

基于双谱幅值和相位重构的地震子波提取

李亚峻¹, 李月², 高颖¹

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026; 2. 吉林大学通信工程学院, 长春 130012)

摘要 利用地震记录双谱中包含子波的幅值和相位信息, 以及其超强的抗噪声干扰能力, 采用一种基于双谱幅值和相位重构的地震子波提取方法, 首先提取出子波幅值及相位信息, 进而通过傅立叶反变换, 使子波得以完全恢复. 本文针对双谱相位重构递推公式, 提出一种新的初值选取方法, 使地震子波估计的稳定性得到了提高. 仿真实验证实了该方法的可行性.

关键词 高阶统计量, 双谱, 幅值, 相位, 地震子波

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)03-0947-06

A method of extracting seismic wavelet based on bispectrum amplitude and phase reconstruction

LI Ya-jun¹, LI Yue², GAO Ying¹

(1. College of Geoprospection Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract This paper is based on the fact that bispectrum of seismic signals contains amplitude and phase information of seismic wavelet, also has strong anti-noise-interference ability besides. A method of extracting wavelet using bispectrum amplitude and phase reconstruction is introduced in this paper. After extracting amplitude and phase information of wavelet, one can completely reconstruct seismic wavelet by inverse Fourier transform. A new method on choosing the initial value for recursion formula of bispectrum phase reconstruction has improved the wavelet estimation stability. The feasibility of the method is demonstrated by the simulation testing.

Keywords higher-order statistics, bispectrum, amplitude, phase, seismic wavelet

0 引言

众所周知, 二阶统计量(功率谱、自相关)方法需要假设系统是最小相位系统, 噪声为高斯白噪声, 然而实际信号常常不满足这个假设. 高阶统计量方法的提出正是从解决二阶统计量所存在的这些问题入手的.

早在上世纪 50 年代, 一些学者就开始了高阶矩的研究. 但是, 直到 80 年代后期, 这方面的研究才真正得到迅速发展与应用, 出现了高阶谱理论和应用研究的高潮. 人们在研究中发现, 高阶统计量提供了前所未有的十分丰富的信息^[1, 2], 利用高阶统计量

进行信号处理, 可以抑制加性高斯色噪声的影响, 可以检测和识别弱信号, 以及辨识非因果、非最小相位系统或重构非最小相位信号. 目前, 其应用范围已涉及地球物理^[2~5]、通信、图像处理、生物医学、故障诊断等多个领域, 并涌现出大量的研究成果.

地震子波估计是地震波阻抗反演的重要环节. 基于功率谱的子波估计算法难以解决子波相位的估计问题, 且压制高斯噪声能力弱. 随着高阶统计量方法在信号处理领域的广泛应用和研究, 地球物理工作者逐渐认识到, 应用高阶统计量方法可以从地震资料中提取一个非最小相位、时空变化的地震子波.

前人的研究足以表明, 高阶统计量不但继承了

收稿日期 2007-01-10; **修回日期** 2007-03-20.

基金项目 国家自然科学基金资助项目(40574051)资助.

作者简介 李亚峻, 女, 1973 年生, 内蒙古包头市人, 博士研究生, 研究方向为信号处理方法在地球勘探资料处理中的应用. (E-mail: lyj_2872@sohu.com)

相关与功率谱的优点,而且在对信号的分析中提供了更多的信息,如相位、高斯性等,高阶统计量作为一种新的适用于非线性信号分析和处理的工具,完全能够在地球物理信号分析和处理中发挥更大的作用。

本文将结合地震资料数字处理与解释的实际问题,利用地震信号的双谱中包含的幅值和相位信息,及其超强的抗噪声干扰能力,提出一种基于双谱幅值和相位重构的地震子波提取方法.首先计算地震记录的双谱,理论上,在得到的双谱中将不再包含高斯噪声(白噪声或色噪声);然后再通过双谱幅值和相位重构地震子波的幅值和相位信息,进而合成子波.特别地,针对双谱相位重构递推公式,提出一种新的初值选取方法,使地震子波估计的稳定性得到了提高。

1 理论基础

1.1 地震记录模型

一道地震记录可以由褶积模型表示为:

$$y(n) = x(n) + v(n) = w(n) * r(n) + v(n) \\ = \sum_i w(i)r(n-i) + v(n), \quad (1)$$

其中, $w(n)$ 为任意相位的地震子波; $r(n)$ 为反射系数序列,满足非高斯、统计独立同分布特性; $v(n)$ 为加性高斯白噪声或色噪声, $v(n)$ 与 $r(n)$ 相互独立. $x(n)$ 为不含噪地震记录,是一个平稳随机过程,它是地震子波与反射系数序列的褶积,*代表褶积; $y(n)$ 为观测到的含噪地震记录。

显然,式(1)为滑动平均(MA)模型. $r(n)$ 为随机输入信号; $w(n)$ 为MA模型的参数,它构成了该模型的传递函数 $H(z)$,即

$$H(z) = \sum_i w(i)z^{-i}. \quad (2)$$

1.2 双谱定义

由于高斯噪声的三阶累积量恒为零,而零均值平稳随机过程 $\{x(n)\}$ 的三阶累积量为信号的三重相关,由下式表示

$$C_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E[x(n)x(n+\tau_1)x(n+\tau_2)]. \quad (3)$$

所以,由三阶累积量的性质^[1],式(1)的三阶累积量表示为

$$C_{3y}(\tau_1, \tau_2) = C_{3x}(\tau_1, \tau_2) + C_{3v}(\tau_1, \tau_2) \\ = C_{3x}(\tau_1, \tau_2). \quad (4)$$

根据观测到的地震记录 $\{y(n)\}$,假设其为零均值平稳随机过程,可以得到其工程上近似的三阶累积量,即

$$C_{3y}(\tau_1, \tau_2) = \frac{1}{k} \sum_{n=0}^k y(n)y(n+\tau_1)y(n+\tau_2). \quad (5)$$

双谱就是对信号的三阶累积量进行傅立叶变换,即

$$B_y(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1} \sum_{\tau_2} C_{3y}(\tau_1, \tau_2) \\ \exp[-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)] = B_x(\omega_1, \omega_2), \quad (6)$$

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1} \sum_{\tau_2} C_{3x}(\tau_1, \tau_2) \\ \exp[-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)] \\ = X(\omega_1)X(\omega_2)X^*(\omega_1 + \omega_2). \quad (7)$$

根据观测地震记录 $\{y(n)\}$,由式(5)和式(6)可得地震信号的双谱幅值 $|B_x(\omega_1, \omega_2)|$ 和双谱相位 $\psi_x(\omega_1, \omega_2)$ 。

由式(7)可知, $|B_x(\omega_1, \omega_2)|$ 、 $\psi_x(\omega_1, \omega_2)$ 与信号傅立叶变换的幅值 $|X(\omega)|$ 、相位 $\varphi(\omega)$ 之间的对应关系如下

$$|B_x(\omega_1, \omega_2)| = |X(\omega_1)| |X(\omega_2)| |X(\omega_1)|, \quad (8)$$

$$\psi_x(\omega_1, \omega_2) = \varphi(\omega_1) + \varphi(\omega_2) - \varphi(\omega_1 + \omega_2). \quad (9)$$

由上面的定义式可以看出,双谱一般是复数,能提供功率谱所没有的相位信息;高斯过程的双谱为零,非高斯过程的双谱为常数.这使其成为从高斯背景噪声(白噪声或色噪声)中提取非高斯信号的非常有用的工具。

2 双谱重构地震子波

信号恢复分为信号双谱的幅值重构和相位重构两部分,即分别通过双谱幅值 $|B_x(\omega_1, \omega_2)|$ 和双谱相位 $\psi_x(\omega_1, \omega_2)$ 重构出信号的幅值 $|X(\omega)|$ 和相位 $\varphi(\omega)$.双谱重构方法恢复的是系统传递函数的幅值和相位,即地震子波的幅值和相位(参见式(2)).

2.1 子波的幅值重构

应用双谱进行子波幅值重构的方法有几种,这里采用的是最小二乘法^[6]。

令

$$\omega_1 = 2k\pi / N, \omega_2 = 2l\pi / N,$$

N 为采样点数.由双谱对称性可知, $|B_x(k, l)|$ 左右对称,即仅有 $N/2$ 个独立公式.令 $k = 1, 2, \dots, N/4, l = k, k+1, \dots, N/2-k$.

记

$$\hat{X}(k) = \ln(|X(k)|),$$

$$\hat{B}_x(k, l) = \ln(|B_x(k, l)|).$$

对式(8)两边取对数,可得

$$\hat{B}_x(k, l) = \hat{X}(k) + \hat{X}(l) + \hat{X}(k + l). \quad (10)$$

$\hat{B}_x(k, l)$ 是 $\hat{X}(k)$ 的线性组合,写成矩阵方程的形式为

$$\hat{\mathbf{B}} = \mathbf{A}_m \hat{\mathbf{X}}. \quad (11)$$

其中, $\hat{\mathbf{B}}$ 为 $(N^2/16) \times 1$ 列向量, $\hat{\mathbf{X}}$ 为 $(N/2) \times 1$ 列向量, \mathbf{A}_m 为 $(N^2/16) \times (N/2)$ 矩阵

$$\hat{\mathbf{B}} = (\hat{B}_x(1,1), \hat{B}_x(1,2), \dots, \hat{B}_x(1, N/2-1), \hat{B}_x(2,2), \dots, \hat{B}_x(N/4, N/4))^T,$$

$$\mathbf{A}_m = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{X}} = (\hat{X}(1), \hat{X}(2), \dots, \hat{X}(N/2))^T.$$

由于 \mathbf{A}_m 对所有 N 都是列满秩的,所以 $\hat{X}(k)$ 被唯一确定,可用广义逆矩阵求解得

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}_m^T \mathbf{A}_m)^{-1} \mathbf{A}_m^T \hat{\mathbf{B}}. \quad (12)$$

取其反对数,再根据对称性可得子波振幅谱的全部估计值

$$|X(k)| = \exp[\hat{X}(k)], k = 1, 2, \dots, N/2, \quad (13)$$

$$|X(k)| = |X(N-k)|, k = N/2+1, N/2+2, \dots, N-1, \quad (14)$$

$|X(0)|$ 通过对每次实现的样本均值再求均值得到.

2.2 子波的相位重构

相位重构法最早是由Brillinger提出的,为了便于运算和提高计算精度,Matsuoka与Ulrych推导出了它的离散形式及其递推形式,即BMU算法^[7].

令

$$\omega_1 = 2k\pi / N, \omega_2 = 2l\pi / N,$$

N 为采样点数; $k+l=n, n=1, 2, \dots, N$.

$$s(n) = \sum_{k=0}^n \psi_x(k, n-k), \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (15)$$

$$\varphi(n) = \frac{1}{n-1} \left[2 \sum_{k=0}^{n-1} \varphi(k) - s(n) \right], \quad n = 2, 3, \dots, N, \quad (16)$$

可以根据 $\psi_x(0, 0)$ 的值来确定 $\varphi(N)$ 取0或 π .递推公式的初值为

$$\varphi(0) = 0, \quad (17)$$

$$\varphi(1) = \sum_{n=2}^N \frac{s(n) - s(n-1)}{n(n-1)} + \frac{\varphi(N)}{N}. \quad (18)$$

由于 $\psi_x(k, l)$ 的估计值在实际中总是存在误差,所以若采用式(18)的初始值,存在着误差的传递,将使递推的BMU算法有可能变得不稳定.

为解决此问题,本文提出如下初始值的求法.

由式(16)可得

$$s(n) = 2 \sum_{k=0}^{n-1} \varphi(k) - (n-1)\varphi(n), \quad n = 2, 3, \dots, N. \quad (19)$$

$s(n)$ 是 $\varphi(k)$ 的线性组合,写成矩阵方程的形式为

$$\mathbf{s} = \mathbf{A}_p \boldsymbol{\varphi}, \quad (20)$$

其中, \mathbf{s} 为 $(N-1) \times 1$ 列向量, $\boldsymbol{\varphi}$ 为 $(N-1) \times 1$ 列向量, \mathbf{A}_p 为 $(N-1) \times (N-1)$ 矩阵

$$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} s(2) & s(3) & \cdots & s(N-1) & s(N) + (N-1)\varphi(N) \\ 2 & -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 2 & 2 & -2 & 0 & \cdots & 0 \\ 2 & 2 & 2 & -3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 2 & 2 & 2 & 2 & \cdots & -(N-2) \\ 2 & 2 & 2 & 2 & \cdots & 2 \end{bmatrix},$$

用向量 \mathbf{s} 代替矩阵 \mathbf{A}_p 的第一列,得 \mathbf{C}_p

$$\mathbf{C}_p = \begin{bmatrix} s(2) & -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ s(3) & 2 & -2 & 0 & \cdots & 0 \\ s(4) & 2 & 2 & -3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s(N-1) & 2 & 2 & 2 & \cdots & -(N-2) \\ [s(N) + (N-1)\varphi(N)] & 2 & 2 & 2 & \cdots & 2 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

$$\varphi(1) = \det[\mathbf{C}_p] / \det[\mathbf{A}_p]. \quad (22)$$

采用式(22)这一初始值,BMU算法将更稳定.

经过如上两步,基于信号双谱的幅值和相位重构出地震子波的幅值 $|X(\omega)|$ 和相位 $\varphi(\omega)$ 后,即可通过傅立叶反变换恢复出地震子波.

3 仿真实验

本文分别以零相位雷克子波和混合相位子波构造的合成地震记录为例,检验双谱估计地震子波的效果.

3.1 零相位雷克子波的估计

合成地震记录由褶积模型产生,如图1所示.子波 $w(n)$ 采用主频为40 Hz、采样间隔4 ms的零相位雷克子波;反射系数序列 $r(n)$ 为服从指数分布的随机序列,噪声 $v(n)$ 为加性高斯色噪声.合成地震记录 $y(n)$ 总数据长度为256数据点.

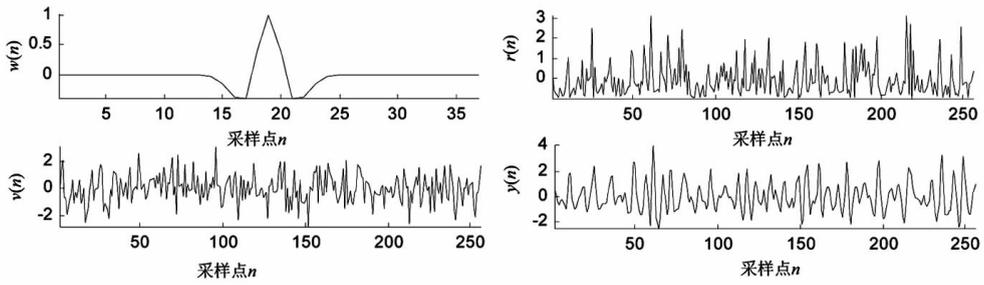


图 1 地震记录的合成

Fig. 1 Synthesis of seismogram

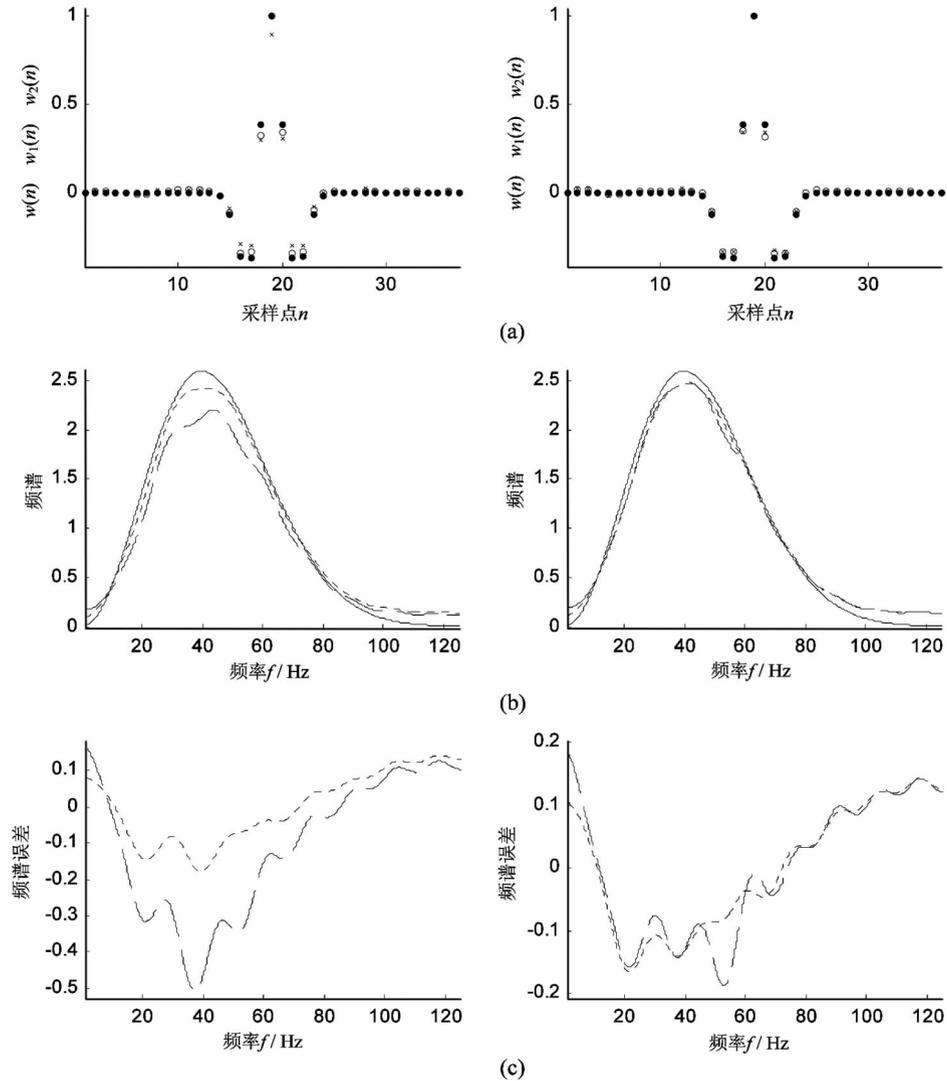


图 2 零相位雷克子波的估计

(a) 雷克子波 $w(n)$ 与估计子波 $w_1(n), w_2(n)$; (b) 频谱; (c) 频谱误差

Fig. 2 Estimation of zero-phase Ricker wavelet

(a) Ricker wavelet $w(n)$ and its estimated wavelets $w_1(n), w_2(n)$; (b) Spectrum; (c) Spectral error

用上述双谱幅值和相位重构方法提取合成地震记录 $\{y(n)\}$ 中的雷克子波, 经过 200 次 Monte Carlo 实验运行之后的结果如图 2 所示. 相位初值的

选取分别采用式(18)和式(22), 估计出的子波分别为 $w_1(n)$ 和 $w_2(n)$. 这里显示了两组实验结果, 用于比较两种相位初值选取方法的稳定性. 图 2(a)为雷

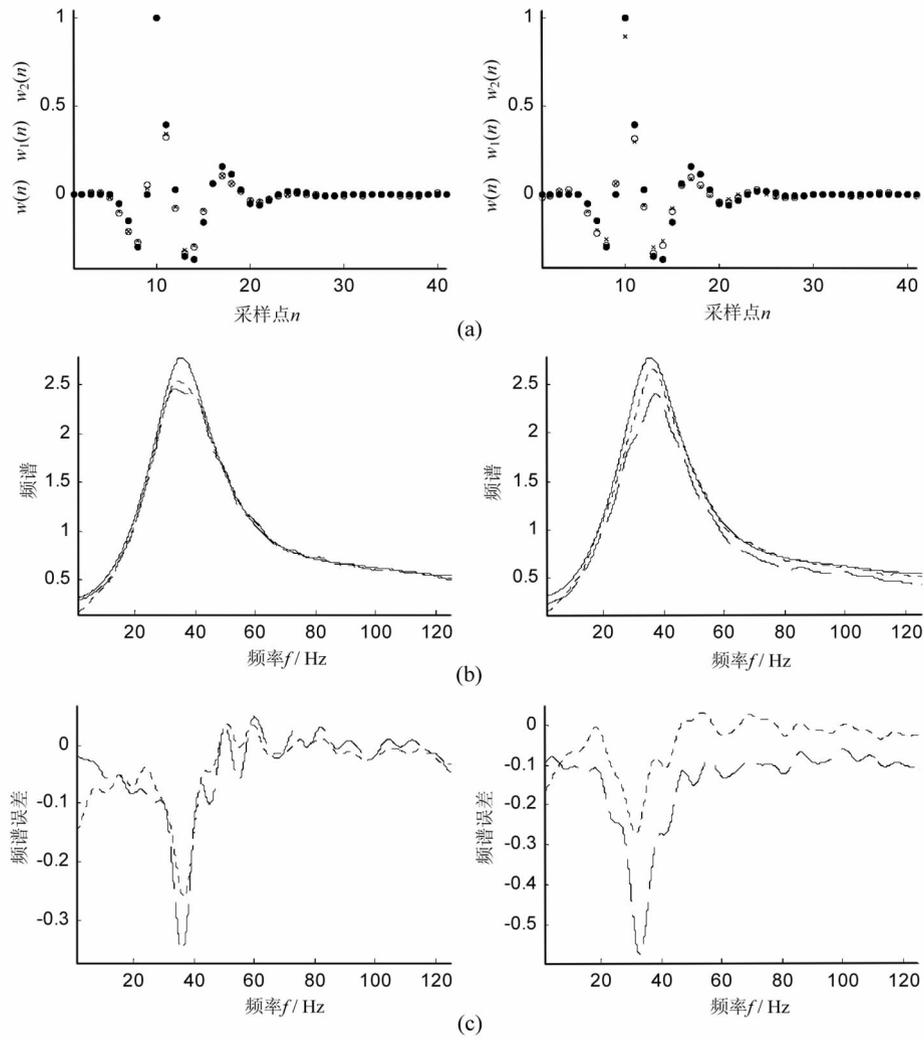


图3 混合相位子波的估计

(a) 混合相位子波 $w(n)$ 与估计子波 $w_1(n)$, $w_2(n)$; (b) 频谱; (c) 频谱误差

Fig. 3 Estimation of mixed-phase wavelet

(a) Mixed-phase wavelet $w(n)$ and its estimated wavelets $w_1(n)$, $w_2(n)$; (b) Spectrum; (c) Spectral error

克子波及其估计子波,其中“ \cdot ”对应于 $w(n)$,” x ”对应于 $w_1(n)$,” o ”对应于 $w_2(n)$;图 2(b)为三者的频谱,图 2(c)为两个估计子波频谱与雷克子波频谱的误差,实线为 $w(n)$ 的频谱,虚线为 $w_1(n)$ 的频谱及频谱误差,点线为 $w_2(n)$ 的频谱及频谱误差。

从实验结果来看,提取出的子波与模型子波基本吻合,说明双谱估计方法完全适用于零相位系统。此外,从图 2(c)两组实验的频谱误差可以看出,用式(18)作为相位初值估计子波时,两组实验得到的频谱误差变化较大,第一组小于 0.5,第二组小于 0.2(图 2(c)虚线所示);而用式(22)作为相位初值时,两组实验得到的频谱误差均小于 0.2(图 2(c)点线所示)。可见,用式(22)能得到更稳定的估计子波。

3.2 混合相位子波的估计

合成地震记录所采用的子波 $w(n)$ 是主频为 35 Hz 的混合相位子波(如图 3(a)“ \cdot ”所示),反射系数序列和噪声条件与上一实验相同。

同样,用上述双谱幅值和相位重构方法,经 200 次 Monte Carlo 实验运行后,提取合成地震记录中的混合相位子波。相位初值的选取分别采用式(18)和式(22)。得到的估计子波如图 3(a)“ x ”和“ o ”所示,图 3(b)为三者的频谱,图 3(c)为频谱误差。

由对比图可以看出,混合相位子波也被较好地恢复出来,实验结果证实了用双谱估计混合相位子波的有效性。图 3 再一次显示出,用式(18)作为相位初值来估计子波不如用式(22)稳定,用前一种方法

进行两组实验所得频谱误差较大,一组频谱误差小于0.4,另一组小于0.6(图3(b,c)虚线所示),而用后一种方法进行两组实验所得频谱误差均小于0.3(图3(b,c)点线所示).

4 结 论

因为输入是随机序列,且序列长度有限,此外, Monte Carlo 实验次数也有限,所以子波估计会存在一定的误差. 增加随机序列的长度和 Monte Carlo 实验次数,将有利于改善子波估计的效果. 但是,其代价是计算量的增加. 我们将继续寻求解决这个问题的办法. 如果能用双谱切片代替整个双谱值来估计非最小相位子波,无疑将大大减少计算量,我们将对此做更深入的研究.

高阶谱地震子波估计是一种统计方法,它将地震记录看作随机信号,把子波作为该信号系统的传递函数,利用高阶统计理论将地震记录的高阶谱中包含的子波幅值和相位信息提取出来,进而再合成子波. 仿真实验表明,双谱子波估计方法只需较短的记录就能够得到较为精确的子波估计结果,且具有

抗干扰能力强和运算速度快的优点,充分显示了高阶统计方法在地震资料处理方面应用的潜力.

参 考 文 献 (References):

- [1] 张贤达. 时间序列分析——高阶统计量方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [2] 王书明, 朱培民, 李宏伟, 等. 地球物理学中的高阶统计量方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] Lu W K, Li Y D, Zhang S W, *et al.* Higher-order-statistics and supertrace-based coherence-estimation algorithm[J]. *Geophysics*, 2005, 70(3): 13~18.
- [4] 熊晓军, 尹成, 张白林, 等. 高阶统计量油气检测方法研究[J]. *地球物理学报*, 2004, 47(5): 920~927.
- [5] 尹成, 伍志明, 邓怀群. 高阶统计量方法在地震勘探中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(3): 546~550.
- [6] Sundaramoorthy G, Raghuvver M R, Dianat S A. Bispectral reconstruction of signals in noise; amplitude reconstruction issues[J]. *IEEE Trans. Acoustics Speech, Signal Processing*, 1990, 38: 1297~1306.
- [7] Matsuoka T, Ulrych T J. Phase estimation using the bispectrum[J]. *Proc. IEEE*, 1984, 72: 1403~1411.