

刘玉萍, 李丽青, 薛花, 等. 短时单频脉冲震源的海洋浅地层剖面资料频移处理[J]. CT 理论与应用研究, 2014, 23(2): 227-235.
Liu YP, Li LQ, Xue H, et al. Frequency shift processing for the hypocenter with short-term single-frequency pulse in the ocean sub-bottom profile data[J]. CT Theory and Applications, 2014, 23(2): 227-235.

短时单频脉冲震源的海洋浅地层剖面资料频移处理

刘玉萍^{1,2}, 李丽青^{1,2}, 薛花^{1,2}, 邓桂林^{1,2}, 张宝金^{1,2}✉

1. 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510075
2. 广州海洋地质调查局, 广州 510760

摘要: 采用短时单频脉冲震源的浅地层剖面, 记录的波形数据空间假频较严重。因其信号具有频率高、频带窄的特征, 通常利用 Hilbert 变换提取瞬时振幅属性(信号包络)供解释使用。但瞬时振幅均为正值, 在进行构造解释时不方便使用。本文提出在对浅层剖面资料提取瞬时振幅的基础上, 计算瞬时振幅的微分并配合滤波的方法, 实现高频窄带浅地层剖面资料的一种频移处理。该方法把高频窄带的多周期信号变为低频带宽的单周期信号, 有效扩展了倍频程并消除假频。应用在南海浅地层剖面资料处理中, 资料处理后更利于构造解释。

关键词: 浅地层剖面; 频移; Hilbert 变换; 瞬时属性; 空间假频

文章编号: 1004-4140 (2014) 02-0227-09 中图分类号: P 631 文献标志码: A

海洋浅地层剖面探测是一种基于水声学原理, 连续走航式探测海底浅部地层结构和构造的地球物理方法^[1]。该方法实际上类似单道地震采集, 并直接在地震时间剖面上成像的一种探测方法, 可利用高频小能量的声发射换能器震源对应高频声接收换能器获得高分辨率的浅层地震剖面, 也可以利用低频大能量的震源(例如电火花、气枪)与较低频的地震波接收换能器获得深度较深的地震剖面。海上用声接收器接收并在船上用专用记录仪器记录由沉积层中的波阻抗界面反射来的地震反射波^[2-6]。

不同的浅地层剖面仪器记录的浅剖数据形式不同, 目前常见的有两种记录方式: 一种是用于反演计算海底的反射系数, 进而定量地对海底底质进行分类的真振幅信号; 另一种是广泛应用于海洋沉积层探测的振幅包络信号。

真振幅信号对地层结构的微小变化反应比较灵敏, 能分辨层内较为精细的结构, 这种对地层结构变化反应的“过度灵敏”使得主层位的大振幅及其邻近的内部层位的小振幅混合在一起, 从而使主层位附近振幅“毛刺”过多难以清晰的辨别; 而包络信号能使主频大大降低, 往往只有几百赫兹, 它忽略了地层内部的细微变化, 过滤了这些“毛刺”, 从而使主地层层位较为清晰显示出来, 这就是我们一般采用包络信号的浅地层剖面数据进行地质解释的原因^[7]。

然而, 在浅地层剖面采集过程中, 短时单频脉冲震源频率一般很高, 范围从几十至几千赫兹之间, 经过地层反射回来后的振幅信号主频也较高, 可达几千赫兹, 但由于采集仪器等原因, 频带往往相当窄。好的频宽既要看绝对频宽的宽度又要看频段的位置。分辨率

除了与频宽有关之外,还与倍频程密切相关。对于这种短时单频脉冲信号的地震数据,往往会引起严重的空间假频现象,导致后续的横向空间处理无法继续。因此在处理过程中要针对这种高频窄带信号的波形特征进行频移处理,以消除空间假频现象。目前较为广泛使用的 Chirp 信号浅地层剖面数据,不存在空间假频现象,也就不需要进行频移处理。

目前,希尔伯特(Hilbert)变换是获得窄带信号瞬时属性的一种有效方法,地震信号是实信号,在复信号分析方法中需计算其对应的复信号^[8-9]。Hilbert 变换是地震信号处理中常用的方法,即首先计算待分析地震信号的 Hilbert 变换,将其结果作为虚部,待分析的地震信号作为实部,构成复信号,然后利用该复信号计算瞬时频率,本文将这类方法称为基于 Hilbert 变换的瞬时振幅提取法^[10]。高频窄带信号的瞬时振幅往往是稳定的,起伏波动较小。

我们研究了一种基于 Hilbert 变换的频移处理技术,基本原理是:通过对数据进行 Hilbert 变换获得其瞬时振幅属性;然后对瞬时振幅求微分,使频谱得到展宽;最后选取合适的带宽滤波处理,实现频移,消除空间假频的同时增加倍频程,从而提高资料的分辨率。此处理的重要作用是把多周期的谐振波形变为单周期的波形。

1 方法原理

1.1 瞬时振幅和 Hilbert 时频谱

对于一个实值的信号 $x(t)$, 可以构造它的解析信号如下:

$$c(t) = x(t) + iH(t) \quad (1)$$

$H(t)$ 是信号 $x(t)$ 的 Hilbert, 即:

$$H(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2)$$

(1) 式还可以写为:

$$c(t) = A(t)e^{i\phi(t)} \quad (3)$$

其中 $A(t)$ 为瞬时振幅, $\phi(t)$ 为瞬时相位,

$$A(t) = (x^2(t) + H^2(t))^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\phi(t) = \text{Arg}[c(t)] \quad (5)$$

其中 Arg 为复数的辐角主值, 可以得到瞬时频率 $f(t)$:

$$f(t) = \frac{d\phi(t)}{2\pi dt} = \frac{1}{2\pi} \frac{x(t)H'(t) - H(t)x'(t)}{x^2(t) + H^2(t)} = \frac{1}{2\pi} \frac{x(t)H'(t) - H(t)x'(t)}{A^2(t)} \quad (6)$$

一般情况下,出于防止分母出现为零的考虑,通常采用阻尼瞬时频率 $f_d(t)$ ^[11]:

$$f_d(t) = \frac{d\phi(t)}{2\pi dt} = \frac{1}{2\pi} \frac{x(t)H'(t) - H(t)x'(t)}{A^2(t) + \varepsilon A^2(t)} \quad (7)$$

为了获得有实际意义的瞬时属性, 对信号还有很多约束条件^[12]:

- (1) 必须是窄带信号;
- (2) 信号的均值为零;

(3) 信号必须是局部对称的。以上的条件如果不满足, 所求出的瞬时频率就会出现异常值或是负数的现象。

简单地说, Hilbert 变换为信号与 $1/t$ 的卷积, 因此, 其特点是强调局部属性, 这就避免了用傅里叶变换时为拟合原始数列而产生的许多多余的、事实上并不存在的高低频成分^[13]。

计算瞬时振幅的微分:

$$A(t)' = \frac{x(t)x'(t) + H(t)H'(t)}{(x^2(t) + H^2(t))^{\frac{1}{2}}} = \frac{x(t)x'(t) + H(t)H'(t)}{A(t)} \quad (8)$$

为了防止分母出现零值情况, 把 $A(t)'$ 重新定义为带阻尼的振幅微分 $A_d(t)'$:

$$A_d(t)' = \frac{x(t)x'(t) + H(t)H'(t)}{A(t) + \varepsilon A(t)} \quad (9)$$

根据傅里叶变换性质, 瞬时振幅微分的频谱 $F[A_d(t)']$ 有:

$$F[A_d(t)'] = iwF[A_d(t)] \quad (10)$$

1.2 基于 Hilbert 变换的频移技术原理

下面用一个实际的多周期谐振波形信号说明 Hilbert 变换频移技术原理, 图 1 是真振幅信号波形及频谱, 脉冲长度为 2 ms, 采样间隔为 0.04 ms。信号频率基本集中在 4 000 Hz 左右, 频带相当窄, 主频约为 4 000 Hz。

叠后数据空间假频的门槛频率公式为:

$$f_{\max} = \frac{v}{4 \Delta x \sin \theta} \quad (11)$$

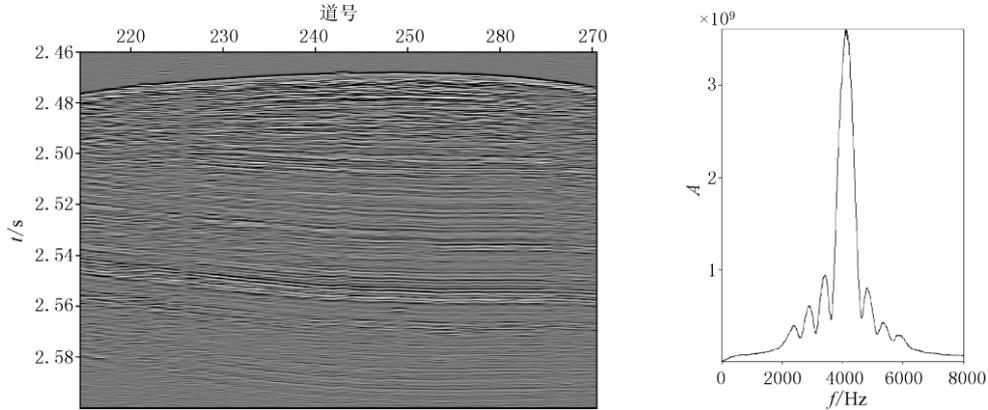
这里道间距 $\Delta x \approx 6.7$ m, 浅剖是自激自收采集的, 因此 θ 接近 90° , 浅地层速度 v 一般小于 3 000 m/s 很容易计算出 4 000 Hz 远远超过了门槛频率, 数据频率过高, 存在严重的空间假频。

基于 Hilbert 变换的频移处理具体实现过程如下:

(1) 首先, 对原始的真振幅信号进行 Hilbert 变换, 获得它的瞬时振幅属性, 瞬时振幅属性类似于真振幅信号对应的包络信号。图 2 是原始真振幅信号经过 Hilbert 变换后的瞬时振幅属性及频谱。可以看到, Hilbert 变换后信号的振幅谱比较稳定, 近似指数形式。指数谱对应的信号与脉冲信号互为微积分的关系, 因此很容易想到对瞬时振幅属性进行微分处理。

(2) 根据公式 (2) 可知, Hilbert 变换是一个积分过程, 通过对 Hilbert 变换后信号的瞬时振幅属性求微分, 微分后信号的频谱明显得到展宽。图 3 为图 2 微分后的结果及频谱。

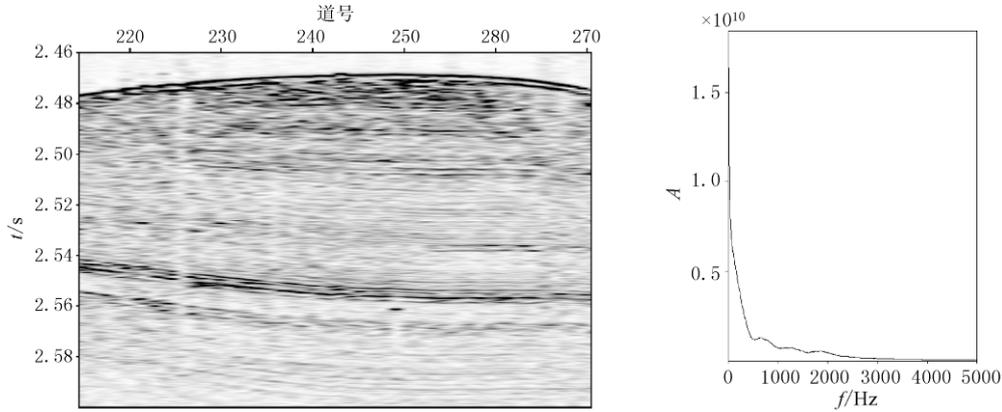
(3) 信号频谱得到了展宽, 但由于脉冲长度为 2 ms, 高频成分对信号分辨率没有贡献, 分辨率仍然很低; 同时, 为了将方法推广到倾斜地层的地震资料, 需要保证有效频率在门



(频率基本集中在 4 000 Hz 左右, 有效频带范围为 3 500~4 500 Hz, 倍频程数 < 1)

图 1 原始真振幅信号及频谱

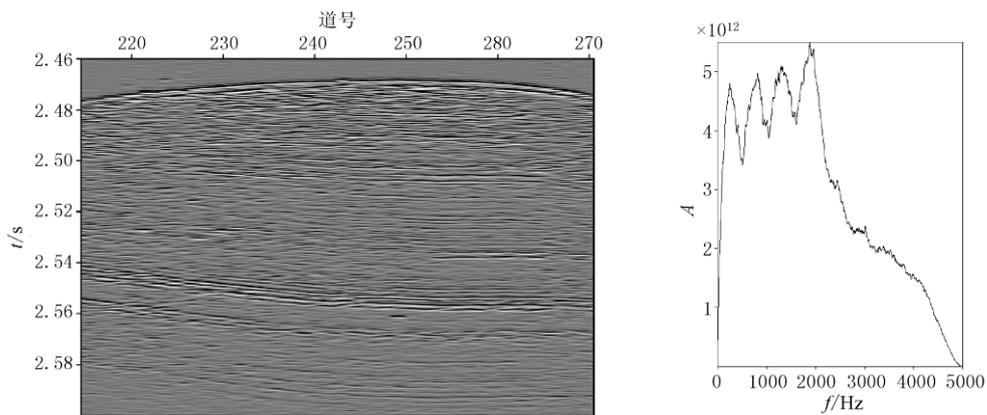
Fig.1 The original true-amplitude signal and spectrum



(频谱近似指数形式, 指数谱对应的信号与脉冲信号互为微积分的关系)

图 2 真振幅信号 Hilbert 变换后的瞬时振幅属性及频谱

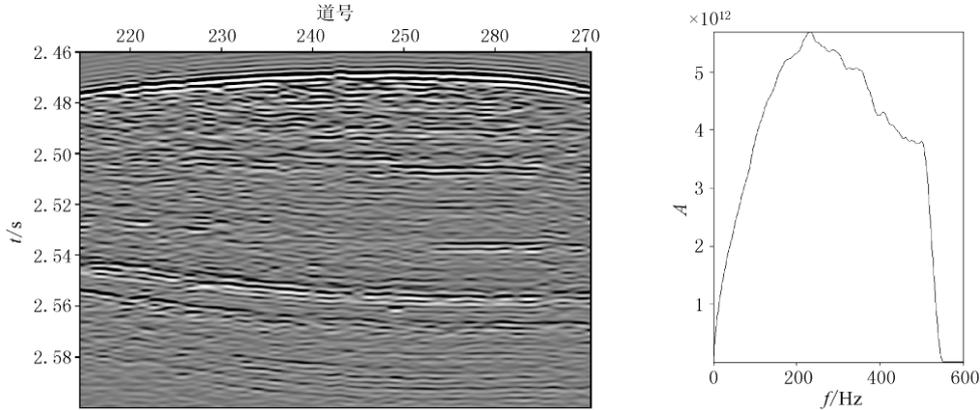
Fig.2 Instantaneous amplitude and spectrum of true-amplitude signal after Hilbert



(频谱明显得到展宽, 低频成分得到补偿, 有频带范围为 50~2 600 Hz, 倍频程数 > 5)

图 3 瞬时振幅属性微分结果及频谱

Fig.3 The differential result and spectrum of instantaneous amplitude attribute



(频率降低到截止频率范围以内, 空间假频得到消除)

图 4 微分结果带通滤波后的信号及频谱

Fig.4 The signal of differential result and spectrum after bandpass filter

槛频率范围以内。因此, 需要根据脉冲长度及门槛频率选择合适带宽进行滤波处理, 把多周期的谐振波形变为单周期的波形, 实现降频, 消除空间假频的同时增加倍频程, 便于后续的横向空间处理。图 4 是图 3 按照 0~5~500~550 Hz 带通滤波后的结果, 最终处理的结果同相轴明显增多。对比图 1 和图 4 的频谱, 频率大大降低了, 频宽基本没变, 倍频程得到增加, 提高了信号的分辨率。

(4) 此外, 频率降低以后, 可以对数据进行重采样, 能减小数据存储空间, 有效地提高后续处理的效率。

2 实际地震资料应用

图 5 是德国 ATLAS 公司生产的 Parasound P70 全海域参量浅层剖面仪在南海海域某工区采集的一条浅地层测线, 由于该浅层剖面仪基于多参量差频技术, 造成原始资料频率基

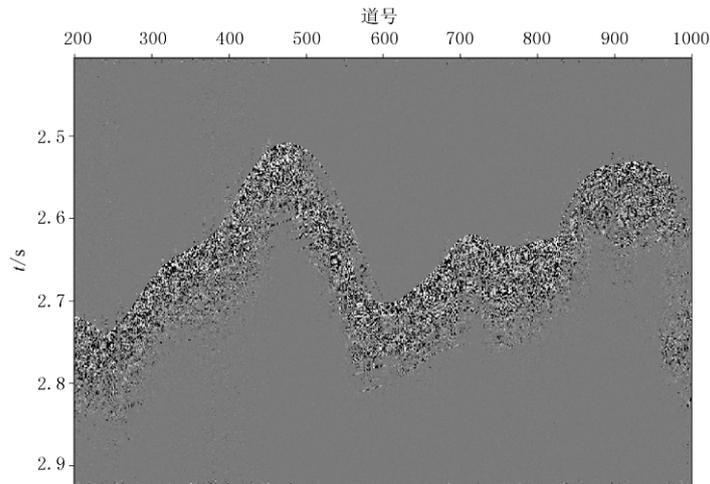


图 5 南海海域某工区浅地层的真振幅剖面图

Fig.5 The sub-bottom true amplitude profile of a area in the South China Sea

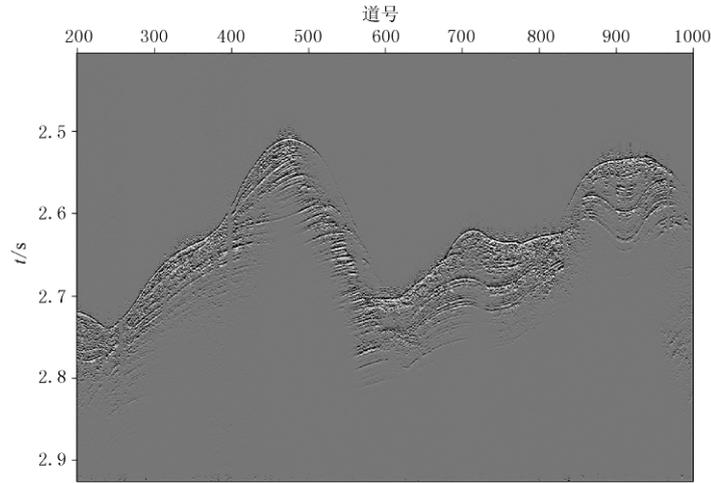
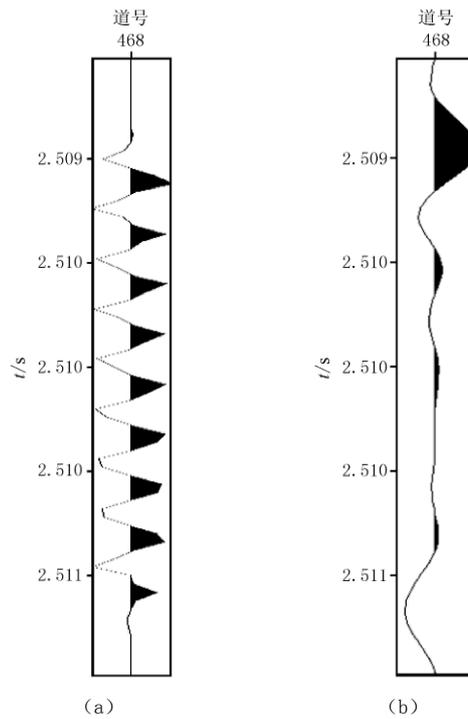


图 6 频移处理后的浅地层剖面图

Fig.6 The sub-bottom profile after frequency shift processing



(频移处理后, 多周期谐振波形变为单周期波形)

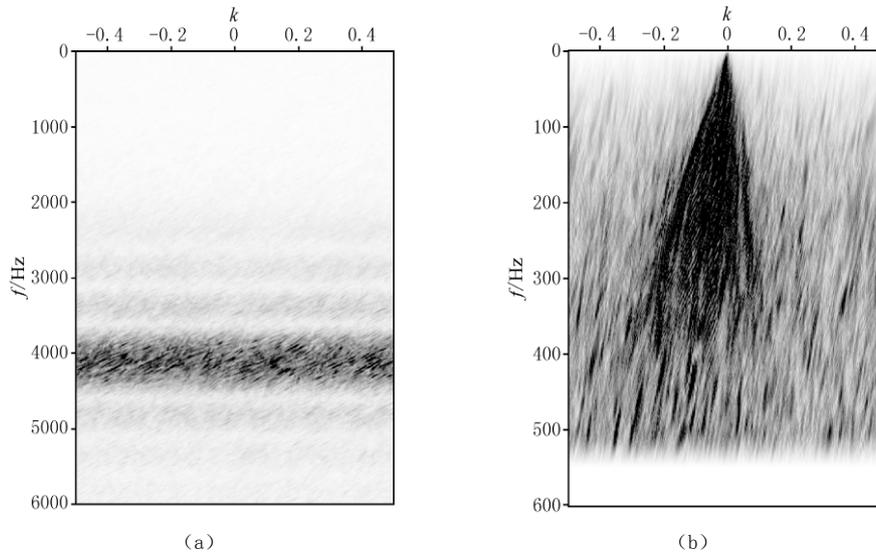
图 7 频移处理前 (a) 和后 (b) 的放大波形对比图

Fig.7 The comparison of enlarged waveform before and after frequency shift processing

而常规的炸药震源、气枪震源或电火花震源激发产生的子波都有一个明显可识别的主瓣。这种多周期单频窄带浅剖记录只有在合理的比例尺或者以包络信号形式显示时, 主要地层层位才能被显示出来。

图 6 是图 5 经过频移处理后的浅地层剖面图。图 7 频移处理前 (a)、后 (b) 的放大波形对比图, 频移处理后, 多周期谐振波形变为单周期的波形。图 8 是频移处理前 (a)、后 (b) $f-k$ 谱对比图, 明显看出处理后 $f-k$ 谱存在扇形特征, 有明显的视速度。资料空间假频现象得到消除, 便于后续的横向空间处理。

对比图 5 和图 6, 可以看出, 经过频移处理后, 同相轴增多了; 处理前同相轴模糊不清, 处理后同相轴被很清晰的显示出来, 一致性和连续性得到大大提高。



频移处理 $f-k$ 谱存在扇形特征, 有明显的视速度, 空间假频现象得到消除

图 8 频移处理前 (a) 和后 (b) $f-k$ 谱对比图

Fig.8 The comparison of $f-k$ spectrum before and after frequency shift processing

3 结论

本文首先详细阐述了基于 Hilbert 变换频移处理方法的基本原理, 采用这种频移处理技术对南海海域某工区浅层剖面地震资料进行了处理, 通过与处理前资料对比分析, 从剖面层位成像效果、放大波形和 $f-k$ 谱特征上都体现了本文所提出的频移处理方法的有效性。处理后主地层层位被清晰地显示出来, 为后续的地质解释和海底沉积物反射系数、孔隙度反演等工作奠定了良好的基础。资料空间假频现象得到消除, 便于后续的横向空间处理。

此外, 处理后频率得到大大降低, 在不影响分辨率的前提下, 可以对数据进行重采样处理。能大大减小数据量, 便于数据的存储管理。

参考文献

- [1] 李一保, 张玉芬, 刘玉兰, 等. 浅地层剖面仪在海洋工程中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(1): 4~8.
Li YB, Zhang YF, Liu YL, et al. Application of sub-bottom profiler to ocean engineering[J].

- Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(1): 4-8.
- [2] 刘保华, 丁继胜, 裴彦良, 等. 海洋地球物理探测技术及其在近海工程中的应用[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(3): 374-384.
Liu BH, Ding JS, Pei YL, et al. Marine geophysical survey techniques and their applications to offshore engineering[J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(3): 37-384.
- [3] 余江, 周兴华, 李京兵. 浅地层剖面仪在淤泥厚度探测中的应用[J]. 浙江水利科技, 2009, 166(6): 52-54.
- [4] 熊章强, 方根显. 浅层地震勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [5] 赵铁虎, 张志珣, 许枫. 浅水区地层剖面测量典型问题分析[J]. 物探化探计算技术, 2002, 24(3): 215-219.
Zhao TH, Zhang ZX, Xu F. Analysis of typical problem for shallow acoustic surveying in the shallow waters[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 24(3): 215-219.
- [6] 谢忠球. 浅层地震探测技术应用中的分辨率问题[J]. 矿产与地质, 1999, 13(70): 112-116.
Xie ZQ. Resolution problem about the application of shallow seismic prospecting technique[J]. Mineral Resources and Geology, 1999, 13(70): 112-116.
- [7] 郑红波, 阎贫, 王彦林, 等. 基于希尔伯特变换的 Chirp 信号浅地层剖面数据分析及转换[J]. 海洋技术, 2012, 31(1): 91-95.
Zheng HB, Yan P, Wang YL, et al. Sub-bottom profile data analysis and transformation for the Chirp signal based on Hilbert transform[J]. Ocean Technology, 2012, 31(1): 91-95.
- [8] Taner MT, Koehler F, Sheriff RE. Complex seismic analysis[J]. Geophysics, 44(6): 1041-1063.
- [9] Boashash B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal-part1: Fundamentals[J]. Proceedings of IEEE, 1992, 84(4): 520-538.
- [10] 石颖, 刘洪. 地震信号的复地震道分析及应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(5): 1538-1543.
Shi Y, Liu H. Complex seismic trace analysis of seismic signal and its application[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(5): 1538-1543.
- [11] Huang NE. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[M]. Proceedings of the Royal Society, 1998, 903-995.
- [12] 张尔华, 王晓凯, 高静怀, 等. 局部瞬时频率提取及其在大庆油田中的应用[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(3): 1064-1069.
Zhang EH, Wang XK, Gao JH, et al. Local instantaneous frequency extracting method and its application to the Daqing Oilfield[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(3): 1064-1069.
- [13] 杨培杰, 印兴耀, 张广智. 希尔伯特拟黄变换地震信号时频分析与属性提取[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1585-1590.
Yang PJ, Yin XY, Zhang GZ. Seismic signal time-frequency analysis and attributes extraction based on Hilbert[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(5): 1585-1590.

Frequency Shift Processing for the Hypocenter with Short-term Single-frequency Pulse in the Ocean Sub-bottom Profile Data

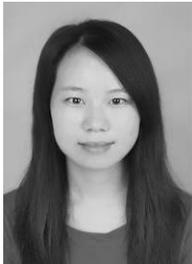
LIU Yu-ping^{1,2}, LI Li-qing^{1,2}, XUE Hua^{1,2}, DENG Gui-lin^{1,2}, ZHANG Bao-jin^{1,2}✉

1.Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510075, China

2.Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China

Abstract: The spatial aliasing of waveform data which is recorded using the short-term single-frequency pulse in the sub-bottom profile is serious. Usually the instantaneous amplitude attribute (signal envelope) is extracted for interpretation using the Hilbert transform for its signal has a characteristic of high frequency and narrow-band. However, instantaneous amplitude is always positive, so it is not convenient to use when performing structural interpretation. In this paper, on the basis of the extraction of instantaneous amplitude in the sub-bottom profile data, calculating the differential of instantaneous amplitude cooperated the filtering achieve frequency shift processing for high-frequency narrow-band signal in sub-bottom section. This method converts a multi-cycle signal with high-frequency narrow-band to a Single-cycle signal with low-frequency bandwidth, which effectively extends the octave and eliminates aliasing. Application in the South China sea sub-bottom profile data, the data is more conducive to structural interpretation.

Key words: sub-bottom profile; frequency shift; Hilbert transform; instantaneous attributes; spatial aliasing



作者简介: 刘玉萍 (1987—), 女, 硕士, 2012年毕业于中国石油大学(北京)地球探测与信息技术专业, 研究方向为高精度浅剖处理和转换波静校正, 现在广州海洋地质调查局资料处理研究所从事地震资料处理方面的工作, Tel: 020-82023875, E-mail: liu-yuping@163.com; 张宝金✉ (1973—), 男, 2003年博士毕业于同济大学固体地球物理学专业, 研究方向为地震资料处理和地震波正反演, 现在广州海洋地质调查局资料处理研究所从事地球物理资料分析方面的工作, Tel: 020-82250163, E-mail: zhangbaojinchg@163.com。