

基于 S 变换的瑞利面波频散分析

马见青¹, 李庆春¹, 樊金生², 王美丁³

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西北有色地质勘查局 物化探总队, 陕西 西安 710068)

摘要: 提取面波频散曲线是面波资料处理中最关键的一步。由于时频分析方法的局限, 提出了利用 S 变换进行瑞利面波频散分析的方法, 并给出了具体算法。该方法在时间-频率域中计算相邻两道面波记录同一频率的时间差, 再利用道间距除以该时间差来得到该频率对应的相速度, 这样避免了在道间距较大的情况下, 传统的相位谱法可能造成相位差的缺陷。通过理论模型和实际资料对该方法进行了验证。结果表明, 该方法能够提高瑞利面波频散曲线的提取精度, 而且算法简单, 具有一定的实用性。

关键词: 时频分析; S 变换; 瑞利面波; 频散曲线

中图分类号: P631.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)02-0319-05

Rayleigh Wave Dispersion Analysis Based on S Transform

MA Jian-qing¹, LI Qing-chun¹, FAN Jin-sheng², WANG Mei-ding³

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Team of Geophysical and Geochemical Exploration, Northwest Bureau of Geology for Non-ferrous Metals, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract Extracting dispersion curve from surface wave is one of the important steps in analyzing surface wave. Because of the limitation of time-frequency analysis, S transform is put forwards to analyzing dispersion of Rayleigh wave and the specific algorithm is shown. Firstly, the method is used to calculate the time difference when two adjacent traces record the same frequency in temporal frequency domain, and secondly, track pitch divided by the time difference is phase velocity of the corresponded frequency. So, it avoids that the method of traditional phase may cause the defect of phase difference in the case of large distance. The method is verified based on theory model and actual data. The results show that it could improve the extraction accuracy of dispersion curves of Rayleigh wave and has some practical.

Key words: time-frequency analysis; S transform; Rayleigh wave; dispersion curve

0 引言

英国学者 Rayleigh^[1] 在 1887 年发现了瑞利面波, 证明了弹性半空间和无限介质之间的基本差别。20 世纪 50 年代初, Haskell^[2]、Knopoff^[3] 推导出层状介质中平面瑞利面波的频散方程并提出了求取频散曲线的方法。

瑞利面波具有以下 3 个特点: 在分层介质中, 具有频散特性; 波长不同, 穿透深度不同; 传播速度与横波传播速度具有相关性。前两个特点为瑞利

面波勘探提供了充分的理论依据, 第三个特点为该方法的应用开拓了广阔的前景^[4-5], 但如何通过实测叠加信号分离并计算得出高精度面波频散曲线, 一直没有一个有效的解决方法。

过去相当长一段时间内, 信号处理都是基于平稳信号的时不变系统进行的, 而对于像瑞利面波这样的非平稳信号, 仍采用上述方法处理就受到很大限制。于是, 在传统的傅里叶变换基础上, 提出并发展了一系列时频分析方法。例如短时傅立叶变换 (STFT)^[6]、连续小波变换 (CWT)^[7] 等, 其算法简单,

收稿日期: 2009-10-26

基金项目: 交通部国家西部交通建设项目 (200731881262); 国家高技术研究发展计划项目 (2007AA06Z103)

作者简介: 马见青 (1984-) 男, 山西忻州人, 工学博士研究生, 从事地震资料数据处理及多波多分量研究, E-mail: majianqing1984@126.com

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

且无交叉干扰,但受海森堡测不准原则的限制,时频分辨率不能同时达到最好。美国地球物理学家 Stockwell 等^[8]于 1996 年提出的 S 变换是介于 STFT 和 CWT 之间的一种非平稳信号分析处理方法。与 STFT 和 CWT 相比, S 变换有许多独特优势: S 变换的反变换与傅立叶变换有直接联系,保证其是无损变换;线性变换保证其不存在交叉项;时频分辨率与信号的频率有关;基本小波不必满足容许性条件等。笔者基于 S 变换进行瑞利面波频散分析,试图找到一种新的提取瑞利面波频散曲线的思路。

1 瑞利面波的频散特性

1.1 瑞利面波频散理论

由弹性波理论可知,地震波在半无限弹性介质中传播时,在介质分界面上出现一类波,这类波沿界面在弹性介质内部传播,其振幅随离开界面的距离增加而衰减,这种波就是瑞利面波。其传播速度满足方程^[4]

$$\left(\frac{V_R^2}{V_S^2}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R^2}{V_S^2}\right)^4 + 8\frac{2-\nu}{1-\nu}\left(\frac{V_R^2}{V_S^2}\right)^2 - \frac{8}{1-\nu} = 0 \quad (1)$$

式中: V_R 为瑞利面波的相速度; V_S 为横波速度; ν 为泊松比。由此可知, V_R 与频率无关,也就是说在半无限介质自由界面上产生的瑞利面波无频散现象。但实际情况是地下介质总有层薄的疏松覆盖层。瑞利面波的相速度为

$$V_R = \frac{-\rho_0 \omega \pm \sqrt{(\rho_0 \omega)^2 + 16\mu(6\mu - 2\rho_0 \omega)/V_P}}{2(6\mu - 2\rho_0 \omega)/V_P} \quad (2)$$

式中: μ 为弹性系数; ρ_0 为单位面积密度; ω 为角频率; V_P 为纵波速度。因此覆盖层的存在使得瑞利面波的相速度成为 ω 的函数,也就是说实际探测到的瑞利面波具有频散现象。

瑞利面波的频散特性给学者提供了提取瑞利面波相速度的可能性。层状介质瑞利面波频散曲线的正演分析表明,曲线的高频部分与浅层介质相对应,曲线的低频部分与深层介质相对应,曲线的拐点与介质的分层界面相对应,这样,就可以确定岩土介质的分层情况^[9]。

1.2 利用相位谱法提取瑞利面波频散曲线

提取瑞利面波频散曲线的主要内容之一是求相速度。常规求相速度的方法是相位谱法,它是建立在简谐波理论基础之上的。该方法有 2 个明显的缺陷^[4, 10-15]:

(1)通过互相关谱求相位差时,由于傅里叶变

换的相位变化范围为 $[-\pi, \pi]$, 因此相邻 2 个检波器之间的距离不能大于面波最小波长。

(2)对于频率很低的单频波,即使满足了检波器距离的条件,但其相位差 $\Delta\Phi$ 仍有可能很小,而这样一个极小误差会带来较大的相速度误差。

2 利用 S 变换提取瑞利面波频散曲线

2.1 S 变换基本理论

地震信号 $x(t)$ 的 S 变换定义为

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) w(\tau - t) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

式中: $S(t, f)$ 为信号 $x(t)$ 的 S 变换; $w(t)$ 为窗函数; t 为垂向传播时间; f 为瑞利面波传播频率; τ 为窗函数的中心。其中

$$w(t) = |f| e^{-f^2 t^2 / 2} / \sqrt{2\pi} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),就得到了 S 变换的具体形式

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) |f| e^{-f^2 (\tau - t)^2 / 2} e^{-i2\pi f\tau} / \sqrt{2\pi} d\tau \quad (5)$$

2.2 S 变换提取瑞利面波频散曲线的实现步骤

通过道间距为 d 的两道瑞利面波信号 $x(t)$ 的时频谱,可以直接求出各频率成分的相速度。

(1)分别对相距 d 的 2 个检波器所接收到的信号 $x(t)$ 做 S 变换,可以得到两张时频谱。

(2)固定频率 f , 分别在 2 张时频谱上寻找该频率能量极值点所对应的时间 t_1, t_2 , 可计算出该频率在 2 张时频谱上的时间差 Δt 为

$$\Delta t = |t_2 - t_1| \quad (6)$$

这个时间差就是该频率以其相速度传播在 2 个检波器之间形成的时差。

(3)相速度 $V_R(f)$ 的计算

$$V_R(f) = d / \Delta t \quad (7)$$

(4)把每个频率 f 在各道间求得的 $V_R(f)$ 数据作统计平均,即

$$V_R = Nd_m / \sum_{m=1}^N \Delta t_m \quad (8)$$

式中: N 为面波记录总道数; Δt_m 为频率为 f 的第 $m+1$ 和第 m 道之间的时间差; $m=1, 2, \dots, N$ 。这样就得到最终的频散谱 $f-V_R$ 。

3 模型正演试验

根据地震波波动方程,瑞利面波在均匀空间的传播方程为

$$\varphi(x,z,t) = Ae^{-kV_1z}e^{ik(x-V_Rt)}$$

式中: A 为瑞利面波的振幅; $k = \omega/V_R$, $V_1 = [1 - (V_R/V_P)^2]^{1/2}$ 。如果 V_P 远大于 V_R , 则可以忽略 V_1 。此时, $t = z/V_R$, $\omega = 2\pi f$, 公式可以简化为

$$\varphi(x,z,t) = Ae^{-2\pi ft}e^{i2\pi f\left(\frac{x}{V_R}-t\right)} \tag{9}$$

如果知道瑞利面波速度 V_R 和频率 f , 该公式可用于计算出 $x-t$ 域的面波正演记录。当存在有多组瑞利面波时, 根据傅里叶定理可知, 任何一个脉冲波可以分解为无限多个简谐振动之和; 反过来, 如果知道了某个波的各个单频波分量, 就可以通过合成求出这个波。因此, 由一个记录道形成的物理机制可知, 地面观测到的记录, 就是这些波的总和, 也就是说, 通过合成求出的波就是地面检波器接收的记录。

现假设由 3 个瑞利面波分量叠加而成的两道瑞利面波记录, 参数见表 1, 道间距为 5 m, 模型数据如图 1。对上面两道瑞利面波模型记录进行 S 变换, 得到其时频谱(图 2)。在时频谱中可以清楚看到, 合成记录的每一频率分量都能独立分辨出来, 而且根据式(9), 瑞利面波的频率随时间线性变化, 这也符合面波的频散特性。因此, 在 f_1 、 f_2 、 f_3 处并不是对应于整个时频谱的能量极值点, 这一点应引起注意^[12]。

表 1 瑞利面波模型参数

Tab. 1 Parameters of Rayleigh Wave Model			
分量编号	频率/ Hz	速度/(m ° s ⁻¹)	
f_1	10	300	
f_2	20	200	
f_3	40	100	

表 2 表明, 用 S 变换获得的时频谱能够准确得到面波的相速度, 而且精度高。并且从图 2 可以看出, 随着频率的增大, 分辨率随之提高。

表 2 瑞利面波模型测试参数

Tab. 2 Test Parameters of Rayleigh Wave Model					
分量编号	模型道 1 时间/ ms	模型道 2 时间/ ms	时差/ ms	相速度/ (m ° s ⁻¹)	与理论值 误差/ %
f_1	730	746	16	312. 50	4. 17
f_2	426	452	26	192. 31	3. 84
f_3	221	272	51	98. 04	1. 96

4 实际资料试算

图 3 是在山西省运城市采集的单炮实际面波记录, 用 Geopense2404 地震采集仪采集, 检波器主

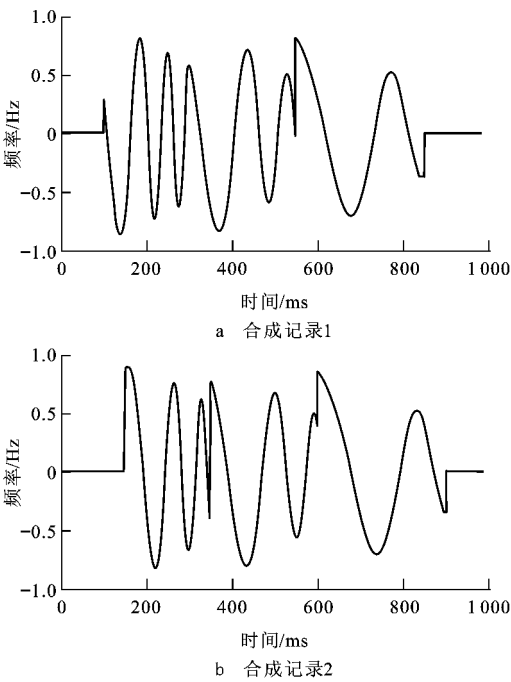


图 1 两道合成记录
Fig. 1 Two Synthetic Records

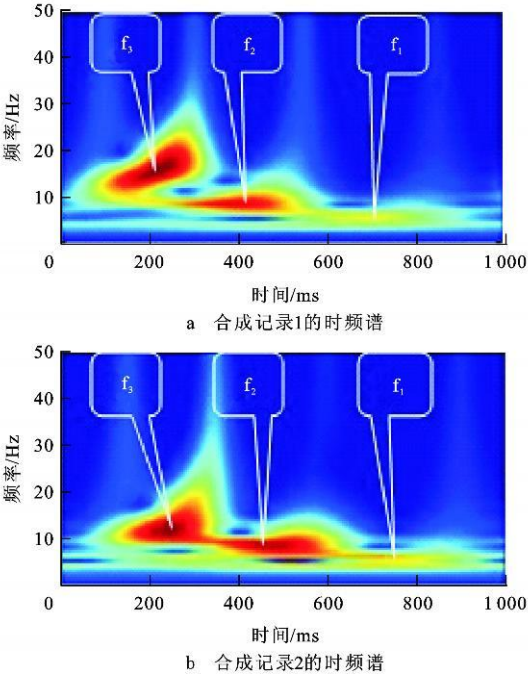


图 2 两道合成记录的 S 变换时频谱
Fig. 2 Time frequency Spectrums of Two Synthetic Records Based on S Transform

频为 4 5 Hz, 36 道接收, 偏移距为 6 m, 道间距为 1 m, 采样点数 1 024 个, 采样率 0.5 ms。图 4 是经过滤波处理后的面波记录。

在相邻两道数据的时频谱中首先确定某一频

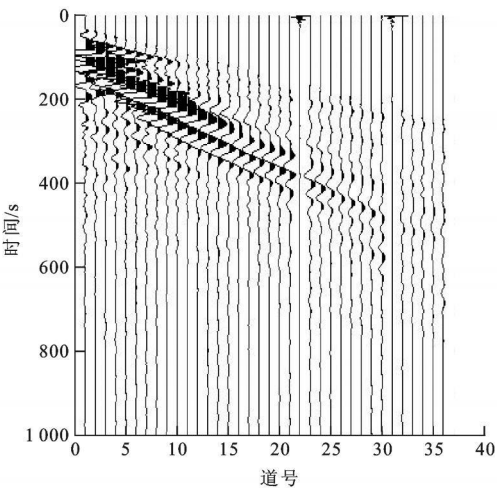


图 3 实际面波记录

Fig. 3 Real Surface Wave Record

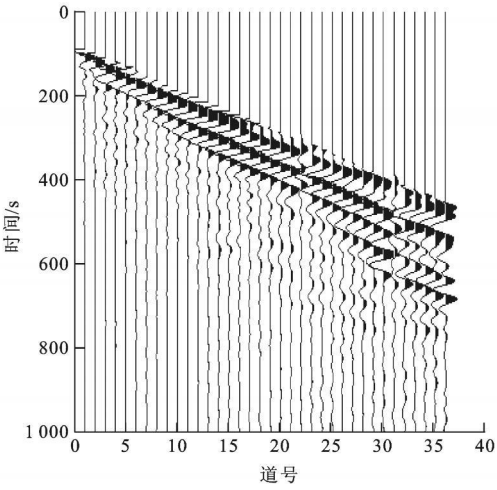


图 4 滤波处理后的面波记录

Fig. 4 Surface Wave Record After Filtering

率,然后在这 2 张时频谱上寻找该特定频率的能量极值点所对应的时间,计算时间差值;接着用这两道数据之间的道间距除以这一时间差,这样就得到了该特定频率的一个相速度值,对所有的道经过以上相同处理,就可以得到该频率的多个相速度值,对这些值进行统计平均,就得到该频率的一个频率—相速度值,对所有的频率进行以上步骤处理,并将得到的频率—相速度值连成线,就得到了频散曲线。

以第 15、16 道数据的处理为例来解释该方法。图 5 是第 15、16 道数据进行 S 变换得到的时频谱图,分别在 2 张时频谱上寻找频率为 25 Hz 的极值点所对应的记录点 321 和 338,时间差为 8 5 ms;道间距为 1 m,这样,频率为 25 Hz 所对应的一个

相速度为 117. 65 m/s, 用同样的方法, 就可以得到不同频率对应的相速度, 即频散曲线。

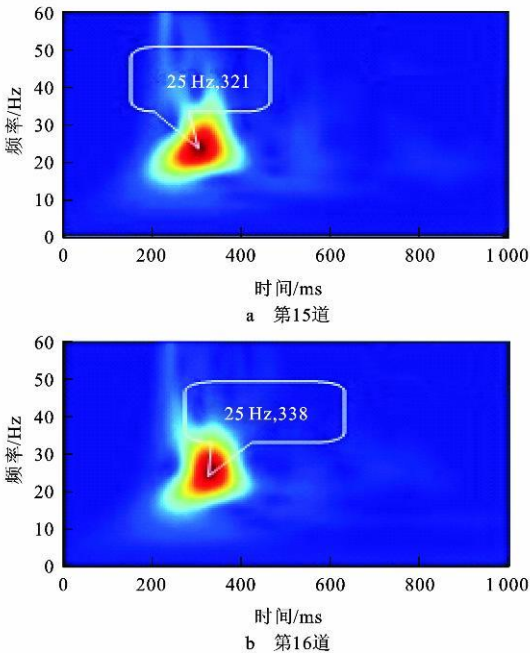


图 5 第 15、16 道记录的 S 变换时频谱

Fig. 5 Time-frequency Spectrums of the Records of 15th and 16th Based on S Transform

将频率转换成波长,并以半波长表示勘测深度,可以得到工程勘探中常用的相速度—深度图(图 6)。

5 结语

(1)S 变换是一种分析非平稳信号的时频分析方法,克服了 STFT 窗口不能随频率变化以及 CWT 的尺度和频率没有直接对应关系的缺点,实现了时频域的局部化。

(2)S 变换避免了用传统的相位谱法提取瑞利面波频散曲线时,在道间距较大的情况下,计算得到相邻两道瑞利面波分量的相位可能会相差 2π 的整数倍的限制。

(3)数值分析及实际资料试算表明,采用 S 变换进行瑞利面波频散曲线提取是一种新的思路,但该方法提取瑞利面波频散曲线的前提是在时间域内资料有很高的信噪比,尽量不要包含高频的反射信号,这种条件在目前去噪技术已经很成熟的情况

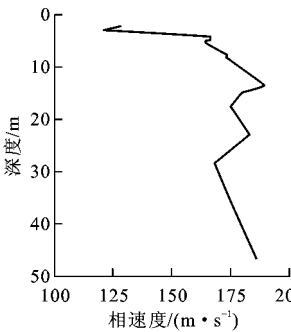


图 6 相速度—深度曲线

Fig. 6 Phase Speed-depth Curve

下,完全可以满足。

(4)由于S变换中的基本小波函数形态固定,使得其在实际应用中受到限制,建议进行广义S变换提取瑞利面波频散曲线的研究。

参考文献:

- [1] Rayleigh L. On Waves Propagated Along the Plane Surface of an Elastic Solid[J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1887(17): 4-11.
- [2] Haskell N A. The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1953, 43(1): 17-34.
- [3] Knopoff L. A Matrix Method for Elastic Wave Problems[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1964, 54(1): 431-438.
- [4] 杨成林. 瑞雷波勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [5] 李庆春, 邵广周, 刘金兰, 等. 瑞雷面波勘探的过去、现在和未来[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(3): 74-77.
- [6] Garbo D. Theory of Communication[J]. Journal of Institute for Electrical Engineering, 1946, 93(3): 429-457.
- [7] Gressmann A, Morlet J. Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape[J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1984, 15(4): 723-736.
- [8] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the Complex Spectrum; the S Transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.
- [9] 胡建平, 包乾宗, 陈亚东, 等. 时频分析在实测瞬态瑞雷波相速度提取中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(6): 53-55.
- [10] 孙党生, 李国占, 焦凯英, 等. 基于时频分析的瑞雷波相速度提取及其应用[J]. 勘察科学技术, 2003(3): 58-60.
- [11] 彭文, 王亮. 瑞雷面波频散特征的时频分析方法及应用[J]. 物探化探计算技术, 2006, 28(3): 233-237.
- [12] 孔令召, 侯兴民, 陈建立. 基于时频分析方法提取瞬态瑞利波频散曲线[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(6): 8-13.
- [13] 田仁飞, 张固澜. 基于时频误差分析法的随机介质波场特征分析[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(6): 29-32.
- [14] 陈亚东. 时频分析在瑞雷面波相速度提取中的应用[D]. 西安: 长安大学, 2003.
- [15] 王运生, 王家映, 郭玉松, 等. 实测面波频散曲线计算方法研究与应用实例[J]. 工程勘察, 2004(6): 60-63.
- (上接第296页)
- [14] Svarstad H, Petersen L K, Rothman D, et al. Discursive Biases of the Environmental Research Framework DPSIR[J]. Land Use Policy, 2008, 25(1): 116-125.
- [15] 王娟. RS-GIS-EIS技术支持下的吉林西部生态环境集成研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [16] 谭克龙, 高会军. 中国半干旱生态脆弱带遥感理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [17] 王让会. 遥感及GIS的理论与实践——干旱内陆河流域脆弱生态环境研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [18] 孟庆香. 基于遥感、GIS和模型的黄土高原生态环境质量综合评价[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [19] 王开运, 邹春静, 张桂莲, 等. 生态承载力复合模型系统与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [20] 王静. 土地资源遥感监测与评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [21] 洪增林, 薛惠锋. 城市土地集约利用潜力评价指标体系[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(1): 106-110.
- [22] 李秉成. 第四纪与环境[J]. 西安工程学院学报, 2001, 23(2): 63-64.
- [23] 杜雄. 华北农牧交错区农业资源适度开发与农牧业可持续发展研究[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2008.
- [24] 陈凤臻. 全球变化下松辽平原生态环境变迁研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [25] 左伟. 基于RS、GIS的区域生态安全综合评价研究——以长江三峡库区忠县为例[M]. 北京: 测绘出版社, 2004.
- [26] 杨达源, 姜彤. 全球变化与区域响应[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [27] 卢文岱. SPSS for Windows 统计分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.