

林昕,魏文博,景建恩,等.提高海洋可控源电磁法信噪比的方法研究.地球物理学进展,2009,24(3):1047~1050,DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.03.032.

Lin X,Wei W B,Jing J E, et al. Study on improving MCSEM signal-to-noise ratio. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(3):1047~1050,DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.03.032.

提高海洋可控源电磁法信噪比的方法研究

林 昕^{1,2}, 魏文博^{1,2}, 景建恩^{1,2}, 曹琼华², 叶高峰^{1,2}

(1. 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室(中国地质大学),北京 100083; 2. 中国地质大学地球物理与信息技术学院,北京 100083)

摘 要 海洋可控源电磁法(MCSEM)资料解释技术在过去几年时间里飞速发展,但是海底噪声的存在严重影响了海洋可控源电磁资料的解释精度.本文根据国内外文献总结了压制 MCSEM 噪声的两种方法:时域滤波方法和噪声估计方法.通过对模拟数据的处理,验证了这两种方法在压制噪声中的应用效果.结果表明:时域滤波和噪声估计方法能够较好的压制背景噪声,提高处理结果的信噪比.

关键词 海洋可控源电磁法,频域,时窗,噪声估计

DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.03.032 中图分类号 P631,P738 文献标识码 A

Study on improving MCSEM signal-to-noise ratio

LIN Xin^{1,2}, WEI Wen-bo^{1,2}, JING Jian-en^{1,2}, CAO Qiong-hua², YE Gao-feng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geo-detection (China University of Geosciences), Ministry of Education, Beijing 100083, China;
2. China University of Geosciences School of Geophysics and Information Technology, Beijing 100083, China)

Abstract Marine controlled-source electromagnetic(MCSEM) data processing techniques have been developed fast in the past few years. We make a study on how to reduce the noise of MCSEM electrical dipole-dipole with simulated data processing while the noise contained in the raw data will be negative on the data interpretation. Two methods which were concluded by the author are introduced here: time domain filtering and noise estimation. It is proved that these methods are valid and time domain filtering and noise estimation can reduce the ambient noise, and increase the signal-to-noise ratio.

Keywords Marine CSEM, frequency domain, stacking, noise estimation

0 引 言

全球油气勘探的重点逐渐向深水领域转移,在深海环境下进行钻井勘探花费的成本很高.传统地震勘探提供的构造信息不能满足人们的需要,巨额的费用迫使人们寻找新的勘探方法来提高海洋钻探成功率^[1~3].海洋可控源电磁法(MCSEM-Marine Controlled Source Electromagnetic)作为地震勘探最好的补充方法在过去的二十多年里得到了飞速的发展^[1,4].根据方法原理和发送源装置不同,MCSEM 技术可以分为多种方法^[1,5,6].

按照方法原理,MCSEM 可以分为时间域和频率域两类方法;按照不同装置形式的场源可以划分为水平电(磁)偶源,垂直电(磁)偶源等方法^[1,6].本文研究的是目前应用较成熟的频率域水平电偶-偶装置:船只通过深水电缆拖曳水平电偶源发送机,发送机在靠近海底的位置匀速移动并发送某个或某几个频率信号;接收机固定在海底接收信号.

这种基于频率域 MCSEM 的工作原理与电磁波能量衰减特征、传播介质的电性及收发距等有

关^[2]. 在海底处,由水平电偶源激发的电磁波可通过多种途径到达接收机,见图 1. 由于电磁波在不同电性介质中的衰减与传播速度不同,因此对于不同的收发距,通过不同途径到达接收点的电磁波的传播时间和能量存在一定差异. 研究表明^[7]:当收发距较小时,信号能量主要通过海水传播到接收机(直达波);随着收发距变大,一般是藏体埋深的 2~5 倍的时候,信号能量将主要通过海底下的高阻层到达接收机(反射波和折射波);当收发距较大,信号能量主要从空气传播到接收机(空气波). 因此,通过选择合适的收发距和主动源频率,即可探测到海底面下赋存的异常体.

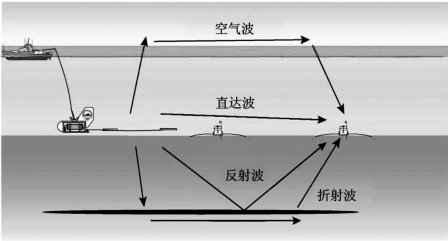


图 1 频率域 MCSEM 信号传播

Fig. 1 Frequency domain MCSEM signal propagation

在选定合适收发距和发射频率的海底条件下,MCSEM 的测量结果还受到一些噪声的干扰. 这些噪声主要有:海底大地电磁,海水扰动,微地震,表面重力波,接收机电子元件等产生的各种噪声^[6]. 这些干扰不仅降低了接收信号的质量,并且减小了接收有用信号的收发距范围. 为了提高 MCSEM 的解释精度,必须研究提高 MCSEM 信噪比的噪声压制方法. 本文根据国内外文献总结了压制 MCSEM 噪声的两种方法:时域滤波方法和噪声估计方法,并利用理论模拟数据对方法的应用效果进行验证.

1 时域滤波方法

1.1 时域滤波的原理

频率域 MCSEM 信号的采集是在时域中进行的,而数据解释工作通常是在频率域中进行^[1]. 如果把 MCSEM 随收发距变化条件下时域响应视为由各种频率的谐波组成,那么各种频率的谐波都具有不同的振幅和初相位. MCSEM 的主动源发送的信号频率为已知的某几个频率,主动频率段的信号是有用信号,而其他频率信号为噪声信号,且当收发距较小时,主动频率信号能量远大于噪声能量. 在对 MCSEM 数据进行处理的时候,可以利用公式(1)对原始数据进行时频转换^[8],

$$A\cos(\omega t) + B\sin(\omega t) = d(t), \tag{1}$$

公式(1)中 $d(t)$ 为离散电场值序列, $\omega = 2\pi f$ (f 为电偶源的发送频率), t 为时间值, A 、 B 为待定的系数. 通常情况下在一个接受点的原始时间道上依次截取固定长度的时间窗,对于特定的某个频率 f 截取时窗后,每个时间窗都可以得到如公式(2)的一系列等式,

$$\begin{bmatrix} \cos\omega_i t_1 & \sin\omega_i t_1 \\ \cos\omega_i t_2 & \sin\omega_i t_2 \\ \dots & \dots \\ \cos\omega_i t_j & \sin\omega_i t_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_j \end{bmatrix}, \tag{2}$$

公式(2)中 ω_i 表示第 i 个主动源频率, t_j 表示某时窗里第 j 个时刻, d_j 表示时窗内 j 时刻的电场值. 公式(2)是关于未知数 A 、 B 的超定方程组,利用最小二乘法来处理得到每个时窗相应的 A 、 B 值. 通过 A 、 B 值获得特定频率 ω_i 在某时窗内的的振幅和相位,

$$\begin{aligned} d_{i,j} &= (\sqrt{A_i^2 + B_i^2}) \cos(\omega_i t_j - \tan^{-1} \frac{B_i}{A_i}) \\ &= |E_j| \cos(\omega_i t_j - \varphi_i), \end{aligned} \tag{3}$$

公式(3)中, $|E|$ 为振幅, φ 为相位.

1.2 时间窗长度的选择

时域滤波处理中需要处理人员选定合适长度的时间窗. 时间窗长度的选择对于数据处理结果影响较大. 一般来说,时间窗长度越长,压制噪声的效果越好^[8,9]. 下面以周期为 1 秒的模拟信号为例,对比了采用不同时窗的时域滤波的处理效果.

假设原始电场信号为 $e^{-0.025t} \sin(2t)$, 信号发送频率为 1 Hz,并对信号中加入 5% 的随机噪声,得到电场信号见图 2 所示. 图 2 中,信号的采样率为 10 Hz,时间序列的长度为 200 s. 这里 $e^{-0.025t}$ 用于模拟电场信号能量随收发距衰减的情况. 根据采样定理,可得到噪声的频率范围为不高于 5 Hz.

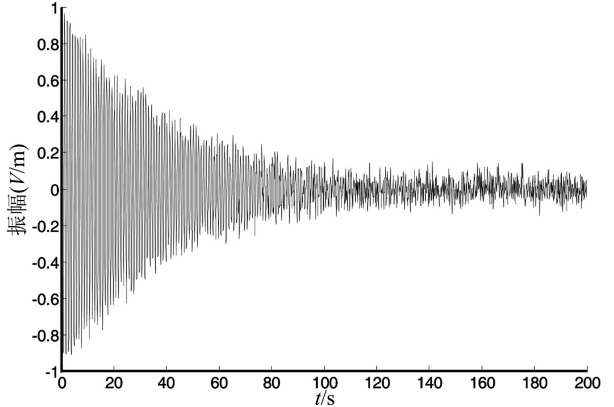


图 2 原始时域的模拟信号

Fig. 2 Simulation of raw time domain signal

利用公式(1)方法对上面的信号进行频谱转换。首先对未加噪声的信号进行转换,然后依次选择 2 s, 8 s, 20 s 的时间窗分别对加噪声后的信号进行处理,结果见图 3 所示。

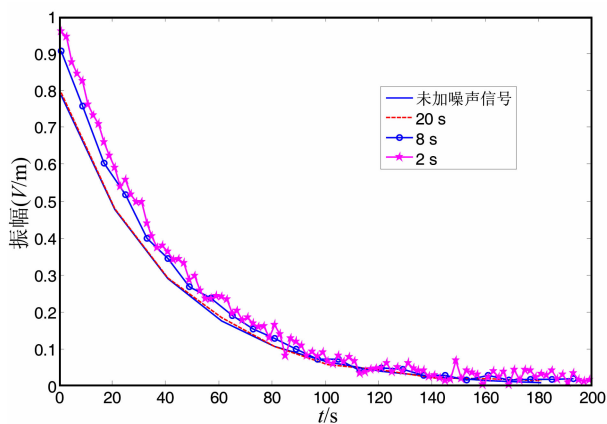


图 3 不同时窗下处理结果比较

Fig. 3 Comparison of different stacking length

由图 3 可以看到,时间窗长度为 2 s 的时候,信号受噪声干扰最大;时间窗长度为 20 s 时的处理效果要比选择 8 s 和 2 s 好。目前,MCSEM 资料处理中,一般利用选取较长的时间窗来进行时域滤波。针对实际数据的具体情况,选择合适的时间窗长度进行时域滤波处理,可以有效地提高信号的信噪比。

2 噪声估计方法

2.1 噪声估计原理

在收发距较大情况下,主动频率信号远小于被动频率噪声,这时时域滤波方法压制噪声的效果有限,有必要进一步研究提高信噪比的方法。

噪声估计方法是过滤除主动频率噪声来提高 MCSEM 资料的信噪比。对于主动频率噪声的估计可以通过建立周边频率噪声同主动频率噪声的线性函数关系来近似模拟。一般可采用公式(4),利用最小二乘法来建立主动频率噪声与周边频率噪声的关系模型^[9]。

$$\min \left\| d(f_i) - \sum_{j=1, j \neq i}^m C(f_j) \cdot d(f_j) \right\|. \quad (4)$$

公式(4)中, m 为选取周边频率的个数, C 为待定系数, $d(f_i)$ 为主动频率的响应幅值, $d(f_j)$ 为周边频率的响应幅值。

2.2 噪声估计效果分析

为了验证噪声估计方法对 MCSEM 信号处理

效果,采用以下一维模型对 MCSEM 信号进行模拟:假设模型海水深度 1000 m,电阻率为 $0.3 \Omega\text{m}$,异常层位于海底下 1000 m,电阻率为 $100 \Omega\text{m}$,厚度为 100 m,海底沉积层的电阻率值为 $1 \Omega\text{m}$ 。电偶源发送信号的频率为 1 Hz,电偶距为 $3 \times 10^5 (\text{Am})$ 。通过正演计算得到该模型下的 MCSEM 响应值。同时采用随机噪声(噪声量级为 10^{-15} V/Am^2)来模拟海底噪声环境。

图 4 为去除主动频率噪声前后的对比结果。图 4 中,横轴表示收发距($-15 \sim 15 \text{ km}$),纵轴振幅的单位为 V/Am^2 ,信号采样率为 10 Hz。

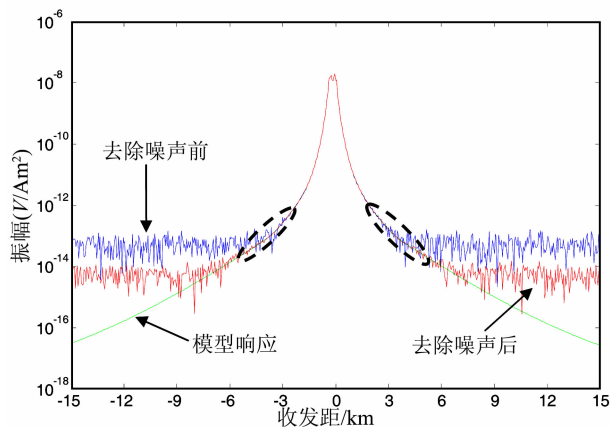


图 4 去除主动频率噪声前后信号的对比

Fig. 4 Comparison of before and after removing estimated noise

从图 4 中可以看出,在加入噪声的影响下,能获得有效信号的收发距约为 2 km。当收发距大于 2 km 时,噪声基本上将信号淹没。根据提出的噪声估计方法,计算主动频率的噪声。经过去噪处理后,MCSEM 信号有效收发距从原来的 2 km 增加到 5 km,增加了可以解释的收发距范围。

3 结 论

提高 MCSEM 数据的信噪比从而增加有效偏移距是能否更好地进行定性解释的关键^[10]。本文总结了目前常用的两种压制 MCSEM 噪声的方法:时域滤波和噪声估计方法,并利用模拟数据验证了方法的应用效果。研究结果表明:时域滤波和噪声估计方法较好的提高了 MCSEM 资料的信噪比,增加了有效收发距的范围。

由于没有实测数据,文中仅针对模拟数据对压噪方法进行定性分析。实际应用中还需结合实测数据进行具体的分析,提高 MCSEM 资料的信噪比。

参 考 文 献 (References):

- [1] Constable S, Srnka L J. An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration [J]. *Geophysics*, 2007,72(2),3~12.
- [2] Scholl C, Edwards R N. Marine downhole to seafloor dipole-dipole electromagnetic methods and the resolution of resistive target [J]. *Geophysics*, 2007,72(2);39~49.
- [3] Summerfield P J. Marine CSEM Acquisition challenges[J]. *Expanded Abstracts of 75th Annual International SEG Meeting*, 2005, 538~541.
- [4] Constable S. Marine electromagnetic methods-A new tool for offshore exploration. *The leading edge*,2006,438~444.
- [5] 何展翔,余刚. 海洋电磁勘探技术及新进展[J]. *勘探地球物理进展*,2008,31(1);3~8.
He Z X, Yu G. Marine electromagnetic technology and progress[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2008, 31(1);3~8.
- [6] 何继善,鲍力知. 海洋电磁法研究的现状和进展[J]. *地球物理学进展*,1999,14(1);7~39.
He J S, Bao L Z. The situation and progress of marine electromagnetic method research [J]. *Progress in Geophysics*, 1999,14(1);7~ 39.
- [7] Lqseth L O, Amundsen L. On the signal propagation in marine CSEM,EGM. 2007,15~18.
- [8] Behrens J P. The detection of electrical anisotropy in 35 Ma pacific lithosphere: result from a marine controlled-source electromagnetic survey and implication for hydration of the upper mantle[D]. San Diego:University of California,2005.
- [9] Lu X Y, Willen D. Marine CSEM data processing techniques [C]. *SEG/New Orleans 2006 Annual Meeting*, 2006, 704~708.
- [10] He Z X, Wang Z G, *et al.* Modeling of 3D MCSEM and sensitivity analysis[J]. *PIERS Online*,2007,3(5);641~645.