

# 海洋天然气水合物勘探地震处理的最小平反滤波设计及其应用

杨胜雄<sup>1,2</sup>, 符 溪<sup>2</sup>, 吴亚东<sup>1</sup>, 文鹏飞<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760)

**摘要:** 地震勘探的 BSR 识别技术是发现海洋天然气水合物的最经济、快捷、方便、有效的方法. 在地震处理识别上, 对子波的精确处理是水合物地震资料处理中最关键的一个环节, 采用最小平方差准则, 即利用实际输出与期望输出的误差平方和为最小的条件, 来确定反滤波因子, 因此又称为最小平方差子波整形. 在地震处理程序中引入三种期望输出, 即俞氏子波、雷克子波、Buttworth 子波, 对子波零相位化有较好的效果. 根据上面的原理, 我们开发了| 套最小平反滤波地震处理软件, 对天然气水合物地震勘探资料进行试处理的结果表明, 该软件在提高分辨率的同时保持了较高的信噪比.

**关键词:** 反褶积; 最小平反滤波; 俞氏子波; 雷克子波; Buttworth 子波

中图分类号: P618.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4193(2004)03-0075-07

## 1 引言

天然气水合物为冰状固体, 俗称“可燃冰”, 是一定的气体(甲烷、乙烷等)充填于水分子(呈三维笼状结构)在低温( $< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、高压( $> 10\text{ MPa}$ )条件下的产物, 主要赋存于具有低温、高压环境的世界海洋大陆边缘和高纬度冻土里. 在大陆边缘地区碳氢气体随流体向上运移到水合物稳定带中, 储存在于深海底的沉积物空隙内. 根据国外有关资料, 海洋天然气水合物(天然气成分主要为甲烷, 故也称甲烷水合物、甲烷气体水合物)通常埋藏于水深大于 300 m 的海底以下 0~1 100 m 处, 矿层厚数十厘米至上百米, 分布面积数万到数十万平方千米, 单个海域甲烷气体资源量可达数万至数百万亿立方米, 即相当于我国天然气的总储量甚至更多. 世界各大洋中已发现的水合物总资源碳热量约为  $1.8 \times 10^{16} \sim 2.6 \times 10^{16}\text{ m}^3$ <sup>[1]</sup>, 大约相当于全世界已知煤、石油和天然气总储量的 2 倍, 其总量之大足以取代日益枯竭的传统油气能源.

海底天然气水合物首先在钻探的沉积物中被发现, 但大范围的探测需要靠声学物探方法,

收稿日期: 2004-01-01; 修订日期: 2004-05-07.

基金项目: 国土资源部百名人才计划资助项目.

作者简介: 杨胜雄(1964-), 男, 广东省揭西人, 教授级高工, 从事海洋地质地球物理、海洋矿产资源勘察研究.

其中最主要的间接勘测技术是采用地震勘探方法寻找似海底反射层(即 BSR, bottom simulating reflection). 据统计, 全世界海洋中已发现水合物的地方有 84 处<sup>[2]</sup>, 其中利用地震探测的 BSR 推测的有 48 处, 由 BSR 推测并取样的有 10 处, 由 BSR 和测井探测的有 8 处, 通过取样发现的有 9 处, 利用其他方法(速度异常、化探异常、特征地貌等)推测的有 9 处. 由此可见, 通过地震方法识别发现的水合物赋存地区占绝大多数, 尤其利用地震勘探的 BSR 识别技术是发现水合物的最经济、快捷、方便、有效的方法<sup>[3-7]</sup>. BSR 具有“与海底近平行、与海底反射反相位、高波阻抗、强振幅、速度异常可达 3.3 km/s 约为沉积物的 2 倍、其下波速减小”等特征. 根据对波形的详细分析, 可将 BSR 进一步细分为三类: 即强 BSR (S-BSR)、弱 BSR (W-BSR) 和推测的 BSR (I-BSR)<sup>[5]</sup>. 在地震处理识别上, 对子波的精确处理是水合物地震资料处理中最关键的一个环节<sup>[8,9]</sup>, 其功能在于压缩地震子波、提高地震资料的纵向分辨率, 对子波处理的好坏直接影响到对水合物的有效识别, 主要目标是使波形零相位化, 形成对称形状的子波, 便于识别剖面上的 BSR 反射的极性反转现象. 由于 BSR 的特殊性, 用传统的子波反褶积方法处理子波存在信噪比和分辨率太低而难以识别的困难, 利用最小平方反滤波方法可进一步改善这些缺点.

最小平方反滤波是最小平方滤波(或称维纳滤波、最佳滤波)在反滤波领域中的应用. 最小平方滤波的基本思想在于设计一个滤波算子, 用它把已知的输入信号转换为与给定的期望输出信号在最小平方误差的意义下最佳接近输出. 设输入信号为  $x(t)$ , 它与待求的滤波因子  $h(t)$  相褶积得到实际输出  $y(t)$ , 即  $y(t) = x(t) * h(t)$ . 由于种种原因, 实际输出  $y(t)$  不可能与预先给定的期望输出  $\hat{y}(t)$  完全一样, 只能要求两者最佳地接近. 判断是否最佳接近的标准很多, 最小平方误差准则是其中之一, 即当两者的误差平方和为最小时两者最接近. 在这个意义下求出滤波因子所进行的滤波即为最小平方滤波.

若设计另一滤波器的输入信号  $x(t)$  是某滤波器的输出, 而期望输出  $\hat{y}(t)$  是该滤波器的输入, 则把按此思想求得的滤波因子  $a(t)$  称为最小平方反滤波因子, 用它进行的滤波是最小平方反滤波<sup>[10]</sup>.

## 2 数学原理

地震勘探反滤波“反”的是大地滤波<sup>[11]</sup>. 大地滤波器的脉冲响应是地震子波, 它必为物理上可实现的. 将地震子波作为反滤波的输入, 则期望输出应是  $\delta$  脉冲. 为了不失一般性, 可先假设期望输出是窄脉冲  $d(t)$ . 另外, 反滤波因子一般是无限长的, 但计算机中运算只能取有限项. 假设待求的反滤波因子  $a(t)$  的起始时刻为  $-m_0$ , 延续长度为  $(m+1)$ , 即

$$a(t) = [a(-m_0), a(-m_0+1), a(-m_0+2), \dots, a(-m_0+m)].$$

当已知输入——地震子波  $b(t) = [b(0), b(1), \dots, b(n)]$  时, 实际输出为

$$c(t) = a(t) * b(t) = \sum_{\tau=-m_0}^{-m_0+m} a(\tau) b(t-\tau),$$

实际输出与期望输出的误差平方和为

$$Q = \sum_{t=-m_0}^{-m_0+m+n} [c(t) - d(t)]^2 = \sum_{t=-m_0}^{-m_0+m+n} \left[ \sum_{\tau=-m_0}^{-m_0+m} a(\tau) b(t-\tau) - d(t) \right]^2.$$

要使  $Q$  最小, 数学上就是求解  $Q$  的极值问题, 即求满足

$$\frac{\partial Q}{\partial a(l)} = 0 \quad (l = -m_0, -m_0+1, \Lambda, -m_0+m)$$

的滤波因子  $a(t)$ .

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial a(l)} &= \sum_{t=-m_0}^{-m_0+m+n} \frac{\partial}{\partial a(l)} \left[ \sum_{t=-m_0}^{-m_0+m} a(\tau) b(t-\tau) - d(t) \right]^2 \\ &= 2 \sum_{t=-m_0}^{-m_0+m+n} \left[ \sum_{\tau=-m_0}^{-m_0+m} a(\tau) b(t-\tau) - d(t) \right] b(t-l) \\ &= 2 \sum_{\tau=-m_0}^{-m_0+m} a(\tau) \sum_{t=-m_0}^{-m_0+m+n} b(t-\tau) b(t-l) - \\ &\quad 2 \sum_{t=-m_0}^{-m_0+m+n} d(t) b(t-l) = 0 \\ &\quad (l = -m_0, -m_0+1, \Lambda, -m_0+m), \end{aligned} \quad (1)$$

因为

$$\sum_{t=-m_0}^{-m_0+m+n} b(t-\tau) b(t-l) r_{bb}(l-\tau)$$

为地震子波的自相关函数, 而

$$\sum_{t=-m_0}^{-m_0+m+n} d(t) b(t-l) r_{bd}(l)$$

为地震子波与期望输出的互相关函数, 故可把式(1)写为

$$\sum_{\tau=-m_0}^{-m_0+m} a(\tau) r_{bb}(l-\tau) = r_{bd}(l) \quad (l = -m_0, -m_0+1, \Lambda, -m_0+m), \quad (2)$$

这是一个方程组, 把它写成矩阵的形式为

$$\begin{bmatrix} r_{bb}(0) & r_{bb}(0) & \Lambda & r_{bb}(m) \\ r_{bb}(1) & r_{bb}(0) & \Lambda & r_{bb}(m-1) \\ M & M & M & \\ r_{bb}(m) & r_{bb}(m-1) & \Lambda & r_{bb}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(-m_0) \\ a(-m_0+1) \\ M \\ a(-m_0+m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{bd}(-m_0) \\ r_{bd}(-m_0+1) \\ M \\ r_{bd}(-m_0+m) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中利用了相关函数的对称性. 该方程中的系数矩阵为一特殊的正定矩阵(托布里兹矩阵), 它不但以主对角线对称, 也以次对角线对称, 而且主对角线及与主对角线平行的直线上的元素均相同.

方程(2)或(3)被称为最小平方反滤波的基本方程、正规方程或法方程, 可以用专门的莱文森递推法求解.

利用上述基本方程求出的滤波因子有时称为脉冲整形滤波因子, 因为在应用中它可以输入子波变换为任意形状的期望输出, 相当于对子波整形.

### 3 程序描述

根据不同的要求, 在程序中我们采用的期望输出的子波  $d(t)$  可有 3 种型式, 现简述如下.

### 3.1 俞氏子波

俞氏子波即宽带雷克子波, 其时间域表达式为

$$d_1(t) = \frac{1}{q-p} [q e^{-(\pi q t)^2} - p e^{-(\pi p t)^2}], \quad (4)$$

式中, 参数  $p$  和  $q$  为低边和高边的频率界限.

### 3.2 雷克子波

雷克子波的波形为

$$d_2(t) = (1 - 2\pi^2 f_m^2 t^2) \exp(-\pi^2 / f_m^2 t^2), \quad (5)$$

式中,  $f_m$  为峰值频率.

### 3.3 Butterworth 子波

Butterworth 子波是带通子波, 其频率域表达式为

$$\left. \begin{aligned} d_3(\omega) &= \frac{1}{(\omega - \beta_1)(\omega - \beta_2) \dots (\omega - \beta_n)} \\ \beta_k &= e^{i \left( \frac{2\pi k - \pi}{n} \right)}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

## 4 实现过程

首先根据式(4)~(6)计算出期望子波  $d(t)$ , 然后计算输入子波的自相关函数:

$$r_{bb}(l - \tau) = \sum_{t=-m_0}^{-m_0 + m + n} b(t - \tau) b(t - l) \quad (7)$$

及输入子波与期望子波的互相关函数:

$$r_{bd}(l) = \sum_{t=-m_0}^{-m_0 + m + n} d(t) b(t - l), \quad (8)$$

最后将上两式代入式(3), 求解出  $a(t)$  即得反滤波因子.

## 5 实际资料试算

1999 年广州海洋地质调查局在西沙海槽区开展了甲烷水合物的前期试验性调查, 发现多段具有极性反转、上部反射空白带、近似平行海底、地震波速度局部增高等标志的 BSR, 累计为 100 多千米<sup>[12]</sup>. 利用最小平方反滤波方法进行子波处理, 如图 1 所示. 对子波处理的具体参数为: 算子长度 400 ms; 白噪比例 3%.

图 2 为用传统子波反褶积方法处理的剖面, 图 3 为用最小平方反滤波处理的剖面, 从图中可以看出用最小平方反滤波处理的剖面获得较高的信噪比和清晰的分辨率, 由此可见, 用最小平方反滤波处理天然气水合物地震资料是有效的.

## 6 结论

通过地震方法识别发现的水合物赋存地区占绝大多数, 尤其利用地震勘探的 BSR 识别技术是发现水合物的最经济、快捷、方便、有效的方法. 对子波的处理是天然气水合物地震资料处理中最关键的一个环节, 其功能在于压缩地震子波、提高地震资料的纵向分辨率, 子波处理的

好坏直接影响到对水合物的有效识别.

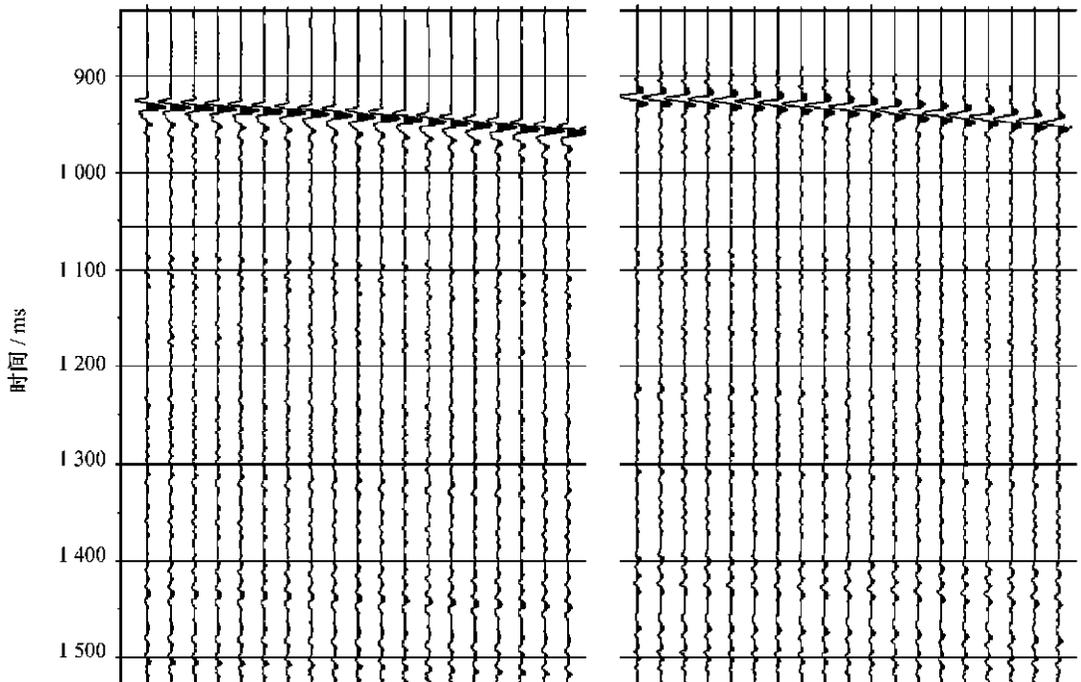


图1 子波处理效果图(左图为原系统反褶积后的炮集,右图为最小平方反滤波处理后的炮集,新模块子波处理后波形明显零相位化,这有利于波形对比)

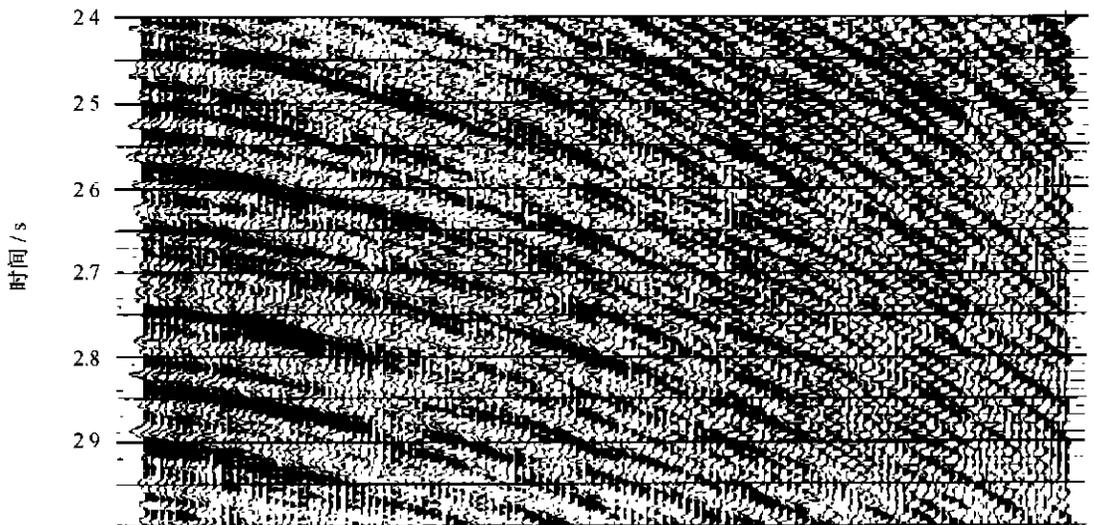


图2 用传统子波反褶积方法处理的剖面



图3 用最小平方反滤波方法处理的剖面

用传统的子波反褶积方法进行子波处理存在信噪比和分辨率太低而难以识别的困难,利用最小平方反滤波方法可进一步改善这些缺点.设计应用的最小平方反滤波可以使波形零相位化,形成对称形状的子波,便于识别剖面上的BSR反射的极性反转现象,从而提高处理结果的信噪比和分辨率.

在最小平方反滤波的基础上对反褶积中的一些主要问题做了探讨,并把俞氏子波、雷克子波、Butt worth 子波作为反褶积的期望输出,取得了理想的效果.

#### 参考文献:

- [1] KVENVOLDEN K A. Gas hydrate — geological perspective and global change[J]. *Rev Geophys*, 1993, 31: 173—187.
- [2] 杨胜雄,张光学,张 明.海洋天然气水合物综合勘测技术[A]. '99海洋高新技术发展研讨会论文集[C].北京:海洋出版社,2000.507—512.
- [3] MACKAY M E, JARRARD R D, WESTBROOK G K, et al. Origin of bottom-simulating reflectors: geophysical evidence from the Cascadia accretionary prism[J]. *Geology*, 1994, 22: 459—462.
- [4] SINGH S C, MINSHULL T A, SPENCE G D. Velocity structure of a gas hydrate reflector[J]. *Science*, 1993, 260: 204—207.
- [5] LEE M W, HUTCHINSON D R, AGENA W F, et al. Seismic character of gas hydrates on the southeastern U S continental margin[J]. *Mar Geophys Res*, 1994, 16: 163—184.
- [6] CARCIONE J M, TINIVELLA U. Bottom-simulating reflectors: seismic velocities and AVO effects[J]. *Geophysics*, 2000, 65(1): 54—67.
- [7] HUNTER J M, MILLER R D, DOLL W E, et al. Feasibility of high resolution P- and S-wave seismic reflection to detect methane hydrate[J]. *Soc Expl Geophys Expanded Abstracts*, 1999.
- [8] 俞寿朋.高分辨率地震勘探[M].北京:石油工业出版社,1993.125.
- [9] 熊 翥.地震数据数字处理应用技术[M].北京:石油工业出版社,1993.187.
- [10] 牟永光.地震勘探资料数字处理方法[M].北京:石油工业出版社,1981.85.
- [11] 程乾生.信号数字处理的数学原理(第2版)[M].北京:石油工业出版社,1993.221.
- [12] 张光学,陈邦彦,杨胜雄,等.海洋天然气水合物地震学研究[A].天然气水合物调查动态、勘探方法和成果研讨会[C].2001.

## The principle of least-squares inverse filtering and its application

YANG Sheng-xiong<sup>1,2</sup>, FU Xi<sup>1</sup>, WU Ya-dong<sup>1</sup>, WEN Peng-fei<sup>1,2</sup>

(1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 2. *Guangzhou Marine Geological Survey Bureau, Guangzhou 510760, China*)

**Abstract:** In order to improve the resolution of seismic profiles in vertical, the aim of deconvolution is to suppress the ground filtering in exploration. The least-squares error is adopted, that is, considering sum of all anticipant output error as the least condition, to decide the inverse filtering factor. Three kinds of anticipation output is introduced: Yu Shi wavelet, Ricker wavelet, Butterworth wavelet. These wavelets help to improve the effect of zero-phase. According to the principle above, a software for least-squares inverse filtering is developed. The results indicate this method not only improves the resolution but also maintains a relatively high ratio of signal-to-noise, especially in the detection of gas hydrate.

**Key words:** deconvolution; least-squares inverse filtering; Yu Shi wavelet; Ricker wavelet; Butterworth wavelet