

doi:10.3799/dqkx.2014.047

利用信噪分离方法提高大地电磁张量阻抗估算质量

崔金岭^{1,2}, 邓明^{1,2*}, 景建恩^{1,2}, 张启升^{1,2}, 陈凯^{1,2}, 王猛^{1,2}

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

摘要: 在强噪声环境下, 由于相关噪声的影响, 准确地估算大地电磁张量阻抗越来越困难. 研究一种处理相关噪声问题的信噪分离方法, 即采用最小二乘 Robust 方法, 利用相关噪声相对较小的远参考站磁场信号求取分离张量, 将本地磁场的观测信号分离为 MT 信号和噪声, 估算大地电磁张量阻抗. 分别对模拟数据与实测数据进行处理, 结果表明, 信噪分离方法能够分离出较强的相关噪声, 给出的视电阻率和相位曲线比最小二乘 Robust 方法和远参考方法获得的更加平滑, 处理效果明显. 研究表明, 在处理受相关噪声影响的 MT 数据中, 信噪分离方法具有明显的优势.

关键词: 信噪分离; 大地电磁; 张量阻抗; 地球物理.

中图分类号: P631 文章编号: 1000-2383(2014)04-0492-07 收稿日期: 2013-08-25

A Signal-Noise Separation Method for Magnetotelluric Impedance Tensor Estimate Improvement

Cui Jinling^{1,2}, Deng Ming^{1,2*}, Jing Jian'en^{1,2}, Zhang Qisheng^{1,2}, Chen Kai^{1,2}, Wang Meng^{1,2}

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

Abstract: It is difficult to estimate precise magnetotelluric (MT) impedance tensor in high correlated noise areas. In order to approximate MT impedance tensor, we use remote sites which contain relatively lower correlated noise to compute separation tensor by using Robust least square method. The MT data in three sites which are contaminated by higher and lower correlated noises are processed using signal-noise separation method. The results show that it can separate higher correlated noise and get much smoother apparent resistivity and phase curves than those obtained by using Robust least square method and remote reference method. It is concluded that signal-noise separation method is efficient for much more precise MT impedance tensor.

Key words: signal-noise separation; magnetotellurics; impedance tensor; geophysics.

0 引言

大地电磁(MT)张量阻抗是频率域内电场值和磁场值的函数(Garcia and Jones, 2008). 为了构建地球电性结构, 需要精确的张量阻抗. 在强噪声环境下, 由于相关噪声的影响, 准确地估算大地电磁张量阻抗越来越困难.

在 MT 数据处理中, 学者们先后提出最小二乘法、Robust 方法和远参考方法, 但这些方法各有优

缺点. 经典的单站处理方法(Law *et al.*, 1980; Jones *et al.*, 1989)是基于电场与磁场通道不受相关噪声干扰的假设. 因此, 相关噪声使得大地电磁估算质量降低. 远参考方法(Gamble *et al.*, 1979)对不相关噪声有一定的压制作用, 但是其会导致较大的统计误差, 并且相关噪声会导致张量阻抗偏移(Jones *et al.*, 1989). Robust 方法(Egbert and Booker, 1986; 魏文博等, 2002; 叶高峰等, 2007)能够压制 MT 数据非高斯分布噪声, 并能去除尖峰噪声和异

基金项目: 国家专项“深部探测技术与实验研究”(Nos.SinoProbe-01, 201011035); 国家科技部“863”计划课题(No.2012AA09A201); 中央高校基本科研业务费专项资金(No.2011YYL106).
作者简介: 崔金岭(1985—), 男, 在读博士研究生, 主要从事地球物理仪器研制与大地电磁数据处理工作. E-mail: tsjinling@gmail.com
*** 通讯作者:** 邓明, E-mail: dengming@cugb.edu.cn

常值的影响,但不能去除近场源电磁相关噪声的影响.学者们提出远参考 Robust 方法(Egbert and Booker, 1986;Chave and Thomson, 2004),用于消除相关噪声的影响,但当磁场和电场时间序列均含有较强的相关噪声时,这些方法无能为力(王家映等, 1998).

为了提高张量阻抗的估算质量,学者们改进了谱估计方法.连续小波变换可有效压制较强的白噪声和局部相关噪声(徐义贤和王家映, 2000; Garcia and Jones, 2008),但难点是小波基函数的选取.经验模态分解(EMD)处理 MT 数据能够得到很好的结果(Chen *et al.*, 2012),但是有时不能正确计算出本征模态函数的瞬时频率,且该算法耗时较长,不适合大地电磁数据处理.数学形态滤波能够压制大地电磁噪声,使得张量阻抗更加平滑(汤井田等, 2012),但压制噪声的同时也使得某些频段的信号能量下降.

上述方法没有很好地解决相关噪声的问题.为了减小相关噪声产生的误差,Egbert(1997)提出利用多个参考站的数据计算相关噪声和不相关噪声在信号中所占的比重,取得了较好的结果.Larsen *et al.*(1996)提出了一种信噪分离方法,利用相对噪声较小的远参考道的磁场数据,将本地的磁场信号分离为 MT 信号和噪声,得到了较好的阻抗估计.

本文针对国内 MT 数据受强相关噪声影响较为突出的问题对信噪分离方法进行研究,采用最小二乘 Robust 方法,利用不含相关噪声的远参考道数据,估算分离张量,将本地磁场数据分离为 MT 信号和噪声,从而估算高质量的张量阻抗.最后,利用模拟数据和 3 个地区的实测资料对所研究的大地电磁测深数据处理方法的应用效果进行检验.

1 大地电磁信噪分离原理

1.1 大地电磁信噪分离方法

地球的地电模型通常都是二维或三维的,即电阻率不仅沿垂向变化,沿水平方向也存在变化(Oettinger *et al.*, 2001).理论和实验都表明:地表观测的电场(E_x, E_y)和磁场(H_x, H_y)遵循如下公式(Dmitriev and Berdichevsky, 1979):

$$\begin{pmatrix} E_x & E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_x & H_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{yx} \\ Z_{xy} & Z_{yy} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

可简写为 $\mathbf{E} = \mathbf{H}\mathbf{Z}$, 其中 $Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}$ 是能够反映地球电性结构的阻抗系数.

最小二乘法是传统的大地电磁数据处理方法,建立在以傅立叶变换为基础的谱分析基础上,目前仍被广泛使用.假定两个磁场数据不受噪声影响,就可以得到如下标准线性回归模型:

$$\mathbf{E} = \mathbf{H}\mathbf{Z} + \mathbf{R}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{R}$ 为残差,表示电场分量的不相关噪声.公式(2)的最小二乘解为:

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{H}^\dagger \mathbf{H})^{-1} (\mathbf{H}^\dagger \mathbf{E}), \quad (3)$$

式中: $\dagger$ 表示复共轭转置.远参考方法得到的张量阻抗公式为:

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{H}_r^\dagger \mathbf{H})^{-1} (\mathbf{H}_r^\dagger \mathbf{E}). \quad (4)$$

引入权值 ω , 公式(2)的加权最小二乘解为(李桐林等, 1999, 柳建新等, 2003, Chave and Thomson, 2004):

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{H}^\dagger \omega \mathbf{H})^{-1} (\mathbf{H}^\dagger \omega \mathbf{E}), \quad (5)$$

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{H}_r^\dagger \omega \mathbf{H})^{-1} (\mathbf{H}_r^\dagger \omega \mathbf{E}).$$

Robust 方法和远参考方法适用于处理尖峰噪声和异常值.在强相关噪声影响下,当 Robust 和远参考方法均不能给出正确的 MT 张量阻抗时,则必须考虑将噪声和信号分离,以提高阻抗估算的质量.

实际上,观测的电场数据 $\mathbf{E}$ 和磁场数据 $\mathbf{H}$ 通常是由电离层产生的 MT 信号 $\mathbf{E}^{\text{MT}}$ 和 $\mathbf{H}^{\text{MT}}$ 、人文活动产生的相关噪声 $\mathbf{E}^{\text{CN}}$ 和 $\mathbf{H}^{\text{CN}}$ 以及环境因素产生的不相关噪声 $\mathbf{E}^{\text{UN}}$ 和 $\mathbf{H}^{\text{UN}}$ 叠加而成,即:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^{\text{MT}} + \mathbf{E}^{\text{CN}} + \mathbf{E}^{\text{UN}}, \quad (6)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}^{\text{MT}} + \mathbf{H}^{\text{CN}} + \mathbf{H}^{\text{UN}}.$$

式中: 电场 MT 信号和相关噪声满足如下关系式:

$$\mathbf{E}^{\text{MT}} = \mathbf{H}^{\text{MT}} \mathbf{Z}^{\text{MT}}, \quad (7)$$

$$\mathbf{E}^{\text{CN}} = \mathbf{H}^{\text{CN}} \mathbf{Z}^{\text{CN}}.$$

对于远参考道数据,本地噪声可视作不相关噪声,因此, $\mathbf{R}_H = \mathbf{H}^{\text{CN}} + \mathbf{H}^{\text{UN}}$ 表示为 $\mathbf{H}^{\text{CU}}$.为从本地磁场 $\mathbf{H}$ 分离出 $\mathbf{H}^{\text{MT}}$ 和 $\mathbf{H}^{\text{CN}}$, 利用不含相关噪声的远参考道磁场 $\mathbf{H}_r$, 可建立 $\mathbf{H}_r$ 与本地磁场的估计公式:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_r \mathbf{T} + \mathbf{R}_H. \quad (8)$$

利用 Robust 方法求解分离张量 $\mathbf{T}$, 得到下式:

$$\mathbf{T} = (\mathbf{H}_r^\dagger \omega \mathbf{H}_r)^{-1} (\mathbf{H}_r^\dagger \omega \mathbf{H}), \quad (9)$$

此处, $\dagger$ 为共轭转置.在一维模型情况下,远参考磁场 $\mathbf{H}_r$ 和本地磁场 $\mathbf{H}$ 相等,那么 $\mathbf{T}$ 为单位矩阵.如果远参考站和本地站距离很近,情况类似.但地球的地电模型很难是一维的,这就要求远参考站要和含有相关噪声的本地站足够远才行.但是,横向传导异常产生感应电流,使得在场源顶部产生异常磁场,那么磁场就不同于临近磁场,分离张量 $\mathbf{T}$ 就不是单位矩

阵,其为复数,且随频率变化而变化.

利用分离张量 $\underline{T}$ 和远参考道磁场数据,估算本地磁道天然场信号(MT 信号):

$$\underline{H}^{MT} = \underline{H}_r \underline{T}, \tag{10}$$

则:

$$\underline{H}^{CU} = \underline{H} - \underline{H}^{MT} = \underline{H} - \underline{H}_r \underline{T}. \tag{11}$$

本地电场表示为:

$$\underline{E} = \underline{H}^{MT} \underline{Z}^{MT} + \underline{H}^{CN} \underline{Z}^{CN} + \underline{E}^{UN}, \tag{12}$$

根据 Oettinger *et al.* (2001) 研究,令 $\underline{R} = \underline{E}^{UN} - \underline{H}^{UN} \underline{Z}^{CN}$, 则

$$\underline{E} = \underline{H} \underline{Z} + \underline{R}, \tag{13}$$

其中,

$$\underline{H} = \begin{pmatrix} H_{x1}^{MT} & H_{y1}^{MT} & H_{x1}^{CU} & H_{y1}^{CU} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{xN}^{MT} & H_{yN}^{MT} & H_{xN}^{CU} & H_{yN}^{CU} \end{pmatrix},$$
$$\underline{Z} = \begin{pmatrix} Z_{xx}^{MT} & Z_{yx}^{MT} \\ Z_{xy}^{MT} & Z_{yy}^{MT} \\ Z_{xx}^{CN} & Z_{yx}^{CN} \\ Z_{xy}^{CN} & Z_{yy}^{CN} \end{pmatrix}.$$

$\underline{E}^{UN}$ 和 $\underline{H}^{UN}$ 为不相关噪声,则 $\underline{R}$ 为不相关噪声. 若 $\underline{R}$ 满足高斯分布,可得到公式 (13) 的最小二乘解:

$$\underline{Z} = (\underline{H}^{\dagger} \underline{H})^{-1} (\underline{H}^{\dagger} \underline{E}), \tag{14}$$

若 $\underline{R}$ 不满足高斯分布,利用 Robust 方法求解张量阻抗 $\underline{Z}$, 得到下式:

$$\underline{Z} = (\underline{H}^{\dagger} \underline{w} \underline{H})^{-1} (\underline{H}^{\dagger} \underline{w} \underline{E}). \tag{15}$$

利用信噪分离方法求解 $\underline{Z}$ 流程如图 1 所示.

1.2 信噪分离方法与远参考方法对比

由于 $\underline{H}^{MT}$ 与 $\underline{H}^{CU}$ 统计独立 (Egbert, 1997), 得到:

$$\underline{H}^{CU\dagger} \underline{H}^{MT} = 0. \tag{16}$$

公式 (14) 可表示为:

$$\begin{pmatrix} \underline{Z}^{MT} \\ \underline{Z}^{CN} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} (\underline{H}^{MT\dagger}) \\ (\underline{H}^{CU\dagger}) \end{bmatrix} (\underline{H}^{MT} \quad \underline{H}^{CU})^{-1} \begin{bmatrix} (\underline{H}^{MT\dagger}) \\ (\underline{H}^{CU\dagger}) \end{bmatrix} \underline{E}. \tag{17}$$

利用公式 (16)、(17) 可得到:

$$\begin{pmatrix} \underline{Z}^{MT} \\ \underline{Z}^{CN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{H}^{MT\dagger} \underline{H}^{MT} & 0 \\ 0 & \underline{H}^{CU\dagger} \underline{H}^{CU} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \underline{H}^{MT\dagger} \underline{E} \\ \underline{H}^{CU\dagger} \underline{E} \end{pmatrix}, \tag{18}$$

则,

$$\underline{Z}^{MT} = (\underline{H}^{MT\dagger} \underline{H}^{MT})^{-1} \underline{H}^{MT\dagger} \underline{E} =$$
$$[(\underline{H}_r \underline{T})^{\dagger} \underline{H}_r \underline{T}]^{-1} [(\underline{H}_r \underline{T})^{\dagger} \underline{E}] =$$
$$[(\underline{T}^T)^* \underline{H}_r^{\dagger} \underline{H}_r \underline{T}]^{-1} (\underline{T}^T)^* \underline{H}_r^{\dagger} \underline{E} =$$

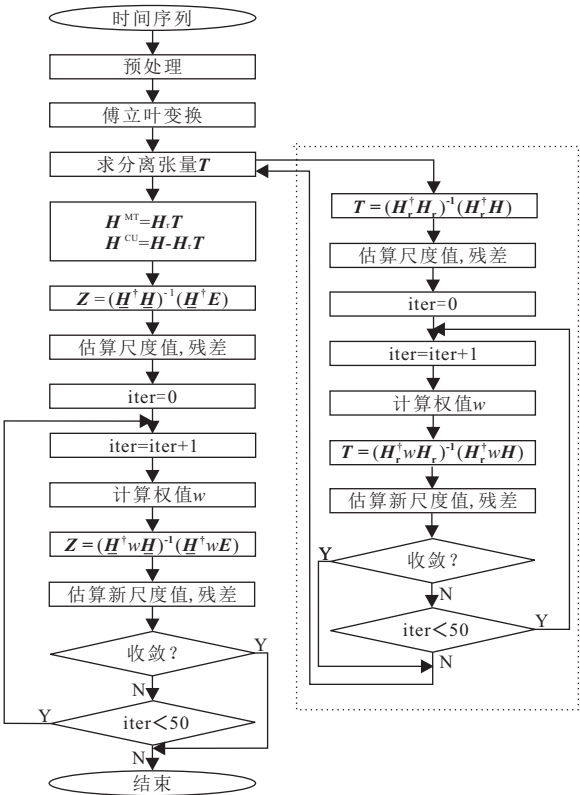


图 1 信噪分离方法总体流程

Fig.1 Flow chart for the basic steps used to compute impedance tensor

$$\underline{T}^{-1} (\underline{H}_r^{\dagger} \underline{H}_r)^{-1} [(\underline{T}^T)^*]^{-1} (\underline{T}^T)^* \underline{H}_r^{\dagger} \underline{E} =$$
$$\underline{T}^{-1} (\underline{H}_r^{\dagger} \underline{H}_r)^{-1} \underline{H}_r^{\dagger} \underline{E}. \tag{19}$$

比较公式 (4) 和公式 (19) 可知, 如果远参考道磁场和本地磁场噪声不相关, 远参考方法和信噪分离方法都能估算高质量的张量阻抗. 如果含有相关噪声, 信噪分离方法单独估算 MT 张量阻抗和相关噪声张量阻抗, 从而能够估算更稳定的张量阻抗. 另外, 由公式 (12)、(13) 可得, 信噪分离方法的残差不包含相关噪声, 而远参考方法的相关噪声使残差变大, 从而使张量阻抗的误差棒变大.

2 模拟数据的处理

为了检验信噪分离方法, 选择实测数据进行处理, 结果见图 2. 图中, 利用 Robust 方法 (Egbert and Booker, 1986) 和信噪分离方法得到的视电阻率和相位曲线一致, 表明数据质量较好, 信噪分离方法可行.

利用蒙特卡洛法 (Touran and Wiser, 1992) 分别产生原时间序列振幅 10%、20% 的模拟相关噪

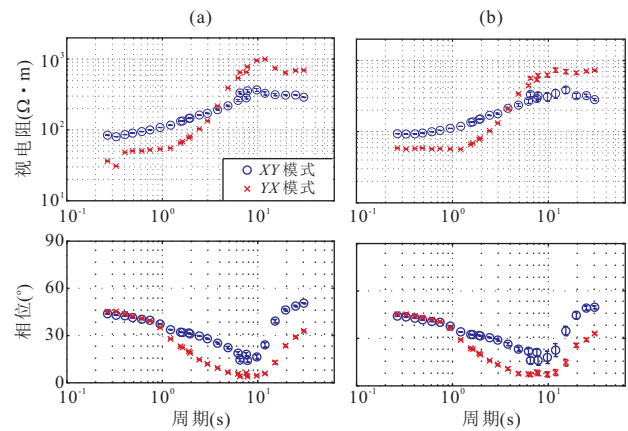


图 2 原始时间序列的视电阻率和相位曲线

Fig.2 Apparent resistivity and phase estimates of original time series

a. Robust 方法; b. 信噪分离方法

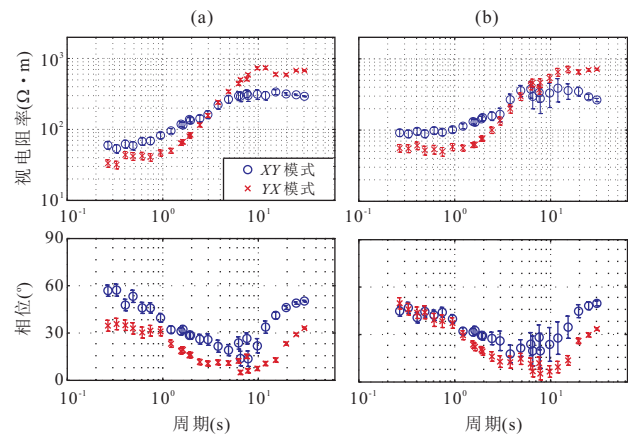


图 3 噪声占 10% 的时间序列的视电阻率和相位曲线

Fig.3 Apparent resistivity and phase estimates of time series (10% noise)

a. Robust; b. 信噪分离方法

声,并加到原始磁场和电场时间序列中,分别估算其张量阻抗,得到视电阻率和相位曲线如图 3、图 4 所示。

比较图 2、3、4,对于受相关噪声影响较小的数据,信噪分离方法和 Robust 方法都能获得连续、平滑的视电阻率和相位曲线。随着相关噪声的加入,信噪分离方法得到的视电阻率和相位曲线比 Robust 方法连续、平滑,只是误差棒稍大。

3 实际应用

通常,在 1 s 附近的大地电磁场信号较微弱,使得信噪比低,难以获取高质量的阻抗数据 (Iliceto

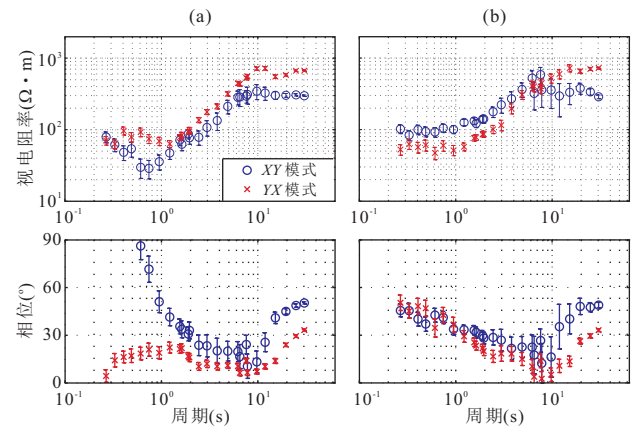


图 4 噪声占 20% 的时间序列的视电阻率和相位曲线

Fig.4 Apparent resistivity and phase estimates of time series (20% noise)

a. Robust 方法; b. 信噪分离方法

and Santarato, 1999). 因此,笔者重点介绍 0.2 ~ 20 s 之间的大地电磁数据处理结果。利用研究的信噪分离方法,处理 3 个点的实测数据,并与 Robust 方法和远参考方法 (Egbert and Booker, 1986) 处理结果进行对比,以检验该方法的实用效果。

3.1 实例 1

该例中,远参考站在本地测点西北方向 67.5 km 处。图 5a 为利用最小二乘 Robust 方法处理所得到的结果。视电阻率和相位在 10 s 处的跳跃以及视电阻率曲线在 0.3 ~ 10 s 之间呈 45° 快速上升,表现为本地电性源相关噪声的特征。利用远参考方法可以完全解决跳变的问题 (图 5c)。利用信噪分离方法 (图 5d) 得到了和远参考方法同样的结果,且相位曲线更连续。图 5b 为相关噪声视电阻率和相位曲线,其视电阻率曲线 (图 5b 上面板圆圈) 随时间呈 45° 上升,相位曲线 (图 5b 下面板圆圈) 接近于 0°,这种特性符合电偶极子近场源模型。比较图 5a 和 5b,相关噪声和利用 Robust 方法得到的张量阻抗类似,说明相关噪声强于 MT 信号,整个时间序列被相关噪声湮没。信噪分离方法在一定程度上去除了相关噪声的影响,准确估算了大地电磁张量阻抗。

3.2 实例 2

本例中,远参考站在本地测点东南方向 61.85 km 处。图 6 中,Robust 方法 (图 6a) 视电阻率和相位曲线连续性较差,相关噪声导致相位在 1 ~ 8 s 处跳跃变化。远参考方法 (图 6b) 得到较为平滑的曲线,但是在 3 ~ 10 s 之间存在较大的误差。信噪分离方法 (图 6c) 得到非常光滑、平稳的视电阻率和相位曲线。

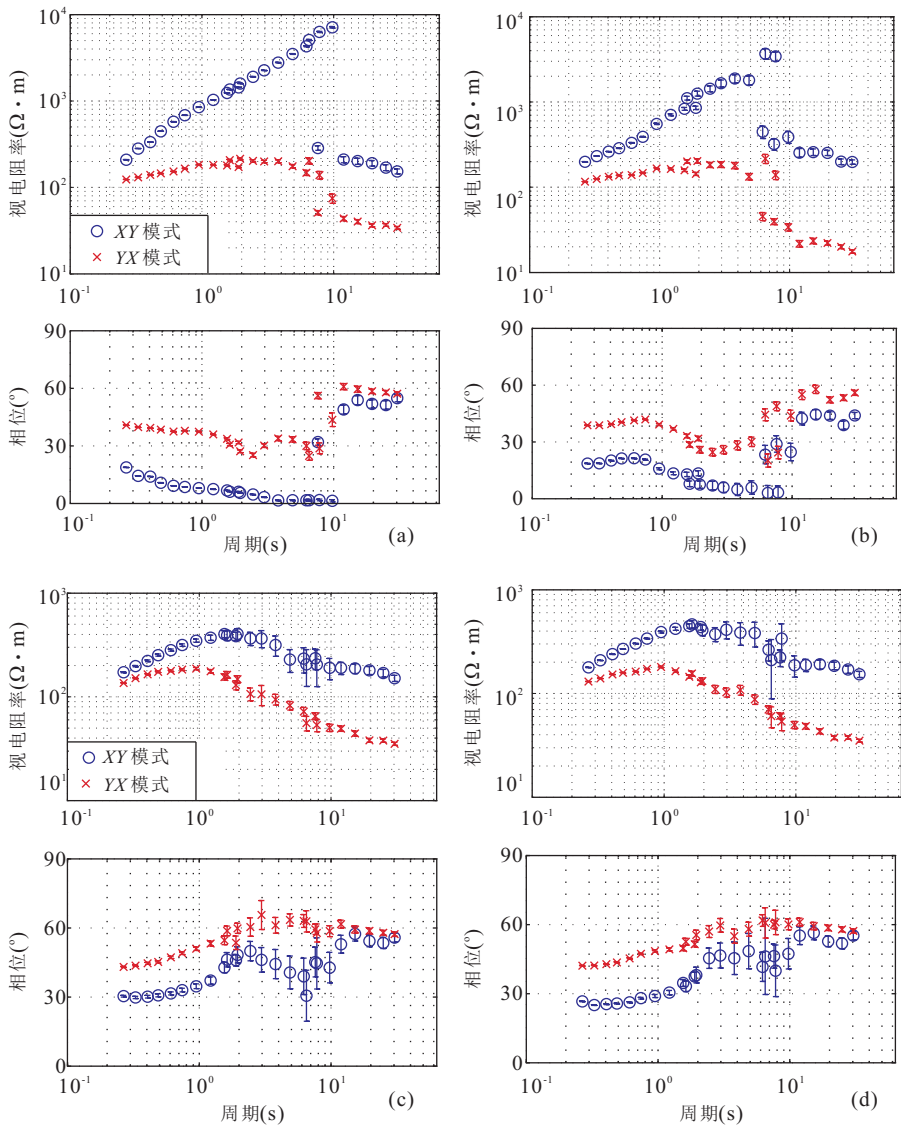


图 5 实例 1 中 Robust (a)、远参考方法(c)和信噪分离方法(相关噪声(b)、MT 信号(d))比较

Fig.5 Comparison of the results obtained from robust least square(a), robust remote reference(c) and signal-noise separation method (correlated noise(b), MT signal(d)) respectively in the first example

3.3 实例 3

本例中,远参考站在本地测点东南方向 391.7 km处.由于本地磁场强噪声的干扰,Robust 方法(图 7a)无法得到有效的张量阻抗.利用远参考方法(图 7b)能够得到较为准确的张量阻抗估算,但是在 2~20 s 之间,误差较大.在 10 s 处,视电阻率和相位均急剧跳变.信噪分离方法(图 7c)得到正确的张量阻抗估算,视电阻率和相位曲线平滑.

4 结论

为了估算受相关噪声影响的大地电磁数据的张量阻抗,本文研究了基于 Robust 最小二乘法的信

噪分离方法.利用不含相关噪声的远参考道数据和本地数据计算分离张量,将本地磁场观测信号分离为 MT 信号和噪声.并对远参考方法和信噪分离方法进行了对比.对模拟数据与实测数据进行处理和对比,结果表明,对于易受噪声干扰的 1~10 s 间的数据,Robust 方法给出了极不稳定的张量阻抗,远参考方法得到的张量阻抗比信噪分离方法得到的张量阻抗误差棒稍大.对于受到强相关噪声干扰的数据,信噪分离方法较好地提高了张量阻抗估算的质量,其结果远远好于 Robust 方法和远参考方法.

利用信噪分离方法的关键是要找到一个受相关噪声影响较小的远参考站.如果采用若干个远参考站进行观测,则需要分析远参考站受相关噪声影响

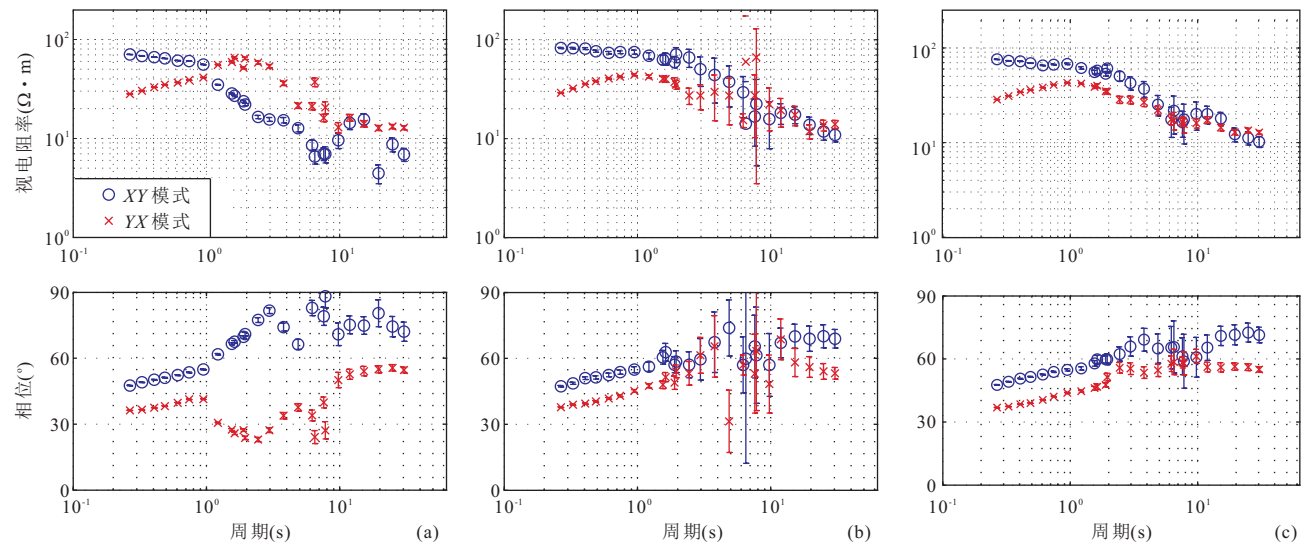


图 6 实例 2 中 Robust 方法(a)、远参考方法(b)和信噪分离方法(c)比较

Fig.6 Comparison of the results obtained from robust least square (a), robust remote reference (b) and signal-noise separation method(c) respectively in the second example

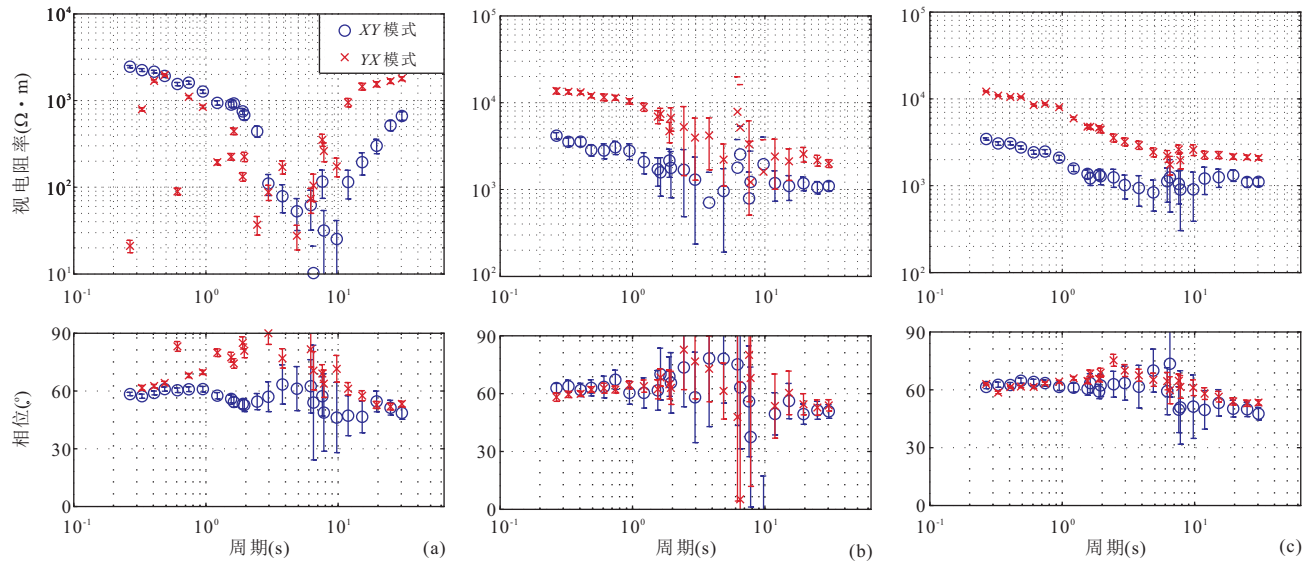


图 7 实例 3 中 Robust 方法(a)、远参考方法(b)和信噪分离方法(c)比较

Fig.7 Comparison of the results obtained from robust least square (a), robust remote reference (b) and signal-noise separation method(c) respectively in the third example

程度,以便选取最合适的远参考站。

References

Chave, A.D., Thomson, D.J., 2004. Bounded Influence Magnetotelluric Response Function Estimation. *Geophysical Journal International*, 157: 988–1006. doi:10.1111/j.1365-246X.2004.0203.x

Chen, J., Heincke, B., Jegen, M., et al., 2012. Using Empirical Mode Decomposition to Process Marine Magnetotelluric Data. *Geophysical Journal International*, 190: 293–

309. doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05470.x

Dmitriev, V. I., Berdichevsky, M. N., 1979. The Fundamental Model of Magnetotelluric Sounding. *Proceedings of the IEEE*, 67 (7): 1034–1044. doi: 10.1109/PROC.1979.11386

Egbert, G. D., 1997. Robust Multiple-Station Magnetotelluric Data Processing. *Geophysical Journal International*, 130: 475–496. doi: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb05663.x

Egbert, G. D., Booker, J. R., 1986. Robust Estimation of Geo-

- magnetic Transfer Functions. *Geophysical Journal International*, 87: 173—194. doi: 10.1111/j.1365—246X.1986.tb04552.x
- Gamble, T. D., Goubau, W. M., Clarke, J., 1979. Magnetotellurics with a Remote Magnetic Reference. *Geophysics*, 44 (1): 53—68. doi: 10.1190/1.1440923
- Garcia, X., Jones, A. G., 2008. Robust Processing of Magnetotelluric Data in the AMT Dead Band Using the Continuous Wavelet Transform. *Geophysics*, 73 (6): F223—F234. doi: 10.1190/1.2987375
- Iliceto, V., Santarato, G., 1999. On the Interference of Man-Made EM Fields in the Magnetotelluric ‘Dead Band’. *Geophysical Prospecting*, 47 (5): 707—719. doi: 10.1046/j.1365—2478.1999.00153.x
- Jones, A. G., Chave, A. D., Egbert, G., et al., 1989. A Comparison of Techniques for Magnetotelluric Response Function Estimation. *Journal of Geophysical Research*, 94 (B10): 201—213. doi: 10.1029/JB094iB10p14201
- Larsen, J. C., Mackie, R., Manzella, A., et al., 1996. Robust Smooth Magnetotelluric Transfer Functions. *Geophysical Journal International*, 124 (3): 801—819. doi: 10.1111/j.1365—246X.1996.tb05639.x
- Law, L. K., Auld, D. R., Booker, J. R., 1980. A Geomagnetic Variation Anomaly Coincident with the Cascade Volcanic Belt. *Journal of Geophysical Research*, 85 (B10): 5297—5302. doi: 10.1029/JB085iB10p05297
- Li, T. L., Weng, A. H., Lin, J., 1999. Robust Estimation of Electromagnetic Function for Marine Magnetotelluric Data. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29 (1): 81—83 (in Chinese).
- Liu, J. X., Yan, J. B., He, J. S., et al., 2003. Robust Estimation Method of Sea Magnetotelluric Impedance Based on Correlative Coefficient. *Chinese Journal of Geophysics*, 46 (2): 241—245 (in Chinese with English abstract).
- Oettinger, G., Haak, V., Larsen, J. C., 2001. Noise Reduction in Magnetotelluric Time-Series with a New Signal-Noise Separation Method and Its Application to a Field Experiment in the Saxonian Granulite Massif. *Geophysical Journal International*, 146 (3): 659—669. doi: 10.1046/j.1365—246X.2001.00473.x
- Tang, J. T., Li, J., Xiao, X., et al., 2012. Mathematical Morphology Filtering and Noise Suppression of Magnetotelluric Sounding Data. *Chinese Journal of Geophysics*, 55 (5): 1784—1793 (in Chinese with English abstract).
- Touran, A., Wiser, E. P., 1992. Monte Carlo Technique with Correlated Random Variables. *Journal of Construction Engineering and Management*, 118 (2): 258—272. doi: 10.1061/(ASCE)0733—9364(1992)118:2(258)
- Wang, J. Y., Xu, Y. X., Hu, X. Y., et al., 1998. Methods and Advances for Estimation of Magnetotelluric Response Function Abroad. *Earth Science Frontiers*, 5 (1—2): 217—222 (in Chinese with English abstract).
- Wei, W. B., Tan, H. D., Jin, S., et al., 2002. Conductivity Structure of Lithosphere in Central North China: Magnetotelluric Study of Yingxian-Shanghe Profile. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27 (5): 645—660 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. X., Wang, J. Y., 2000. Power Spectrum Estimation for Magnetotelluric Signal Based on Continuous Wavelet Transform. *Chinese Journal of Geophysics*, 43 (5): 677—683 (in Chinese with English abstract).
- Ye, G. F., Jin, S., Wei, W. B., et al., 2007. Research of Conductive Structure of Crust and Upper Mantle beneath the South-Central Tibetan Plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32 (4): 491—498 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 李桐林, 翁爱华, 林君, 1999. 海洋环境中大地电磁测深阻抗的 Robust 估计. 长春科技大学学报, 29 (1): 81—83.
- 柳建新, 严家斌, 何继善, 等, 2003. 基于相关系数的海底大地电磁阻抗 Robust 估算方法. 地球物理学报, 46 (2): 241—245.
- 汤井田, 李晋, 肖晓, 等, 2012. 数学形态滤波与大地电磁噪声压制. 地球物理学报, 55 (5): 1784—1793.
- 王家映, 徐义贤, 胡祥云, 等, 1998. 国外大地电磁响应函数估计方法. 地学前缘, 5 (1—2): 217—222.
- 魏文博, 谭捍东, 金胜, 等, 2002. 华北中部岩石圈电性结构—应县—商河剖面大地电磁测深研究. 地球科学——中国地质大学学报, 27 (5): 645—650.
- 徐义贤, 王家映, 2000. 基于连续小波变换的大地电磁信号谱估计方法. 地球物理学报, 43 (5): 677—683.
- 叶高峰, 金胜, 魏文博, 等, 2007. 青藏高原中南部地壳与上地幔导电性结构. 地球科学——中国地质大学学报, 32 (4): 491—498.