

# 高分辨率探地雷达复数道分析方法

廖立坚, 杨新安, 黄小平

(同济大学 城市轨道交通与铁道工程系, 上海 200092)

**摘要:** 常规的复数道分析方法, 对高分辨率雷达勘探, 特别是对薄层的研究, 其精度不够。为此采取了改进措施, 提出了适合于高分辨率雷达剖面的复数道分析方法, 并结合铁路沪宁线路基检测的实测数据, 对比了常规瞬时相位和改进后瞬时相位的剖面, 得出改进后的复数道分析方法较常规的精度更高, 效果更好。

**关键词:** 探地雷达; 复数道; 路基检测

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2008)03-0301-03

提高探地雷达资料的分辨率问题是探地雷达勘探资料处理所追求的目标, 它的关键在于介质速度的求取和反射波主频及频带宽度等参数的确定。复数道分析方法是探地雷达的每道数据看成是时间复函数的实部, 该复函数的虚部可以用希尔伯特变换直接从实部计算出来。这样, 此复函数的实部和虚部就可以作为确定瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率特性等复函数的输入部分。这种分析方法的优点在于能够将雷达信号分解为各种函数, 这些函数可以将原雷达道中振幅信息与角度信息区分开来。但对高分辨率的探地雷达资料的处理, 特别是对薄层的研究, 其精度就不够了。为此, 在常规复数道分析的基础上, 给出了适合于高分辨率雷达剖面的复数道分析方法<sup>[1]</sup>。

## 1 高分辨率复数道分析方法

如果把一般的雷达道记录  $x(t)$  视为要构造的复数道的实部,  $R(t)$  为构造复数道的虚部, 则构成的复数道就可以写为

$$u(x) = x(t) + iR(t) \quad (1)$$

或  $u(t) = A(t) \cdot e^{i\theta(t)}$ , 其中,  $R(t) = x(t) * (1/\pi t)$ 。设  $x(t)$  对应的傅里叶变换为  $X(\omega)$ , 则

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega,$$

对上式两边求导, 有

$$x'(t) = \int_{-\infty}^{\infty} i\omega X(\omega) e^{i\omega t} d\omega.$$

从上式可以看到,  $x'(t)$  是由雷达道  $x(t)$  的频谱加权而得到的, 其权因子为  $i\omega$ 。显然, 权系数是频率

的线性函数,  $x'(t)$  频谱的主频增高了, 但其相位旋转了  $90^\circ$ 。根据分辨率的概念, 在带宽不变或加宽时,  $x'(t)$  的分辨率要比  $x(t)$  的高。

下面研究  $x'(t)$  的三瞬参数表达式。

令  $y(t) = x'(t) + ic(t)$ , 其中  $c(t) = x'(t) * (1/\pi t)$ , 则有

$$y(t) = x'(t) * \left[ \delta(t) + i \frac{1}{\pi t} \right], \quad (2)$$

比较式(1)与式(2), 可知有  $y(t) = u'(t)$ 。令  $d(t) = \delta(t) + i(1/\pi t)$ , 由式(2)知,  $y(t)$  是由  $x'(t)$  和  $d(t)$  褶积而成, 而  $u(t)$  是由  $x(t)$  与  $d(t)$  褶积而成。显然,  $y(t)$  和  $u(t)$  相当于不同的记录由  $d(t)$  进行滤波后形成的, 而  $d(t)$  的频谱  $D(f)$  为

$$\begin{cases} D(f) = 2, & f > 0; \\ D(f) = C, & f < 0. \end{cases}$$

这样, 对于 1 个给定的雷达记录, 经  $D(f)$  滤波之后不会改变其频带宽度, 因为  $D(f)$  为阶跃函数。于是可以认为, 决定分辨率精度的因素是与  $d(f)$  进行褶积的函数。因此, 要想用三瞬参数来研究薄层问题, 显然, 采用  $x'(t)$  的三瞬参数作为与  $d(f)$  褶积函数, 分辨率会更高。其数学表达式如下。

$$\text{瞬时振幅: } A(t) = |y(t)| = \sqrt{x'^2(t) + c^2(t)},$$

$$\text{瞬时相位: } \theta(t) = \arcsin \frac{c(t)}{\sqrt{x'^2(t) + c^2(t)}},$$

$$\text{或 } \theta(t) = \text{Im}[\ln y(t)],$$

$$\text{瞬时频率: } \omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \text{Im} \left[ \frac{1}{y(t)} \cdot \frac{dy(t)}{dt} \right],$$

$$\text{离散公式: } \omega(n) = \text{Im} \frac{n[y(n) - y(n-1)]}{[y(n) + y(n-1)] \cdot \Delta t}.$$

## 2 实例分析

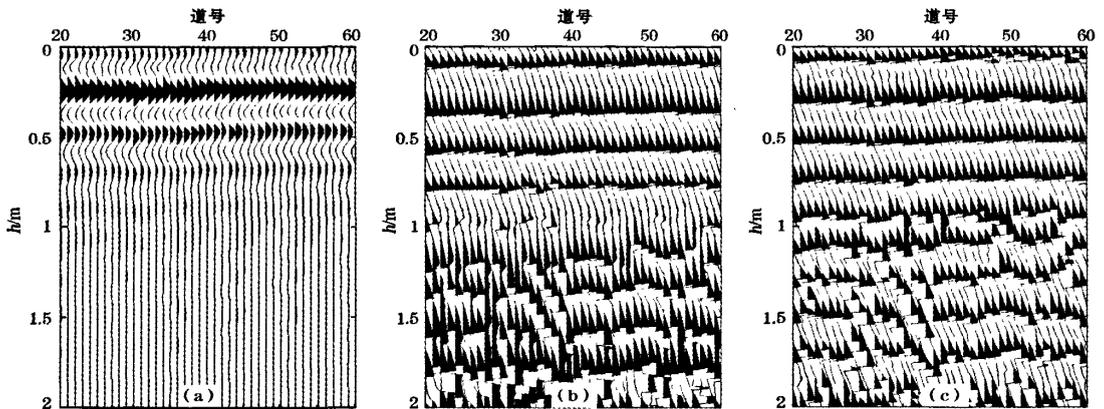
雷达接收到的反射波振幅,由于波前扩散和介质对电磁波的吸收,在时间轴上逐渐衰减,通常浅部能量很强,深部能量很弱。通常采用时间增益的办法来实现道内均衡,这在无噪声或高信噪比的理想情况下是可行的。当信噪比较低时,这种做法虽然可以提高信号强度,但同时也放大了噪声强度,实质上并不能提高解释精度<sup>[2]</sup>。

根据理论分析知道,瞬时相位所反映的是在某一给定时刻雷达道记录与其希尔伯特变换间的夹角,它是1个与振幅大小无关的量,因此利用相位参数来分析雷达数据不受波幅强度大小的影响,这对于提高深部弱信号的解释能力是很有利的。用角度信息画出的剖面并不改变原来的基本信息,而是产生不同的剖面,它们有时可能揭示出在常规剖面上被掩盖了的某些地球物理现象。

以下为采用瑞典生产的探地雷达 REMAC 对铁路沪宁线进行探测的实例。工作时选择中心频率 500 MHz,采样点数 480 个,道间距 1 m<sup>[3]</sup>。

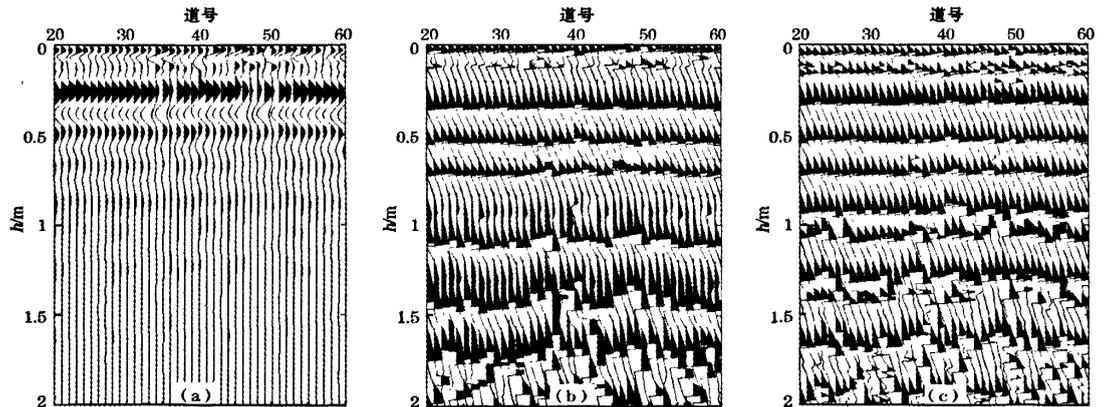
图 1 是对一段未发生病害线路的检测结果。可以看到有 3 层界面,分别在道碴表面层以下 0.35、0.5 和 1 m,后经开挖得出 0~0.5 m 左右是道碴层,0.5~1 m 为基床表层填土,1 m 为基床底层黏土顶层。而 0.35 m 处存在 1 个很薄的砂垫层,由于厚度很薄,只有 0.1 m 左右,所以雷达图像表现为只有 1 个连体的雷达反射波。

从图 1a 中看到,1 m 以下由于振幅的衰减,已经很难进行地质解释,而瞬时相位图则对每个界面都反射强烈,且与深度无关。但图 1c 图较图 1b 更清楚,如 1 m 位置的界面(基床底层黏土顶层),从图 1c 中看到 1 m 以下的黏土在 30 和 55 道处出现了界面紊乱,隐含着翻浆冒泥的危险,后经开挖证实与图上吻合。



a—原始剖面;b—常规复信道分析结果;c—高分辨率复信道分析结果

图 1 未发生病害线路检测的瞬时相位剖面



a—原始剖面;b—常规复信道分析结果;c—高分辨率复信道分析结果

图 2 存在翻浆冒泥病害线路检测的瞬时相位剖面

图 2 是对一段存在翻浆冒泥病害线路的检测结果,可以看到在砂垫层(0.35 m)以上出现的冒泥现象,图 2c 表现得更为明显,而且它对深部界面的反映情况也最为清楚。

### 3 结论

结合铁路沪宁线实测资料的分析结果可知,相位参数比振幅参数更能清楚地显示反射界面的存在,特别是对于深部弱反射信号的恢复,比振幅参数更有效。在各地层内部,相位参数的波形特征比较分明,清楚易见。振幅剖面配合相位、频率剖面可以多方位地对雷达资料进行解释。文中提到的适合于高分辨的复数道分析方法较常规的复数道分析方法的精度要高,将它运用于实际资料的分析,取得了明显的效果。

### 参考文献:

- [1] 刘财,陈业全,刘洋. 勘探地震资料处理新方法及技术[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [2] 韦宏鹤,杨顺安. 探地雷达波的相位参数及其应用[J]. 地质科技情报,1999,18(1).
- [3] 杨新安,高艳灵. 沪宁铁路翻浆冒泥病害的地质雷达检测[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(1):116.
- [4] 高静怀,江文秉,朱光明. 小波变换与信号瞬时特征分析[J]. 地球物理学报,1997,40(6).
- [5] Taner M T, Koehler F, Sheriff R E. Complex seismic trace analysis [J]. Geophysics, 1979, 44 (6).
- [6] 崔若飞,王辉. 小波变换在煤田地震勘探中的应用[J]. 中国矿业大学学报,2001,30(1).
- [7] 杨新安,李恕放. 路基检测新技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2006.
- [8] 杨新安,高艳灵,刘征. 论铁路既有线路路基检测[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(增):2363.
- [9] 杨新安. 云台山隧道与两端线路路基病害的探地雷达检测[J]. 地质科技情报,2002,21(4):86.

## COMPLEX TRACE ESTIMATE METHOD FOR HIGH RESOLUTION GPR DATA

LIAO Li-jian, YANG Xin-an, HUANG Xiao-ping

(Department of Urban Track and Railway Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to acquire high resolution GPR exploration data, we should not only adopt suitable methods to get high resolution data in the open field but also process primitive data with essential methods. The precision of the traditional method for complex trace analysis cannot meet the requirement of the high resolution GPR exploration, especially that of the thin interbeds research. Therefore an improved method for complex trace analysis is proposed in this paper to suit the high resolution GPR data. The traditional instantaneous phase plot is compared with the improved instantaneous phase plot based on exploration data of Shanghai-Nanjing Railway subgrade, and the results demonstrate that the improved method of complex trace analysis is more precise and effective than the traditional one.

**Key words:** GPR; high resolution; complex trace; subgrade inspection

**作者简介:** 廖立坚(1982-),男,同济大学在读硕士研究生,湖南郴州人,主要从事铁路路基检测方面的研究。

上接 300 页

## METHOD FOR ARSENIC REMOVAL AND GOLD LEACHING BY MICROBIAL OXIDATION

TIAN Xiao-juan<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, DU De-ping<sup>1</sup>, PENG Li-e<sup>2</sup>

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. College of Chemistry and Molecular Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Three *Thiobacillus ferrooxidans* strains with strong arsenic resistance and capacity of sulfide ore decomposition, namely M1s, I# and Malan, were used for a microbial oxidation and leaching experiment on DBF ore from Shimian County, Sichuan Province. The arsenic content and pH change in the microbial oxidation process and the optimum leaching conditions of gold were studied intensively. The change of the microbial oxidation process with time and the optimum leaching conditions of gold are given in the paper.

**Key words:** arsenic-bearing sulfide; arsenic removal by microbial oxidation; *Thiobacillus ferrooxidans*; leaching rate of gold ore

**作者简介:** 田晓娟(1954-),女,副研究员,主要从事岩石矿化学分析与地球化学研究。