

文章编号:1004-9037(2014)04-0615-05

探地雷达品质因子 Q 值估计方法

张丽丽¹ 刘四新² 吴俊军³ 屈乐乐¹

(1. 沈阳航空航天大学电子信息工程学院, 沈阳, 110126;

2. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春, 130034; 3. 中国石油东方地球物理公司, 涿州, 072751)

摘要: 实现了利用探地雷达直达波的包络峰值处瞬时频率来估计品质因子 Q 值的方法。地震理论中的子波可以由 4 个参数: 调制频率, 子波的能量衰减因子, 以及子波的幅度和相位来确定。在水平层状介质中, 设每层的 Q 值为常数 (即 Q 值和频率无关), 从平面波的单程波传播理论的频率域方程出发, 借助包络峰值处瞬时频率的定义, 经过公式推导可知, Q 值由包络峰值处的瞬时频率的变化, 传播时间以及子波能量衰减因子共同确定, 得到了利用探地雷达垂直雷达剖面数据 (Vertical radar profiling, VRP) 资料直达波的包络峰值处瞬时频率来估计 Q 值的方法。利用理论合成的实验数据以及野外实际数据对该算法的有效性和准确性进行了验证。

关键词: 探地雷达; 瞬时频率; 品质因子; 子波

中图分类号: P631.3

文献标志码: A

Quality Factor Q Estimation of GPR Signal

Zhang Lili¹, Liu Sixin², Wu Junjun³, Qu Lele¹

(1. College of Electronic Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang, 110126, China;

2. College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun, 130034, China;

3. BGP INC, China National Petroleum Corporation, Zhuozhou, 072751, China)

Abstract: The wavelet is confirmed by modulation frequency, energy attenuation factor of wavelet, the amplitude and phase of wavelet in seismic theory. Drawing lessons from this theory in this paper, the Q value is set as a constant in each layer of horizontally layered medium (Q value is independent of frequency). Firstly, the frequency-domain equation of the single pass propagation theory of plane wave is solved. Through the definition of envelope peak instantaneous frequency and the derivation of equation, it is shown that Q value is confirmed by the changes of envelope peak instantaneous frequency, the travel time and the wavelet energy attenuation factor. So the method to estimate Q value using envelope peak instantaneous frequency of VRP (vertical radar profiling) data direct wave of ground penetrating radar is obtained. At last, the effectiveness and accuracy of the method are verified using synthetic VRP data, synthesis experimental data and practical data.

Key words: ground penetrating radar (GPR); instantaneous frequency; quality factor; wavelet

引 言

探地雷达是用频率介于 1 MHz~1 GHz 的电磁波来确定地下介质分布的一种无损探测方法。由于其操作的简便性以及良好的分辨率, 在工程环

境等许多近地表探测问题中得到广泛的应用。雷达波在地下介质传播过程中由于地层的吸收效应而具有衰减和频散特性, 不同岩性、不同的岩石结构衰减特性和频散特性存在差异, 利用这一差异为区分岩性和研究岩体内部结构提供了可能。对于地层的这种效应, 通常可以用品质因子 Q 来衡量,

基金项目: 国家自然科学基金(61302172)资助项目; 辽宁省博士启动基金计划(20131085)资助项目; 辽宁省教育厅科学研究(L2013069)资助项目; 2013年东方地球物理公司中青年科技创新基金(11-06-2013)资助项目。

收稿日期: 2012-09-14; **修订日期:** 2013-06-11

它综合反映了许多关于岩性的信息。对探地雷达电磁波衰减及频散的描述可以归结为品质因子 Q 的影响,通过对 Q 的准确估计,可以掌握探地雷达高频脉冲电磁波在地下有耗介质传播过程的衰减特性机理,可以将其应用于因受外力影响引起的地下裂缝、空洞化等软弱岩石地基工程勘察研究中^[1-3]。由于地层的吸收效应引起的能量衰减和波形畸变,降低了探地雷达数据资料的分辨率,而提高探地雷达分辨率最常用到的方法主要有反 Q 滤波、反褶积和谱白化三种方法。探地雷达品质因子 Q 的估计也是进行反 Q 滤波的关键。

对于品质因子 Q 的估计,谱比法是最常用的一种方法,该方法根据 Kjartansson 常 Q 模型认为 Q 与频率无关^[4],波的傅里叶变换谱的对数比是频率的线性函数,通过拟合的方法求得这个线性函数的斜率,从而估计出地层的 Q 值^[5,6]。Irving 和 Knight 把 Youli Quan 等在地震领域提出的频率漂移法应用到了探地雷达 Q 值提取中,认为电磁波在传播过程中,振幅谱的中心频率经历了一个逐渐变低的过程,而中心频率降低的斜率与品质因素 Q 是密切相关的,通过求得这个斜率,进而就可获得 Q 值^[7],该方法的重点是利用时频分析理论准确地求得雷达波的中心频率的变化情况;王仰华提出了基于衰减函数和补偿函数的反射地震数据 Q 值分析^[8];李宏兵利用小波理论并结合地震波在黏弹性介质中的传播机理,在小波域上推导出了地震波能量衰减公式,并利用尺度能量公式,从反射地震数据中直接估计出了 Q 值^[9]。对于探地雷达品质因子 Q 的估计问题,即使是借助于地震上求 Q 值的算法,这方面的研究也很少。在假设地层为单一 Q 值的基础上,以往研究仅限于借鉴地震上常见的频谱比法和中心偏移法,这两种方法首先要用一个时间窗去截取一段探地雷达记录,然后计算截取记录的傅里叶谱,一旦时间窗的类型和长度选择不合适就可能使谱估计不准确,这将影响品质因子 Q 的估计精度。

1 方法原理

根据探地雷达电磁波传播理论,可以采用 3 个参数来描述有耗介质的衰减特性,即复介电常数、品质因子和衰减系数。这 3 个参数不是独立的,只是从不同的角度采用不同的方法来描述电磁波的衰减特性,因此它们是等价的。品质因子 Q 是表征高频电磁波衰减的一个重要物理参数, Q 值可以

定义为系统内储能与耗散能的比率

$$Q = 2\pi \frac{E}{\Delta E} \quad (1)$$

式中: E 表示系统内储能; ΔE 表示耗散能。

在水平层粘弹性介质中,设每个地层的 Q 值为常数,如果只考虑平面波的单程波传播过程(不考虑反射波),那么当位于地表处的雷达子波传播到深度为 z 处时,它的频率域表达式为^[10]

$$U(\omega, z) = GU(\omega, 0) \exp \left[-\frac{i\omega z}{c(\omega)} - \frac{\omega z}{2Qc(\omega)} \right] \quad (2)$$

式中: G 为独立于频率和吸收衰减的因子(包含几何色散在内); $c(\omega)$ 为相速度; $U(\omega, 0)$ 为雷达子波的频率域表达式。假设雷达子波可以用下面的表达式渐进逼近^[11]

$$u(t, 0) = A \left[\frac{\delta^2}{\pi} \right]^{\frac{1}{4}} \exp \left[i(\sigma t + \varphi) - \frac{(\delta t)^2}{2} \right] \quad (3)$$

式中: σ 为调制频率; δ 为子波的能量衰减因子; A 和 φ 分别表示子波的幅度和相位。式(3)中的子波由 4 个确定参数($A, \varphi, \sigma, \delta$)确定,所以它比雷克子波能更好地逼近实际的雷达子波,对式(3)两端做傅里叶变换得

$$U(\omega, 0) = A \left[\frac{4\pi}{\delta^2} \right]^{1/4} \exp \left[-\frac{(\omega - \sigma)^2}{2\delta^2} + \varphi \right] \quad (4)$$

如果忽略速度频散的影响,即 $c(\omega) = c$,把式(4)代入到式(2)中,可以得到

$$U(\omega, z) = AG \left[\frac{4\pi}{\delta^2} \right]^{1/4} \exp \left[-\frac{(\omega - \sigma)^2}{2\delta^2} + i \left[\varphi - \frac{\omega z}{c} - \frac{\omega z}{2Qc} \right] \right] \quad (5)$$

2 包络峰值处瞬时频率和地层 Q 值之间的关系

对于一个在品质因子为 Q 的均匀粘弹性介质中传播的常相位子波,在传播时间 τ 之后,它的包络峰值处瞬时频率等于以其傅里叶变换的振幅谱为权系数的加权平均频率^[12],即

$$f_p(\tau) = \frac{\int_0^{\infty} f A(\tau, f) df}{\int_0^{\infty} A(\tau, f) df} \quad (6)$$

式中: f 为频率; $\tau = \frac{z}{c}$ 为传播时间; $A(\tau, f)$ 表示子波传播时间 τ 之后的振幅谱。将式(4)代入到式(6)中,可以得到在探地雷达发射源处的子波包络峰值处瞬时频率,表示为

$$f_p(0) = \frac{\sigma}{2\pi} + \frac{\frac{1}{2} \frac{\delta^2}{2\pi^2} \exp\left[-\frac{2\pi^2}{\delta^2} \left[\frac{\sigma}{2\pi}\right]^2\right]}{\int_0^\infty \exp\left[-\frac{2\pi^2}{\delta^2} \left[f - \frac{\sigma}{2\pi}\right]^2\right] df} \quad (7)$$

将式(5)代入式(6)可以得到传播时间 τ 之后的包络峰值处瞬时频率为

$$f_p(\tau) = \left[\frac{\sigma}{2\pi} - \frac{\tau\delta^2}{4\pi Q}\right] + \frac{\frac{1}{2} \frac{\delta^2}{2\pi^2} \exp\left[-\frac{2\pi^2}{\delta^2} \left[\frac{\sigma}{2\pi} - \frac{\tau\delta^2}{4\pi Q}\right]^2\right]}{\int_0^\infty \exp\left[-\frac{2\pi^2}{\delta^2} \left[f - \frac{\sigma}{2\pi} + \frac{\tau\delta^2}{4\pi Q}\right]^2\right] df} \quad (8)$$

雷达子波的主频 $\frac{\sigma}{2\pi}$ 一般为几百 MHz 到 1 GHz 的范围,对于电磁波的传播时间 τ 一般是纳秒量级的,在探地雷达中品质因子 Q 的范围为 100 之内,而衰减因子 δ 的数量级为 10^8 ,所以经过估算可知 $\frac{\sigma}{2\pi}$ 比 $\frac{\tau\delta^2}{r\pi Q}$ 相差至少两个量级,如果忽略式(8)

右边第二项 $\frac{\tau\delta^2}{4\pi Q}$,那么式(8)可以近似表示为

$$f_p(\tau) = \left[\frac{\sigma}{2\pi} - \frac{\tau\delta^2}{4\pi Q}\right] + \frac{\frac{1}{2} \frac{\delta^2}{2\pi^2} \exp\left[-\frac{2\pi^2}{\delta^2} \left[\frac{\sigma}{2\pi}\right]^2\right]}{\int_0^\infty \exp\left[-\frac{2\pi^2}{\delta^2} \left[f - \frac{\sigma}{2\pi}\right]^2\right] df} \quad (9)$$

用式(7)减去式(9),可以得到

$$f_p(0) - f_p(\tau) \approx \frac{\tau\delta^2}{4\pi Q} \quad (10)$$

根据式(9)得出 Q 值的表达式

$$Q = \frac{(4\pi)^{-1} \delta^2 \tau}{f_p(0) - f_p(\tau)} \quad (11)$$

从式(11)可以看出,Q 值是由包络峰值处的瞬时频率的变化,传播时间 τ 以及子波能量衰减因子 δ 共同确定的。

3 探地雷达品质因子 Q 值的估计

要利用式(11)来估计 Q 值,就需要已知传输时间 τ 、子波能量衰减因子 δ 以及包络峰值处的瞬时频率。对于子波能量衰减因子可以用式(12)得到^[11]

$$\delta \approx (2\pi)^{-\frac{1}{2}} A_m^{-1} \int_0^\infty A(\omega) d\omega \quad (12)$$

式中: $A(\omega)$ 为雷达子波的振幅谱; A_m 为振幅谱 $A(\omega)$ 的最大值,对于子波的传输时间 τ 可以由雷达子波的到达时间之差来确定,对于包络峰值处的瞬时频率的估计问题,有很多算法^[13-15],本文采用的 Hilbert 变换方法来计算信号的瞬时频率^[15]。

4 模型实验

本文按照式(5)合成了数据(如图 1 所示),在图 1 模型中,探地雷达的子波中心频率为 100 MHz,地层 Q 值为 60,地层的厚度为 10 m,并且每隔 0.2 m 设置了一个接收点,相当于把地层介质分成了若干个薄层。利用 Hilbert 变换方法求得雷达波传播到每一个薄层顶端时信号的瞬时频率,再根据式(11)计算出每一个接收点处地层的 Q 值,如图 2 所示。从图中可以看出,利用包络峰值处瞬时频率来求地层 Q 值所得到的结果和理论值基本匹配。图 3 为采用频谱比法进行 Q 值估计的结果,为了使其结果和本文提出的方法具有可比性,对每一个薄层都利用频谱比法进行了 Q 值估计,从结果上可以看出,利用频谱比法估计的 Q 值没有本文提出的方法准确。

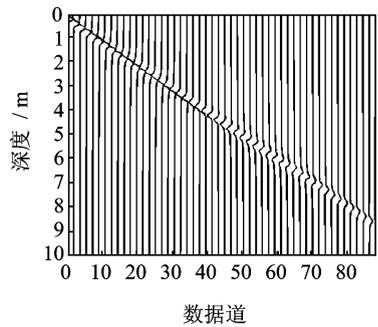


图 1 合成的探地雷达实验数据

Fig. 1 Synthesis experimental data of GPR

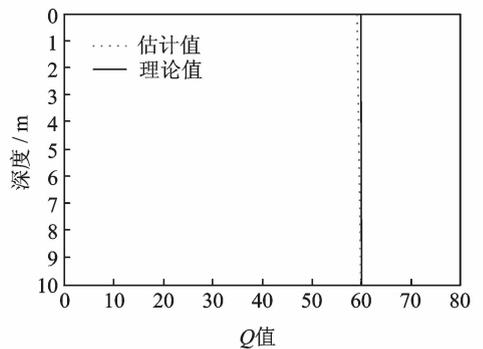


图 2 利用 VRP 数据直达波的包络峰值处瞬时频率求得的 Q 值与理论值的比较

Fig. 2 Comparison with the theoretical Q value and Q value obtained by the VRP data direct wave envelope peak instantaneous frequency

图 4 为实测数据剖面图,该实测数据为吉林省临江市八里沟子实验数据,结合该地形特点,采用井-地测量方式,采用固定接收天线,在钻孔中移动发射天线的方式,发射天线每隔 1 m 移动一次,频

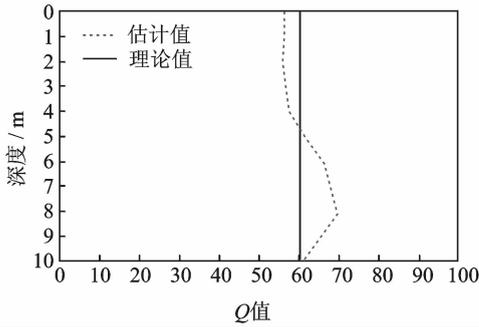


图 3 频谱比法估计的 Q 值与理论值的比较

Fig. 3 Comparison with theoretical Q value and Q value obtained by the spectral ratio method

率范围为 1~175 MHz, 采样点数为 1 601 点, 采样时间为 1 000 ns. 利用 VRP 数据直达波的包络峰值处瞬时频率求得的 Q 值如图 5 所示. 图 5 中是剔除了一些测量的坏道之后的结果, 可以看到, Q 值的跳跃性比较大, 主要是由于发射天线每次移动的距离比较大所影响的.

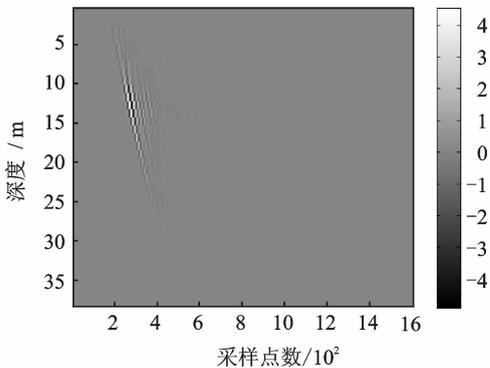


图 4 实测数据剖面图

Fig. 4 Measured data profiles

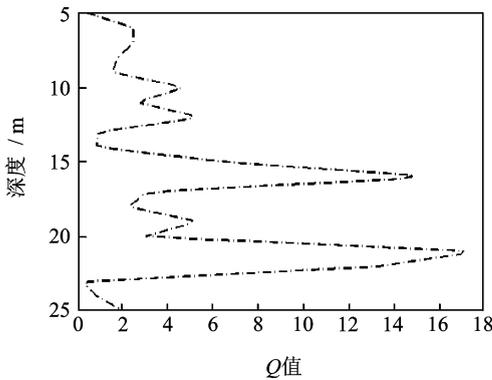


图 5 利用实测数据求得的 Q 值

Fig. 5 Q value obtained by the measured data

5 结束语

针对探地雷达品质因子 Q 值的估计问题, 本

文利用探地雷达直达波的包络峰值处瞬时频率的变化、传播时间以及子波能量衰减因子来共同确定探地雷达品质因子 Q 值的方法. 在仿真实验中, 可以看到文中的方法和探地雷达理论的 Q 值基本匹配, 验证了本文方法对求探地雷达品质因子 Q 值的有效性. 这种方法克服了谱比法和中心偏移法的一些缺点, 比如不需要选择可变的频带范围等. 本方法在估计 Q 值的过程中, 采用的是垂直雷达剖面 (VRP) 测量方式, 应用的是 VRP 数据, 数据中没有反射波的影响.

参考文献:

[1] Quan Youli, Harris J M. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method[J]. Geophysics, 1997, 62(3): 895-905.

[2] Turner G, Siggins A F. Constant Q attenuation of subsurface radar pulses [J]. Geophysics, 1994, 59(8): 1192-1200.

[3] 孙洪星, 李凤明. 探地雷达高频电磁波传播衰减机理与应用实例[J]. 岩石力学与工程学报. 2003, 21(3): 413-417.
Sun Hongxing, Li Fengming. Attenuation mechanism and application study of high impulse electromagnetic wave propagation of GPR[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 21(3): 413-417.

[4] Kjartansson E. Constant Q wave propagation and attenuation [J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(B9): 4737-4748.

[5] 张丽丽, 刘四新, 吴俊军, 等. 层状介质探地雷达信号 Q 值估计及反 Q 滤波[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(1): 265-270.
Zhang Lili, Liu Sixin, Wu Junjun, et al. Layered media Q estimation for GPR signal processing and the algorithm of inverse Q filtering[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(1): 265-270.

[6] Sarma L P, Ravikumar N. Q-factor by spectral ratio technique for strata evaluations[J]. Engineering Geology, 2000, 57(1): 123-132.

[7] Irving J D, Knight R J. Removal of wavelet dispersion from ground-penetrating radar data [J]. Geophysics, 2003, 68(3): 960-970.

[8] Wang Yanghua. Q analysis on reflection seismic data [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(17): 606-609.

[9] 李宏兵. 小波尺度域含气储层地震波衰减特征[J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 892-898.
Li Hongbing. Characteristics of seismic attenuation

- of Gas reservoirs in wavelet domain[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(5): 892-898.
- [10] Aki K, Richards P G. Quantitative seismology: Theory and methods[M]. San Francisco: W H, Freeman & Co, 1980.
- [11] 高静怀,杨森林,王大兴. 利用 VSP 资料直达波的包络峰值处瞬时频率提取介质品质因子[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 853-860.
- Gao Jinghuai, Yang Senlin, Wang Daxing. Quality factor extraction using instantaneous frequency at envelope peak of direct waves of VSP data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(3): 853-860.
- [12] Barnes A E. Instantaneous spectral bandwidth and dominant frequency with applications to seismic reflection data[J]. Geophysics, 1993, 58(3): 419-428.
- [13] 高静怀,廖祖文,陈文超. 高分辨地震资料瞬时频率提取方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(4): 331-334.
- Gao Jinghuai, Liao Zuwen, Chen Wenchao. On the method of instantaneous frequency estimate for high resolution seismic data[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(4): 331-334.
- [14] 钟佑明, 金涛, 秦树人. 希尔伯特-黄变换中的一种新包络线算法[J]. 数据采集与处理, 2005, 20(1): 13-16.
- Zhong Youming, Jin Tao, Qin Shuren. New envelope algorithm for Hilbert-Huang transform [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2005, 20(1): 13-16.
- [15] 陈杰鸿, 黄炜, 孙艳争. 基于希尔伯特谱的瞬时频率滤波方法[J]. 信号处理, 2009, 25(3): 482-484.
- Chen Jiehong, Huang Wei, Sun Yangzheng. A method of instaneous frequency domain filtering based on HHT[J]. Signal Processing. 2009, 25(3): 482-484.

作者简介:张丽丽(1979-),女,博士,研究方向:信号处理理论与应用以及电磁计算, E-mail: zll08@mails.jlu.edu.cn; 刘四新(1966-),男,教授,博士生导师,研究方向:探地雷达、钻孔雷达及电磁波测井; 吴俊军(1986-),男,博士,研究方向:石油及金属矿地球物理勘探、探地雷达及钻孔雷达; 屈乐乐(1983-),男,副教授,研究方向:雷达信号处理。

