

文章编号:1673-5005(2008)06-0051-06

等间距地震道插值的傅里叶重建法

王立明¹, 刘保华^{1,2}, 王揆洋²

(1. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 地震采集过程中经常会碰到的大空间采样、坏道和数据分布不规则等问题, 影响了地震处理及成像效果。针对上述问题, 提出了一种改进插值方法, 即扩大原来的空间距离长度, 使空间波数采样变密, 然后根据似二维 F-K 频谱图里取中间某一范围的频谱值, 就可以去掉噪声和假频, 振幅也可得到很好加强。理论和实际地震数据测试结果验证了修改后的方法插值效果好。

关键词: 地震采集; 插值; 傅里叶系数; 非二次模型权函数; 稀疏反演; 似二维 F-K 频谱

中图分类号: P 631.4

文献标识码: A

Interpolating equal group interval seismic traces by Fourier reconstruction

WANG Li-ming¹, LIU Bao-hua^{1,2}, WANG Kui-yang²

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

2. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: The problems of large spatial sampling, dead traces and irregular sampling often happen in seismic acquisition, which are suboptimal to process seismic data and obtain imaging results. Therefore, an improved interpolation method was proposed. Extending original length of spatial distance, thickening spatial and wavenumber sampling and taking out certain spectra by similar 2D F-K spectra can eliminate noise and alias, and also enhance the amplitude. The tests of synthetic models and real seismic data prove that good interpolation results can be obtained by the improved method.

Key words: seismic acquisition; interpolation; Fourier coefficients; non-quadratic model weight function; sparse inversion; similar 2D F-K spectra

地震数据采集过程中, 经常出现空间采样密度不足、坏道和数据分布不规则等问题。这些问题常常影响到地震处理效果, 并最终影响地质解释^[1-3]。为了解决上述问题, 地震资料数据处理中常常使用地震道插值技术。此技术能降低采集成本与提高成像质量, 目前有多项式拟合法、最佳内插算子法、F-K 域内插法、Radon 变换地震道插值、预测误差滤波法等插值方法^[2-7]。Zwartjes 等^[8-10]提出了非二次模型权函数的稀疏反演傅里叶重建(FRSI)方法。此方法用最小结构标准, 或稀疏模型的期望值代替最小能量标准, 用非二次正则项加权函数代替二次模型权函数, 以达到压制平滑、有利稀疏解的模型。用

这种方法进行非等距道插值时, 插值结果准确性高, 但对等间距地震道不能准确地进行插值, 不能去掉产生的空间假频, 空道插值的振幅较弱, 效果差。笔者在前人工作基础上, 提出一种改进的插值方法。

1 方法原理

1.1 非等距离散傅里叶变换(NDFT)

傅里叶重建过程中, 首先把要插值的地震数据中的每一道从时间域变换到频率域, 即 $p(x_n, f)$ 。如果在位置 $[x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]$ 上空间采样获得的 $p(x_n, f)$ 是非等间距数据时, 就不能用离散傅里叶变换(DFT), 而只能用非等距离散傅里叶变

收稿日期: 2008-01-17

基金项目: 国家“863”计划项目(20060109A1004)

作者简介: 王立明(1978-), 男(汉族), 浙江文成人, 博士研究生, 主要从事地震勘探资料处理研究。

换(NDFT)^[1,11-12]计算傅里叶系数 $\bar{p}_{\text{NDFT}}(m\Delta k, f)$, 表达式为

$$\bar{p}_{\text{NDFT}}(m\Delta k, f) = \sum_{n=0}^{N-1} p(x_n, f) \exp(jm\Delta kx_n) \Delta x_n. \quad (1)$$

其中

$$\Delta x_n = (x_{n+1} - x_{n-1})/2,$$

$$\Delta k = 2\pi/(x_{N-1} - x_0).$$

式中, $\Delta x_0, \Delta x_1, \dots, \Delta x_{N-1}$ 为道权, 它们可以补偿不同的空间采样密度; f 为频率; 空间带宽为 $[-M\Delta k/2, M\Delta k/2 - 1]$ 。

反过来, 用傅里叶系数 $\bar{p}_{\text{NDFT}}(m\Delta k, f)$ 计算空间非等距的离散傅里叶逆变换为

$$p(x_n, f) = \frac{\Delta k}{2\pi m} \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \bar{p}_{\text{NDFT}}(m\Delta k, f) \exp(-jm\Delta kx_n).$$

在实际应用时, 用快速不等距离散傅里叶变换(NFFT)代替 NDFT^[13-15] 进行计算。

1.2 稀疏反演傅里叶重建(FRSI)方法

该方法是基于找省时模型结构或是稀疏解的模型^[8,16-17]。这种压制平滑、有利稀疏解的模型是通过非二次函数项来调整。非二次函数可使罚函数达到最小, 不会像二次函数那样剧烈增加, 保证重建的地震数据稳健回归。

在稳健回归中, 非二次罚函数强加到残差里; 在稀疏反演中, 这些罚函数又强加到模型参数中。二次模型罚函数引起的阻尼因子是对所有的模型参数加相等的权; 而非二次模型罚函数对大的模型参数加权要比小的模型参数少。得到道权大的参数, 阻尼就越大; 通过这种方式, 使反演结果更好。FRSI方法建立的目标函数为

$$J = \frac{1}{\sigma_n^2} \|W^{1/2}(p - A\bar{p})\|_2^2 + \|C_p^{-1}\bar{p}\|_2^2. \quad (2)$$

其中

$$[W]_{nn} = \frac{1}{2} |x_{n+1} - x_{n-1}|, [A]_{nm} = \frac{\Delta k}{2\pi} \exp(-jm\Delta kx_n),$$

$$[p]_n = \bar{p}(x_n, f), [\bar{p}]_m = \bar{p}(m\Delta k, f).$$

把 $z = C_p^{-1}\bar{p}$ 代入式(2), 重写为

$$J = \frac{1}{\sigma_n^2} \|W^{1/2}(p - \tilde{A}z)\|_2^2 + \|z\|_2^2.$$

其中

$$\tilde{A} = AC_p.$$

使目标函数 J 达到最小值的方程为

$$\tilde{z} = (\tilde{A}^H W \tilde{A} + \sigma_n^2 I)^{-1} \tilde{A}^H W p. \quad (3)$$

式中, A^H 为厄米特共轭矩阵, 即 A 的共轭转置矩阵; 标量 σ_n^2 为先验噪声。

把式(3)展开, 可写为

$$\hat{p} = C_p (C_p A^H W A C_p + \sigma_n^2 I)^{-1} C_p A^H W p.$$

反演中可以选择许多不同的函数作为非二次罚函数项, 非二次函数项的一般形式为

$$[C_p]_{ii} = (\sigma_p^2 + \bar{p}_i^* \bar{p}_i)^a.$$

式中, $\bar{p}_i^*$ 为 $\bar{p}_i$ 的共轭复数; $a = 1/2, 1, 2$ 分别为 ζ_{-2} 函数、Cauchy 函数和 Geman-McClure 函数。当然, a 也可选择其他正实数。矩阵 C_p 中的向量 $\bar{p}$ 是独立的, $\bar{p} = A^H W p$ 。尺度参数 σ_p^2 用来调节稀疏量, 实际中取值是对 $\bar{p}$ 中各分量平方后, 选其中最大值, 然后与人为给定的某一百分率值相乘得到。

1.3 稀疏 F-K 傅里叶变换的参数选取

FRSI 插值方法对于等间距大空间采样的地震数据不能准确地进行道插值, 效果差。因此, 必须对该插值方法进行修改。

首先得到一张似二维 F-K 频谱图, 它的纵轴是频率轴, 横轴是空间波数轴。与常用的二维 F-K 频谱不同之处在于从空间域变换到波数域的傅里叶变换算子不是 $\bar{p} = A W p$, 而是 $\bar{p} = A^H W p$ 。通过变换后的似二维 F-K 频谱图上显示, 地震数据的有效波能量集中于以 0 为中心的中间地带, 这样就有利于取中间一定范围的频谱进行反演。

接着, 原来的空间波数采样率 $\Delta k = 2\pi/(x_{N-1} - x_0)$ 不能再用, 而用下式作为空间波数采样率:

$$\Delta k_2 = 2\pi/[(j_i + 1)(x_{N-1} - x_0)].$$

式中, Δk_2 为修改后的空间波数采样率; j_i 为相邻道中连续空道道数。相邻道中能达到最大连续空道道数而插值出好的结果, 是受似二维 F-K 频谱图所决定。

同时, 原来空间波数域中的总点数 M 也变为 $L = \lfloor k_{\max}(j_i + 1)M/(1/2\Delta x) \rfloor = \lfloor 2k_{\max}\Delta x(j_i + 1)M \rfloor$ 。

式中, L 为改动后的空间波数域中的总点数的整数值; $k_{\max}$ 为依据似二维 F-K 频谱图在空间波数域内取某一实数变量, $k_{\max} \in [0, 1/(2\Delta k)]$ 。通过变小空间波数采样率 Δk_2 , 增大空间波数总采样点 L , 就能有效地压制噪声、假频并增强道振幅能量。

从似二维 F-K 频谱图中, 显示有效波能量大部分都集中于以 0 值为中心的频谱中间, 噪声、假频都在边部, 因此, 很容易取到 $k_{\max}$; 进而在 $[-k_{\max}, k_{\max}]$ 范围内, 用改进后的 FRSI 插值方法进行道插值。

2 稀疏反演傅里叶重建算法的实现

稀疏反演傅里叶重建算法通过 NFFT 结合共轭梯度法解决。

首先,用原来的 Δk 和 M ,求得一张似二维 F-K 频谱图。把要插值的地震数据,用快速傅里叶变换从时间域变到频率域;依据式 $\hat{p} = A^H W p$,用 NFFT 从空间域变到波数域,得到似二维频谱图。由此,可确定参数 $k_{\max}$, Δk_2 和 L 。

接着运行修改后的 FRSI 插值方法,步骤如下:

①输入已知要插值的地震数据、地震道权值 W 及一些基本相关参数。

②用 FFT 把已知地震数据从时间域变到频率域中,得 p 。

③用 NFFT 求 $A^H W p$,即 $\hat{p}$ 。

④由 $\hat{p}$ 可得 C_p ,用 NFFT 求出 $C_p A^H W A C_p$,即 G 。

⑤由共轭梯度法,可对 $\hat{p} = C_p G^{-1} C_p \hat{p}$ 解方程组,得 $\hat{p}$ 。

⑥通过快速傅里叶逆变换,把 $\hat{p}$ 从频率域变为时间域。

⑦如果满足要求,就得到插值数据,退出程序;否则,通过调整 $k_{\max}$ 值和更新向量 $\hat{p}$,继续步骤③~⑥。

程序运算中,尺度参数 σ_p^2 的影响得到减弱,只要固定一个百分比值就行,而 $k_{\max}$ 的取值作用影响变大。

3 理论模型试验

测试等间距地震的原始模型如图 1 所示。共 76 道,道间距为 10 m。图 2 是把原始模型中的偶数地震道抽去后的等间距地震模型,道间距为 20 m。FRSI 的尺度参数 σ_p^2 设为 1%。

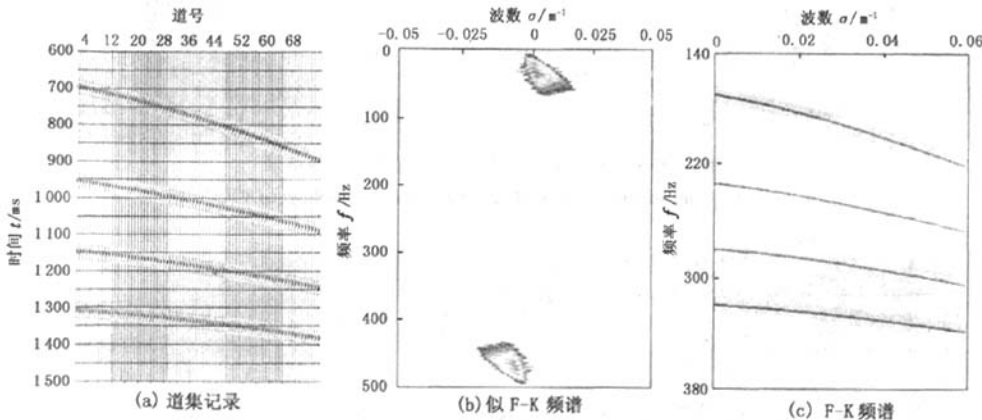


图 1 原始理论模型

Fig.1 Original theoretical model

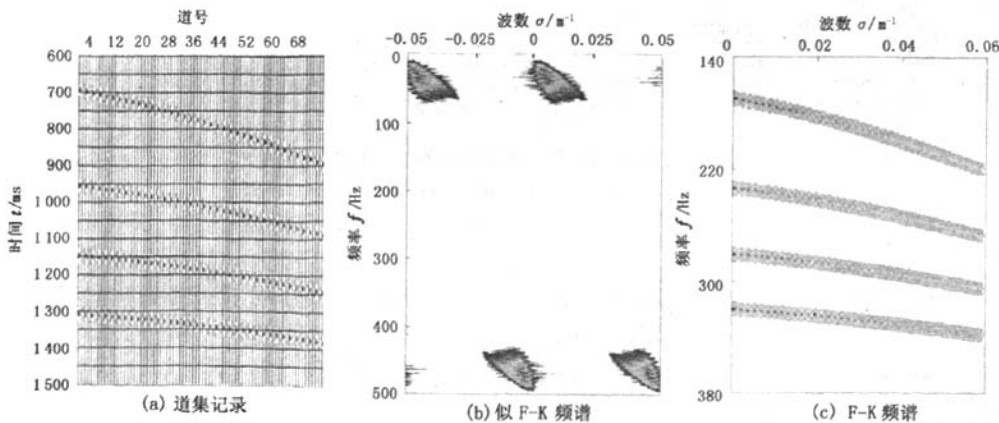


图 2 偶数为空道的地震模型

Fig.2 Theoretical model of even empty traces

图 3 和图 4 分别是用未改动的和修改后的 FR-SI 重建方法运算得到的插值结果。

图 3(a) 插值结果质量很差;图 3(b) 上重复出现 2 次相同的能量团;图 3(c) 也显示了空道处能量弱,右边部出现强能量假频。这些都造成了插值结果质量差。图 4(a) 是通过 $k_{\max}$ 取 0.025, 把似二维

频谱范围限制在 $[-0.025, 0.025]$ 反演出来的结果,与原始图 1(a) 几乎一样,没有产生额外的噪声,插值的空道振幅能量强,道与道之间的振幅波形也很协调;图 4(b) 与原始图 1(b) 显示的能量团几乎一致,显然能反演出好的结果;图 4(c) 上反射波同向轴的能量团与图 1(c) 相同,没有假频产生。

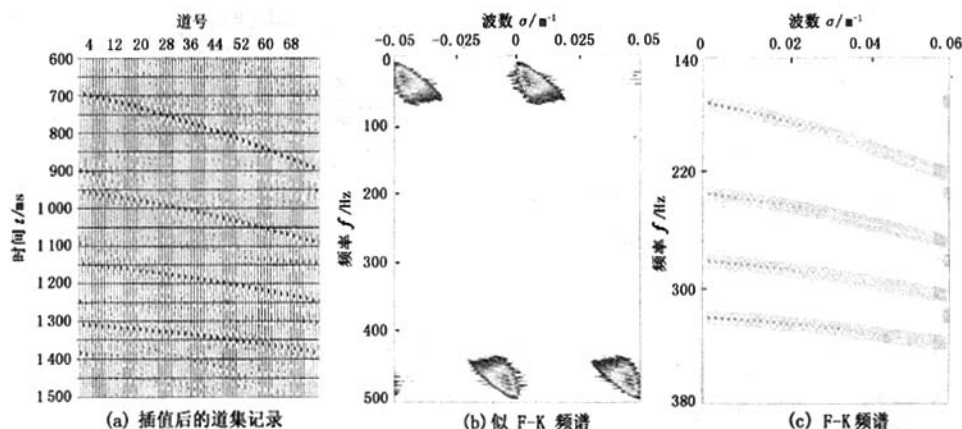


图 3 用未改动的 FR-SI 得到的地震模型的插值结果

Fig. 3 Interpolation results of seismic model by unchanged FR-SI

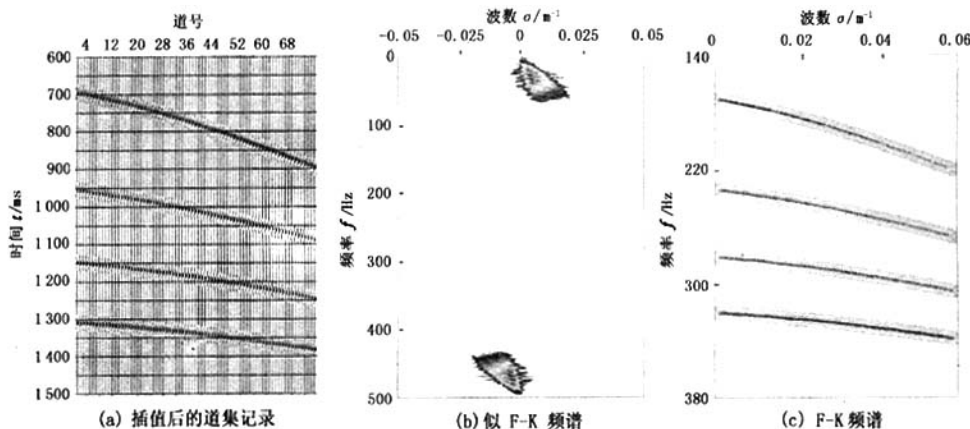


图 4 用修改后的 FR-SI 得到的地震模型的插值结果

Fig. 4 Interpolation results of seismic model by changed FR-SI

4 实际资料试验

用某海域的实际叠加地震剖面对修改后的 FR-SI 方法进行测试,图 5 是实际原始剖面图,共 80 道。图 6 是抽去偶数道的等间距地震剖面。图 7 是用修

改后的 FR-SI 得到的插值结果,尺度参数 σ_f^2 设为 1%, $k_{\max}$ 取 0.16。图 7(a) 与图 5(a) 比较,振幅波形和相位都能很好地拟合,地震剖面基本一致;由图 7(b) 中能量团基本上与图 5(b) 相同;图 7(c) 中同向轴能量与原始图 5(c) 一样。

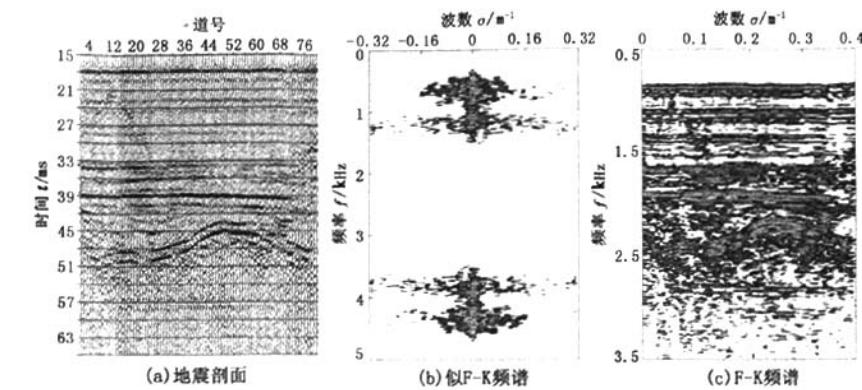


图 5 原始实际地震剖面
Fig. 5 Original real seismic profile

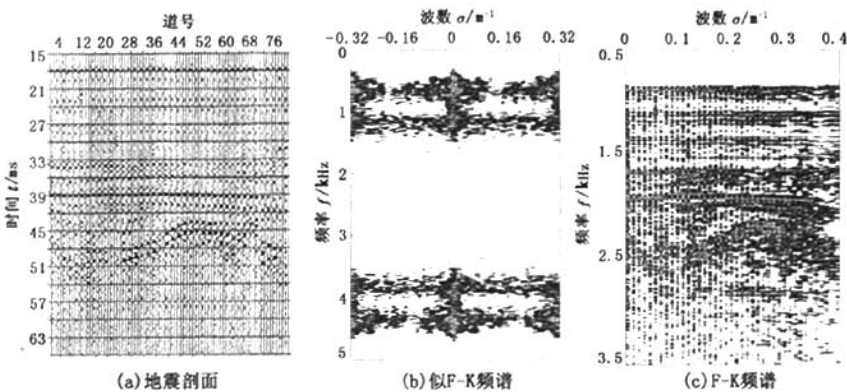


图 6 偶数为空道的实际地震剖面
Fig. 6 Real seismic profile of even empty traces

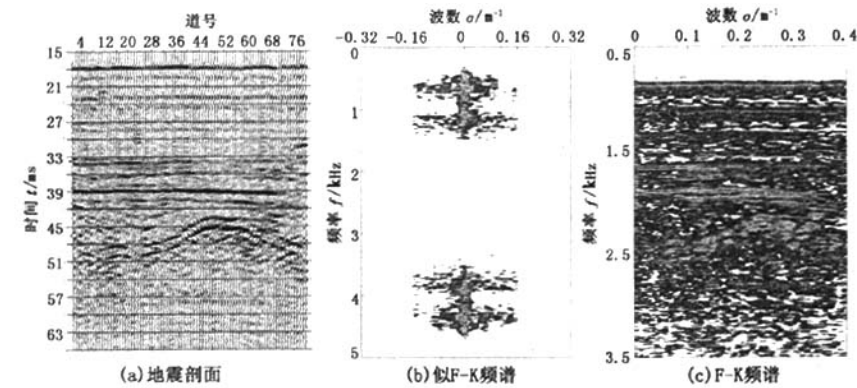


图 7 用修改后的稀疏反演傅里叶重建得到的实际地震资料的插值结果
Fig. 7 Interpolation results of real seismic data by changed FRSI

5 结束语

通过理论地震模型和实际地震剖面的测试,修改后的稀疏反演傅里叶重建方法要比未改动的稀疏反演傅里叶重建方法好。它利用了未改动的稀疏反

演傅里叶重建算法的优点,即:假设信号是由少数傅里叶系数组成的;在目标函数中加入非二次模型罚函数项,依靠频谱的复杂性来调整间距;当选择了合适的参数,就可得到想要的插值结果。所提出的修改方法,不但能去除噪声和假频,而且空道处的能量

也能得到加强,对于等道距剖面能很好地进行插值。由于是用快速非等距离散傅里叶变换(NFFT)和共轭梯度法运算,该方法大大缩短了计算时间,很快得到想要的插值结果。因此,该方法在实际中可以广泛地推广、使用。

参考文献:

- [1] DUIJNDAM A J W, SCHONEWILLE M A, HINDRIKS C O H. Reconstruction of band-limited signals, irregularly sampled along one spatial direction [J]. *Geophysics*, 1999, 64: 524-538.
- [2] 张红梅, 刘洪. 基于稀疏离散 τ - p 变换的叠后地震道内插[J]. *石油地球物理勘探*, 2006, 41: 281-285.
ZHANG Hong-mei, LIU Hong. Interpolation of poststack seismic traces based on sparse discrete τ - p transform [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2006, 41(3): 281-285.
- [3] 吕小伟, 陈小宏, 刁顺. 利用 L1 范数求取道间时差技术进行地震道插值[J]. *石油地球物理勘探*, 2003, 38(6): 618-622.
LÜ Xiao-wei, CHEN Xiao-hong, DIAO Shun. Seismic trace interpolation by using L1 norm to calculate time-difference between traces [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2003, 38(6): 618-622.
- [4] TRAD D, ULRYCH T, SACCHI M. Latest views of the sparse radon transform [J]. *Geophysics*, 2003, 68: 386-399.
- [5] 周竹生, 陆江南. 一种快速有效的地震道空间内插方法[J]. *物探化探计算技术*, 2000, 22: 211-215.
ZHOU Zhu-sheng, LU Jiang-nan. A fast and effective seismic trace interpolation method [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2000, 122(3): 211-215.
- [6] 王建立, 郭树祥, 杨长春, 等. 广义谱分解地震道内插方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2002, 37(1): 29-38.
WANG Jian-li, GUO Shu-xiang, YANG Chang-chun, et al. Seismic trace interpolation with generalized spectral decomposition [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2002, 37(1): 29-32.
- [7] HINDRIKS K, DUIJNDAM A J W. Reconstruction of 3D seismic signals irregularly sampled along two spatial coordinates [J]. *Geophysics*, 2000, 65: 253-263.
- [8] ZWARTJES P M, GISOLF A. Fourier reconstruction with sparse inversion [J]. *Geophysical Prospecting*, 2007, 55: 199-221.
- [9] ZWARTJES P M, DUIJNDAM A J W. Optimizing Reconstruction for Sparse Spatial Sampling [C/OL]. 70th Ann Internat Mtg, Soc Expl Geophys, 2000 Technical Program Expanded Abstracts, Calgary, Canada, January, 2000 [2007-05-12]. <http://segdl.aip.org/dbt/SGA002162.pdf>.
- [10] ZWARTJES P M, SACCHI M D. Fourier reconstruction of non-uniformly sampled, aliased data [C/OL]. 74th Ann Internat Mtg, Soc Expl Geophys, 2004 Technical Program Expanded Abstracts, Denver, USA, January, 2004 [2007-05-12]. <http://segdl.aip.org/dbt/SGA001997.pdf>.
- [11] SACCHI M D, ULRYCH T J. Estimation of the discrete Fourier transform: a linear inversion approach [J]. *Geophysics*, 1996, 61: 1128-1136.
- [12] FEICHTINGER H, GRÖCHENIG K, STROHMER T. Efficient numerical methods in non-uniform sampling theory [J]. *Numerische Mathematik*, 1995, 69: 423-440.
- [13] DUTT A, ROKHLIN V. Fast Fourier transforms for non-equispaced data [J]. *SIAM J Sci Comput*, 1993, 14: 1368-1393.
- [14] BEYLKIN G. On the fast Fourier transform of functions with singularities [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 1995, 2: 363-381.
- [15] DUIJNDAM A J W, SCHONEWILLE M A. Non-uniform fast Fourier transform [J]. *Geophysics*, 1999, 64: 539-551.
- [16] AMUNDSEN L. Comparison of the least-squares criterion and the Cauchy criterion in frequency-wavenumber inversion [J]. *Geophysics*, 1991, 56: 2027-2035.
- [17] HABER E. Numerical strategies for the solution of inverse problems [D]. Columbia: University of British Columbia, 1997.

(编辑 修荣荣)