瞬时幅值、瞬时相位、瞬时频率分别见图 5, 6。图 5, 6 中，箭头 B 所示为发射和接受天线直接耦合波以及通过地表传播的电磁波叠加位置，箭头 A 为溶洞散射信号位置， X 和 Y 分别为拾取信号的横、纵坐标值。从图 5, 6 中可以看出：(1) 在竖向采样点 105~158 ns 内，反射界面明显，反射面瞬时幅值显著增强，能量衰减快；(2) 图 5(b), 6(b) 中，瞬时相位波形受掌子面前方溶洞的物性变化较为敏感，表现得较为紊乱；(3) 第 30, 50 道信号初至值分别位于竖向采样点 105, 84 ns (见图 5(c), 6(c))，该值即为溶洞与隧道围岩的第一界面；(4) 溶洞中心对应的瞬时幅值最大，向两边的瞬时幅值逐渐减小。以不同的比例显示，瞬时幅值剖面上显示出不同宽度(成像宽度)的溶洞，这实际上是由于各道信号瞬时幅值变化所引起的，即成像宽度与地质雷达瞬时剖面上各道信号的瞬时幅值有关，这与溶洞成像宽度物理模型试验结果相吻合^[18]，这也说明溶洞信号瞬时幅值成像宽度可以有效表征溶洞的真实宽度。

根据上面的分析，初步判断溶洞所属道号的大致位置(第 20~70 道)后，再从地质雷达信号第一阶 IMF 分量瞬时参数谱中拾取各道信号初至值、瞬时幅值成像宽度，如表 1 和图 7 所示。图 7(a)为采样时间、道号与信号瞬时幅值的三维图，即溶洞位置信号能量衰减图；图 7(b)为溶洞信号瞬时幅值的成像宽度，其横坐标拾取信号第 20~70 道，纵坐标拾取信号竖向采样点 60~160 ns。从表 1 和图 7 可以看出：(1) 随着地质雷达信号道号的增加，各道信号初至值离隧道掌子面的距离越近，即掌子面开挖越先暴露出溶洞；(2) 溶洞信号瞬时幅值成像宽度均值约 52 ns，即溶洞瞬时幅值成像宽度为 2.5 m。据此可以判断溶洞为掌子面从左至右 1.5~5.3 m(即信号第 20~70 道所在位置)、水平向前宽度为 2.5 m。因此，相比建立在傅里叶变换基础上的地质雷达自带分析软件，HHT 方法能对地质雷达原始图像进行定量解释和有效表征。

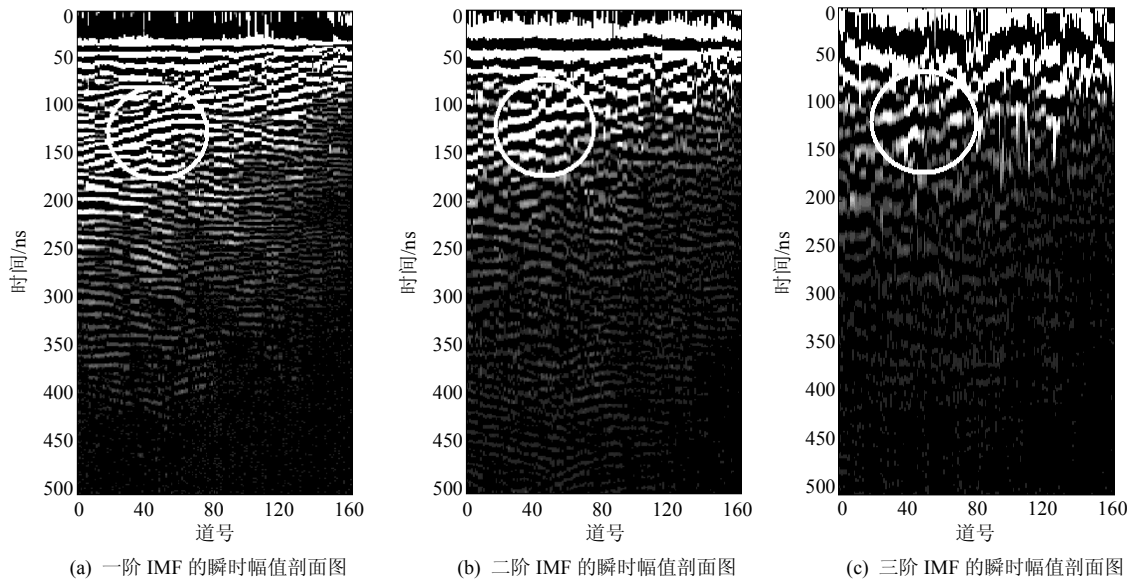


图3 原始雷达图像的各阶 IMF 分量的瞬时幅值剖面图

Fig.3 GPR profiles of instantaneous amplitude of the first three orders IMF components

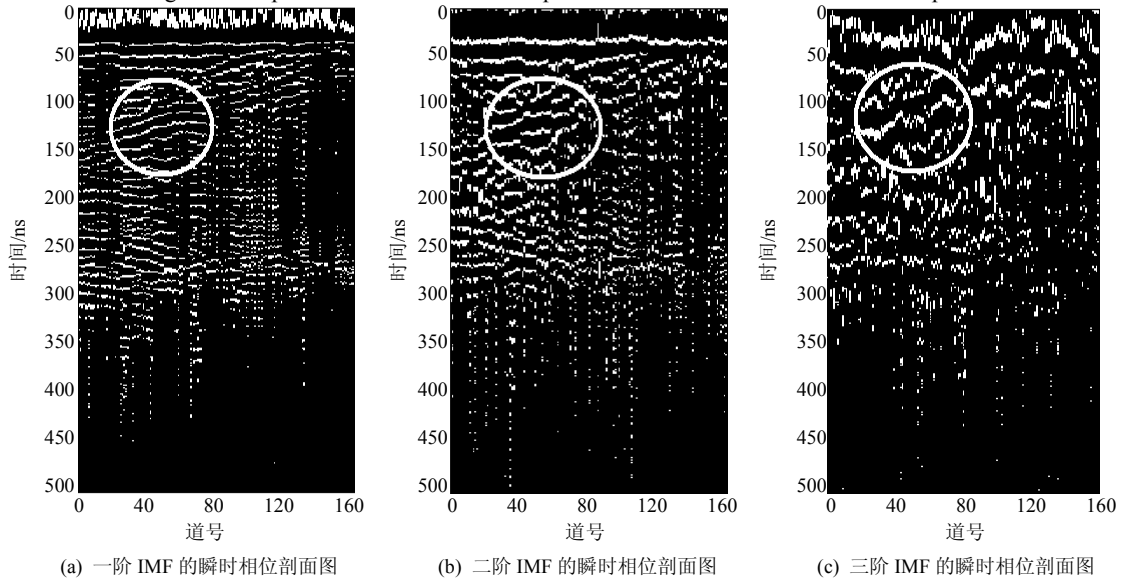


图4 原始雷达图像的前三阶 IMF 分量的瞬时相位剖面图

Fig.4 GPR profiles of instantaneous phase of the first three orders IMF components

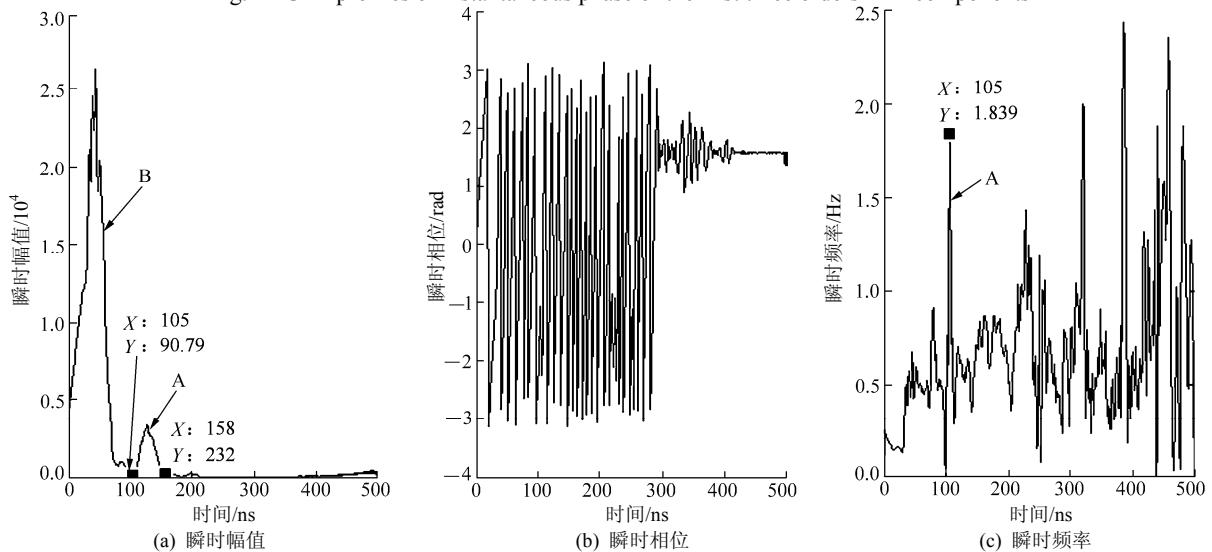


图5 第30道信号的第一阶 IMF 分量的瞬时幅值、瞬时相位和瞬时频率图

Fig.5 Instantaneous amplitude, phase and frequency of the first order IMF component of the thirtieth trace signal

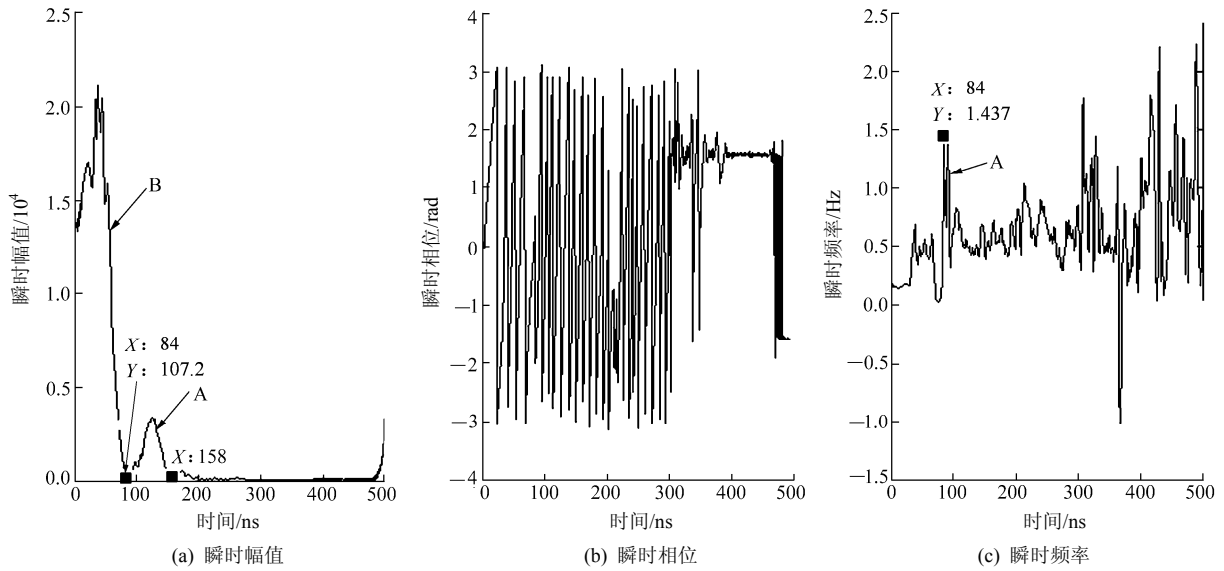


图 6 第 50 道信号的第一阶 IMF 分量的瞬时幅值、瞬时相位和瞬时频率图

Fig.6 Instantaneous amplitude, phase and frequency of the first order IMF component of the fiftieth trace signal

表 1 各道信号的瞬时幅值成像宽度

Table 1 Imaging width of instantaneous amplitude of each trace signal

道号	初至值/ns	成像宽度/ns	道号	初至值/ns	成像宽度/ns
31	105	50	41	96	45
32	104	52	42	97	45
33	104	51	43	89	52
34	105	50	44	84	61
35	103	54	45	82	62
36	103	53	46	86	59
37	103	51	47	82	69
38	105	49	48	80	72
39	101	56	49	79	72
40	88	65	50	84	74

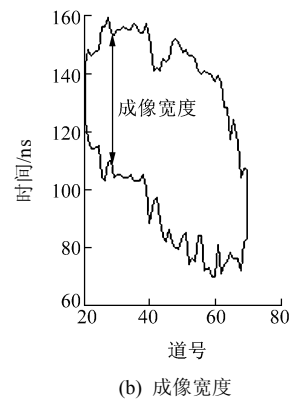
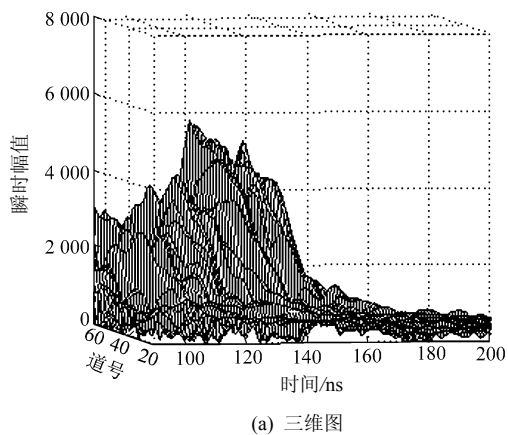


图 7 采样时间、道号和信号瞬时幅值的三维图及各道信号瞬时幅值成像宽度

Fig.7 Three-dimensional images of sampling time, trace and instantaneous amplitude and imaging width of instantaneous amplitude of each trace signal

隧道开挖后，右线 ZK2113+517~519 段出现溶洞，掌子面暴露后溶洞内充填物已坍塌(见图 8(a))，溶洞周围岩体已发育(见图 8(b))，可见，前面根据地质雷达图像所作的超前地质预报分析成果和揭露的情况较为一致。



(a) 三维图



(a) 溶洞 (b) 洞周发育的岩体

图 8 洞内开挖暴露的溶洞及洞周发育的岩体

Fig.8 Exposed cavity within tunnel after excavation and developed rock around the cavity

5 结论

基于隧道施工超前地质预报地质雷达信号的特

点, 利用 HHT 分析方法具有自适应时频分解的能力, 将地质雷达信号各 IMF 分量中的瞬时幅值、瞬时相位等信息分离出来, 得到多个相互独立的瞬时参数, 根据各个瞬时参数所对应的特征点, 能很好地定量识别不良地质体位置, 特别是瞬时频率拾取溶洞第一界面以及瞬时幅值成像宽度表征溶洞真实宽度, 从而提高了地质雷达信号解释的精度, 达到了对地质雷达信号进行有效处理和解释的目的。

参考文献(References):

- [1] 孟陆波. 隧道超前地质预报技术与计算机辅助预报系统研究[博士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2009.(MENG Lubo. Study on the tunnel fore geological forecast and its computer assistant system [Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.(in Chinese))
- [2] 李术才, 李树忱, 张庆松, 等. 岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 217 - 225.(LI Shucui, LI Shuchen, ZHANG Qingsong, et al. Forecast of karst-fractured groundwater and defective geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 217 - 225.(in Chinese))
- [3] 王振宇, 程围峰, 刘越, 等. 基于掌子面编录和地质雷达的综合超前预报技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增2): 3 549 - 3 557.(WANG Zhenyu, CHENG Weifeng, LIU Yue, et al. Synthetic advanced forecast technique based on geological logging for tunnel face and ground penetrating radar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp.2): 3 549 - 3 557.(in Chinese))
- [4] 张庆松, 李术才, 孙克国, 等. 公路隧道超前地质预报应用现状与技术分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(4): 766 - 771.(ZHANG Qingsong, LI Shucui, SUN Keguo, et al. Analysis and present state of advanced geological forecast technology of highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(4): 766 - 771.(in Chinese))
- [5] 李天斌, 孟陆波, 朱劲, 等. 隧道超前地质预报综合分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2 429 - 2 436.(LI Tianbin, MENG Lubo, ZHU Jin, et al. Comprehensive analysis method for advanced forecast of geology in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2 429 - 2 436.(in Chinese))
- [6] 钟世航. 陆地声纳法的原理及其在铁路地质勘测和隧道施工中的应用[J]. 中国铁道科学, 1995, 16(4): 48 - 55.(ZHONG Shihang. The principle and application of landsonar method in railway geological survey and tunnel construction[J]. China Railway Science, 1995, 16(4): 48 - 55.(in Chinese))
- [7] GABOR D. Theory of communication[J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers, 1946, 93(26): 429 - 457.
- [8] 余志雄, 薛桂玉, 周创兵. 复信号分析技术及其在地质雷达数字处理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 798 - 802.(YU Zhixiong, XUE Guiyu, ZHOU Chuangbing. Application of complex signal analysis to process ground penetrating radar data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 798 - 802.(in Chinese))
- [9] 张华, 刘松, 张志勇, 等. 基于探地雷达信号处理的小波基选取研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(3): 1 115 - 1 121.(ZHANG Hua, LIU Song, ZHANG Zhiyong, et al. Study on selection of wavelet basis based on processing of GPR signal[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(3): 1 115 - 1 121.(in Chinese))
- [10] 张义平, 李夕兵, 赵国彦, 等. 基于 HHT 方法的硐室大爆破震动分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增1): 4 784 - 4 789.(ZHANG Yiping, LI Xibing, ZHAO Guoyan, et al. Analysis of chamber blasting vibration based on HHT method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp. 1): 4 784 - 4 789.(in Chinese))
- [11] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903 - 995.
- [12] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 417 - 457.
- [13] 李夕兵, 凌同华, 张义平. 爆破震动信号分析理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 82 - 105.(LI Xibing, LING Tonghua, ZHANG Yiping. Analysis of blast vibration signals-theories and methods[M]. Beijing: Science Press, 2009: 82 - 105.(in Chinese))
- [14] 向玲, 唐贵基, 胡爱军. 旋转机械非平稳振动信号的时频分析比较[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 42 - 45.(XIANG Ling, TANG Guiji, HU Aijun. Vibration signal's time-frequency analysis and comparison for a rotating machinery[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(2): 42 - 45.(in Chinese))
- [15] 于德介, 程军圣, 杨宇. 机械故障诊断的 Hilbert-Huang 变换方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 24 - 46.(YU Dejie, CHENG Junsheng, YANG Yu. Mechanical fault diagnostics based on Hilbert-Huang transform[M]. Beijing: Science Press, 2006: 24 - 46.(in Chinese))
- [16] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 41 - 63.(LI Daxin. Method and application of GPR[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 41 - 63.(in Chinese))
- [17] 邓世坤. 探地雷达野外工作参数选择的基本原则[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(5): 323 - 329.(DENG Shikun. On the basic principles for the choice of GPR field survey parameters[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(5): 323 - 329.(in Chinese))
- [18] 李凡异, 狄帮让, 魏建新, 等. 碳酸盐岩溶洞成像宽度的地震物理模型分析[J]. 石油物探, 2011, 50(5): 425 - 429.(LI Fanyu, DI Bangrang, WEI Jianxin, et al. Seismic physical model analysis of the imaging width of carbonate caves[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(5): 425 - 429.(in Chinese))