

文章编号:0253-9993(2012)10-1732-05

合成孔径瞬变电磁成像数值模拟

张 军¹,赵 莹²,刘银爱³

(1. 中煤科工集团西安研究院,陕西 西安 710054;2. 西安大地测绘工程有限责任公司,陕西 西安 710054;3. 西北有色地质勘查局物化探总队,陕西 西安 710068)

摘 要:借鉴合成孔径雷达中合成孔径的思想,对虚拟波场数据进行处理,即相关合成处理,就是将传统的以剖面为主的处理方式发展成为以测点为中心的多孔径合成及逐点推移多次覆盖的处理方法,达到提高信噪比、突出弱异常进而提高分辨率、加大勘探深度的目的。通过对理论模型数据的处理,验证了该方法的有效性。对不同理论模型的处理表明,相关合成达到了增强有用信号,提高信噪比,提高分辨率的效果。证明合成孔径瞬变电磁成像数值计算的可行性与有效性。

关键词:瞬变电磁法;合成孔径;相关;反滤波;波场变换

中图分类号:P631.3 **文献标志码:**A

Imaging simulation of synthetic aperture transient electromagnetic

ZHANG Jun¹, ZHAO Ying², LIU Yin-ai³

(1. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Dadi Surveying Mapping Project Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 3. Geophysical Corps of Northwest Geological Exploration Bureau, Xi'an 710068, China)

Abstract: Drew lesson from the synthetic aperture radar, and made the further processing to the fictitious wave-field data, that was correlation and synthesizing processing. Specifically, developed the traditional mode of processing that mainly based on profiles into a new method, in which, several apertures synthesis with the measure point as the center, lapse point-by-point, finally, multiple coverage was adopted. In hopes to improves the signal-to-noise ratio, highlight the abnormal, improves the resolution and increases the exploration depth. Through the processing of theoretical model data, verified the effectiveness of this method. The different theoretical model processing suggests that related to enhanced synthesis of useful signal, to improve the signal to noise ratio, resolution enhancement effect. The feasibility and validity of synthetic aperture of transient electromagnetic imaging numerical calculation was demonstrated.

Key words: transient electromagnetic method; synthetic aperture; correlation; inverse filtering; wave-field transform

瞬变电磁法的研究最早开始于 20 世纪 30 年代^[1-7]。到了 20 世纪七八十年代,前苏联学者 Жданов 将“偏移成像”正式引入到电磁法中。从此,基本形成了两种偏移方法,即正则化偏移和解析法偏移。在目前的瞬变电磁偏移成像处理中,由于存在采样时间稀疏、采样间距较大等问题,使得波场变换后成像的分辨率不高^[8-18]。而如果大量增加测点数目、加密采样时间,又会使得计算量相当可观,影响处理效率。因此,迫切需要寻找新的方法和技术,能够充分利用现有的数据,最大程度地提取其中的信

息,提高分辨率和勘探精度^[18-21]。

借助合成孔径的基本思想,提出一套新的数据处理方法,即多孔径数据合成技术,将常规的以剖面处理为主的技术发展成为以测点为中心的周围多孔径合成及逐点推移多次覆盖的处理技术,由此提高瞬变电磁法的分辨率^[22-24]。通过对模型数据的计算,对比传统方法与合成孔径技术的处理,验证该方法的有效性。该项技术拓展和丰富了瞬变电磁场的内涵,使得从实测资料中提取到常规方法提取不到的信息,对地下目标体成像更为有利,最终达到提高分辨率、实

现精细探测的目的。

1 合成孔径原理

合成孔径技术最早是应用在雷达方面。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是 20 世纪发展最为迅速、被认为具有最大应用潜力的一种新型成像雷达系统。它在方位向上采用合成孔径技术,在距离向上采用脉冲压缩技术,可以得到高质量的二维雷达图像。

合成孔径雷达是通过飞行平台的向前运动实现合成孔径。这种利用天线的移动,将小孔径的雷达天线虚拟成一个大孔径的天线,获得类似大孔径天线探测效果的雷达遥感测量称为合成孔径雷达遥感技术。

在合成孔径雷达中,从地表目标返回的脉冲在入射波束照射到目标期间都会不断地接收。因此,对于一个地面物体 P,天线在 X_1 位置开始接收到其散射信号直至飞行体移动到位置 X_N 为止(图 1)。设 X_1 到 X_N 的距离为 L_s ,可以得到方位向的空间分辨率为

$$\Delta L_s = \beta_s R = D/2$$

式中, β_s 为合成天线阵的波束宽度; R 为天线到地物距离; D 为真实孔径。

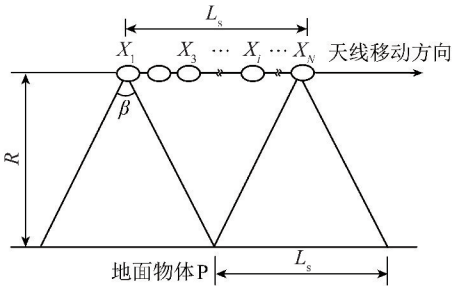


图 1 合成孔径原理

Fig. 1 Schematic of synthetic aperture

合成孔径雷达的距离向分辨率与真实孔径雷达的距离向分辨率相同,方位向分辨率等于实际天线孔径的一半,并且与雷达波长和目标所在的位置无关。

用天线发出第 1 个脉冲并接收从目标散射回来的第 1 个回波脉冲,把它存储起来,再按照理想的直线移动一定距离到第 2 个位置。小天线在第 2 个位置上再发一个同样的脉冲波,并把第 2 个脉冲回波接收后也存储起来。以此类推,一直到这个小天线移动的直线长度相当于阵列大天线的长度为止。这时候把存储起来的所有回波都取出来,同样按照矢量相加的方法相加。这就是合成孔径成像处理方法的实质。

从上述合成孔径原理可以看出,合成孔径越长,将越有利于提高合成孔径的分辨率。

2 瞬变电磁合成孔径方法

瞬变电磁的相关合成,也可称为相关叠加。由于瞬变电磁经过波场变换,已经把原来的感应场转换成了波场,每一点的数据相当于变成了自激自收的波动场。前人已经通过实验分析确定瞬变电磁场在多激励源情况下存在场的相关叠加性,并且多孔径场源产生的一次磁场要比单孔径产生的一次磁场强,因此从某种程度上可以认为采用多孔径发射源改善了辐射场的方向性,使一次场得到加强。不仅一次场如此,实验研究表明感应的二次场也具有类似的特征。基于瞬变电磁场的上述特点,笔者采用相关分析、相关叠加的方法来进行合成。

相关分析是资料数字处理中的一种基本的分析、运算方法,它既可以考察两个波形是否相似或相似的程度,也可以看成是一种线性滤波。相关可分为自相关和互相关;自相关是一组数据与自身做相关;互相关用于衡量两组数据的相似性。

2.1 合成孔径

瞬变电磁场波场变换是拟地震偏移的依据和基础。瞬变电磁场波场变换问题的成功解决,使得瞬变电磁拟地震偏移成像成为可能。电磁波场偏移成像处理主要采用 Kirchhoff 积分法进行。为了进一步提高成像的分辨率,最大程度地利用现有的数据,尽可能多地获得有用信息,借鉴了合成孔径雷达等方面的合成孔径的思想。采用拟地震多道相干的方法对波场变换后,并经过反褶积处理的瞬变电磁数据作进一步的处理。合成孔径示意如图 2 所示。

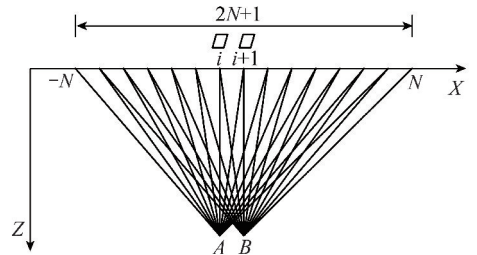


图 2 合成孔径示意

Fig. 2 Diagram of synthetic aperture

首先,选取一个中心点,取为第 i 点,此点的波场值可表示为 $s(i)$ 。然后选定 $2N+1$ 的长度为合成孔径的长度,即选取 i 点左右两侧从 $-N$ 到 N 的点分别与中心点作相关,得到 $2N+1$ 个相关系数,可用 $\rho_{i,k}$ 表示,其中 k 的变化范围为 $-N \sim N$ 。

由于波场变换后,在反射层的位置,波动会很剧烈,两列波形相似的数据相关后,得到的相关系数往往会很大。以这样的相关系数为权系数叠加到中心

点上时,相当于人为地改变了中心点的幅值。所以,需要对相关系数作归一化处理。

2.2 相关处理

在进行相关处理前需要进行瞬变电磁的波场变换、波场的偏移成像处理。前人已经通过实验分析确定瞬变电磁场在多激励源情况下存在场的相关叠加性,基于瞬变电磁场的上述特点,采用相关叠加的方法来进行合成孔径。在进行叠加处理前首先了解合成孔径的相关处理。

得到中心点的合成值为

$$f(i) = \sum_{k=-N}^N \rho_{i,k} s(k)$$

式中, $s(k)$ 为波场值。

以一条测线的测点为例,依次向后移动,可得到第 $i+1, i+2, \dots$ 个点为中心点的合成值。

2.3 参数选取

在相关合成中,有几个非常关键的参数,这些参数的选择对最终合成的结果有很大的影响。

2.3.1 τ 值的选取

两个点的数据,例如 x_i 和 y_i 作相关时,相对时移量 τ 值的选取。相近两个点的波场值具有一定的相关性,但相对时移 τ 取多少进行相关较为合适,而且何时它们的相关性最好。将野外采集得到的感应磁场值进行波场变换,由于波场时间已经插值为等间距,所以在作互相关时,将 τ 取为时移个数。考虑到所有点相关的情况,将 τ 值取为 300。

2.3.2 相关系数

在合成叠加时,孔径长度的选择。即选择中心点以后,具体应该选取几个点的数据进行叠加且叠加后会有好的效果,需要通过实验选取。

通过计算得到每相邻两个点的相关系数,见表 1。从表中可以看到,最小的相关系数不到 0.2,而相关性较好的 8~11 号点的相关系数接近 1.0。另外,考虑到所选点个数较少,选择 3 个点合成。

表 1 相关系数

Table 1 Correlation coefficient

点号	相关系数	点号	相关系数
$\rho_{1,2}$	0.417 273 393 2	$\rho_{6,7}$	0.768 619 812 6
$\rho_{2,3}$	0.606 781 106 2	$\rho_{7,8}$	0.956 850 482 6
$\rho_{3,4}$	0.192 551 702 4	$\rho_{8,9}$	0.998 104 729 1
$\rho_{4,5}$	0.257 159 846 5	$\rho_{9,10}$	0.997 913 578 1
$\rho_{5,6}$	0.523 644 775 3	$\rho_{10,11}$	0.982 863 205 4

在进行相关叠加的过程中,首现需要计算两点之间的相关系数,相关系数越接近 1.0,说明相邻两点

间的相关性越好,此时进行合成叠加便会取得较好的效果。通过实验数据可以看出,8~11 号点相关系数接近 1.0,此时进行叠加可以取得较好的效果。

3 理论模型计算

分别设计了半空间中赋存高阻块状异常体和低阻块状异常体的模型,采用中心回线激发,对所得的电磁响应进行波场变换。以下计算中,只在主剖面上进行成像计算。

3.1 高阻异常体模型

均匀半空间的电阻率为 $\rho_1 = 10 \Omega \cdot m$ 。异常体为 $30 m \times 30 m \times 50 m$ 的块体,异常体电阻率为 $\rho_2 = 300 \Omega \cdot m$,异常体埋深为 70 m。处理得到的视电阻率断面图异常体位置不够精确。异常块体对纵向的电阻率影响范围较大,容易给异常体位置的判断带来误导。为进一步提高分辨率,将反褶积之后的数据进行相关合成处理。主剖面合成前后的对比如图 3 所示。

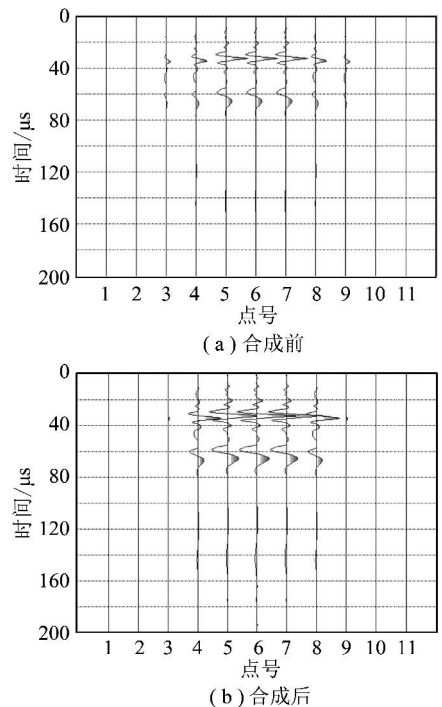


图 3 合成前后波形(高阻异常体)

Fig. 3 Synthesis waveform comparison chart (high resistance abnormal body)

由图 3 可见,在同等增益下,合成之后的波形比合成之前信号得到了加强,两个界面更加突出。而且在 3 号点和 9 号点处,原有的跳动减小了,使得异常体边缘的确定更加精确,它具有更高的分辨率。可见波场变换及其合成孔径技术,对发现异常体有很大的帮助。

3.2 低阻异常体模型

异常体电阻率为 $\rho_1 = 5 \Omega \cdot \text{m}$, 异常体上方及左右两侧电阻率为 $\rho_2 = 25 \Omega \cdot \text{m}$, 异常体埋深为 60 m, 异常体厚度也为 60 m。对正演数据进行处理, 得到的视电阻率断面图异常体的准确信息很难获得。将数据进行相关合成处理, 主剖面合成前后的对比如图 4 所示。

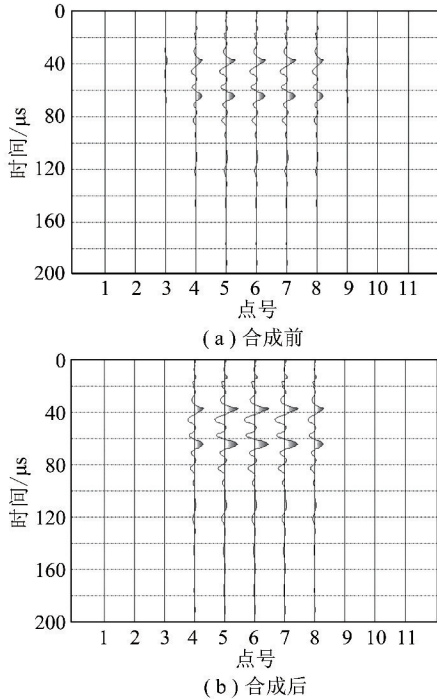


图 4 合成前后波形(低阻异常体)

Fig. 4 Synthesis waveform comparison chart
(high resistance abnormal body)

从图 4 中可以发现与高阻异常体模型相似的规律。合成后, 中心点的波形幅值最大, 并且向两边逐渐减小, 合成后 3 号点和 9 号点的波动基本消失, 这将有利于下一步的延拓成像。

4 实例分析

很多煤矿在开采过程中, 长期受到陷落柱、采空区等矿井地质灾害的困扰, 严重影响着矿井的生产建设。采用瞬变电磁法对煤矿的采空区作系统的研究, 探明其范围和埋深。将视电阻率数据组成一个三维数据体, 可得到电阻率三维立体图(图 5)。

图 5 中蓝色代表低阻区域, 蓝色越深则表示视电阻率越小; 红色代表高阻区域, 红色越深则表示视电阻率越高。浅层的第 1 个界面比较清晰, 第 2 个界面却反映模糊, 是一个渐变的过程。通过对电阻率三维立体图结果进行解释, 经验证解释结果与实际地质情况吻合较好。

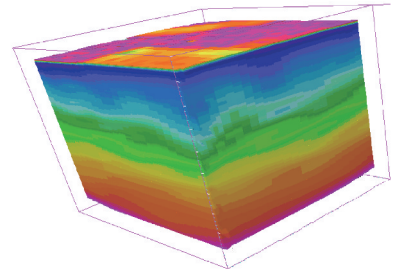


图 5 电阻率三维立体图

Fig. 5 Three-dimensional map of the resistivity

经过波场变换后的波形相当宽缓, 尤其是在第 2 个界面的地方, 致使无法确定界面的时间位置。而经过反褶积处理后的波形得到了很大的改善, 波形锐化了很多, 可以认为幅值极大值处就是界面位置。最后, 将其进行合成相关处理, 得到断面波形如图 6 所示。

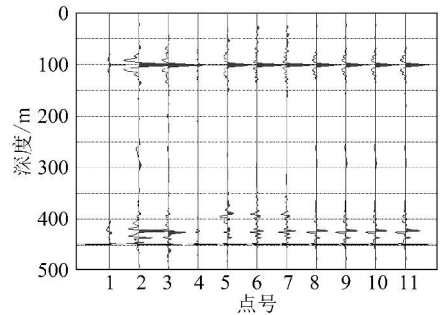


图 6 合成效果

Fig. 6 Synthesis effect diagram

在经过相关叠加后, 杂波得到了很好的处理, 突出了有用信号, 增强了信噪比, 从而提高了分辨率。在经过相关叠加后, 突出了有用信号, 增强了信噪比, 成像效果明显。这是相关性较好的有用信号得到增强的表现, 同时, 也将一些干扰和杂波进行了去除。

5 结语与建议

在瞬变电磁拟地震偏移成像方面作了进一步研究, 为进一步提高成像分辨率, 从现有数据资料中提取更多的有用信息, 借鉴合成孔径雷达中合成孔径的思想, 从而实现瞬变电磁中多个小框合成一个大框的想法。从不同深度模型的处理中发现, 相关合成确实具有增强有用信号、提高信噪比、提高分辨率的诸多优点。对理论模型的处理, 达到了预期的效果。

合成孔径思想引入到瞬变电磁中, 是一项探索性研究, 很多工作有待进一步深入研究。本文对合成孔径方法只是进行了初步尝试。文中是先进行了合成孔径, 在后面的工作中, 还将尝试聚焦合成孔径, 类似于合成孔径雷达中的聚焦成像。如果该方法进一步完善并加以应用, 将会对高分辨率瞬变电磁勘探具有

深远的意义。

参考文献:

- [1] 牛之璉. 时间域电磁法原理[M]. 长沙:中南大学出版社,1992:15-20.
- [2] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 北京:地质出版社,1990.
- [3] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M]. 北京:地质出版社,1998:52-53.
- [4] 何樵登. 地震勘探原理和方法[M]. 北京:地质出版社,1985:13-15,142-151,174-176.
- [5] Lee S, Memechan G A. Phase-field imaging: the electromagnetic equivalent of seismic migration[J]. Geophysics, 1987, 52(5): 678-693.
- [6] 方文藻,李予国,李 貅. 瞬变电磁测深法原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,1993:9-15.
- [7] 李 貅. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2002.
- [8] 李 貅,薛国强,郭文波. 瞬变电磁法拟地震成像研究进展[J]. 地球物理学进展,2007,22(3):811-816.
Li Xiu, Xue Guoqiang, Guo Wenbo. Research progress in TEM pseudo-seismic maging[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(3): 811-816.
- [9] 李 貅. 瞬变电磁虚拟波场的三维曲面延拓成像研究[D]. 西安:西安交通大学,2005.
- [10] 薛国强,李 貅,郭文波,等. 从瞬变电磁测深数据到平面电磁波场数据的等效转换[J]. 地球物理学报,2006,49(5):1539-1545.
Xue Guoqiang, Li Xiu, Guo Wenbo, et al. Equivalent transformation from TEM field sounding data to plane wave electromagnetic sounding data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1539-1545.
- [11] 李 貅,薛国强,宋建平,等. 从瞬变电磁场到波场的优化算法[J]. 地球物理学报,2005,48(5):1185-1190.
Li Xiu, Xue Guoqiang, Song Jianping, et al. An optimize method for transient electromagnetic field wave field conversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(5): 1185-1190.
- [12] 薛国强,李 貅,宋建平,等. 回线源瞬变电磁成像的理论分析及数值计算[J]. 地球物理学报,2004,47(2):338-343.
Xue Guoqiang, Li Xiu, Song Jianping, et al. Theoretical analysis and numerical calculation of loop-source transient electromagnetic imaging[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(2): 338-343.
- [13] 李 貅,全红娟,许阿祥,等. 瞬变电磁的微分电导成像[J]. 煤田地质与勘探,2003,31(3):59-61.
Li Xiu, Quan Hongjuan, Xu Axiang, et al. Differential coefficient imaging of the longitudinal conductance in the transient electromagnetic sounding[J]. Coal Geology and Exploration, 2003, 31(3): 59-61.
- [14] 朱宏伟,李 貅,张 军,等. 瞬变电磁法三维拟地震成像信息提取技术[J]. 地球物理学进展,2010,25(5):1648-1656.
Zhu Hongwei, Li Xiu, Zhang Jun, et al. Information collecting technology in 3-D pseudo-seismic imaging of transient electromagnetics[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(5): 1648-1656.
- [15] 张 军,李 貅,赵 莹,等. 瞬变电磁虚拟波场高分辨成像技术研究[J]. 地球物理学进展,2011,26(3):1077-1084.
Zhang Jun, Li Xiu, Zhao Ying, et al. A technology research of high resolution imaging for the transient electromagnetic pseudo wave field[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(3): 1077-1084.
- [16] 薛国强,李 貅,戚志鹏,等. 瞬变电磁拟地震子波宽度压缩研究[J]. 地球物理学报,2011,54(5):1384-1390.
Xue Guoqiang, Li Xiu, Qi Zhipeng, et al. Study of sharpening the TEM pseudo seismic waveform[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(5): 1384-1390.
- [17] 李 貅,戚志鹏,薛国强,等. 瞬变电磁虚拟波场的三维曲面延拓成像[J]. 地球物理学报,2010,53(12):3005-3011.
Li Xiu, Qi Zhipeng, Xue Guoqiang, et al. Three dimensional curved surface continuation image based on TEM pseudo wave field[J]. Chinese J. Geophys., 2010, 53(12): 3005-3011.
- [18] 陈本池,李金铭,周凤桐. 瞬变电磁场拟波动方程偏移成像[J]. 石油地球物理勘探,1999,34(5):546-554.
Chen Benchu, Li Jinming, Zhou Fengtong. Wave-field conversion method for transient electromagnetic field[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1999, 34(5): 546-554.
- [19] Zhdanov M S, Portnaguine O. Time-domain electro-magnetic migration in the solution of inverse problems[J]. Geophys. J. Int., 1997, 131: 293-309.
- [20] Zhdanov M S, Li W D. 2D finite-difference time domain electromagnetic migration[A]. 67th SEG EM2. 1[C]. 1997:370-373.
- [21] Spies B R. Depth of investigation in electromagnetic sounding methods[J]. Geophysics, 1989, 54(7): 872-888.
- [22] 张直中. 三维合成孔径雷达的原理和实例[J]. 雷达科学与技术,2006,4(1):12-14.
Zhang Zhizhong. The principle of 3D-SAR and its some examples[J]. Radar Science and Technology, 2006, 4(1): 12-14.
- [23] 游新兆,乔学军,王 琪,等. 合成孔径雷达干涉测量原理与应用[J]. 大地测量与地球动力学,2002,22(3):109-116.
You Xinzhaio, Qiao Xuejun, Wang Qi, et al. Synthetic aperture radar interferometer and its application[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2002, 22(3): 109-116.
- [24] 吴晓红,谢 明,干 可,等. SAR图像的特征提取与目标识别[J]. 四川大学学报(自然科学版),2007,44(6):1275-1280.
Wu Xiaohong, Xie Ming, Gan Ke, et al. Feature extraction and target recognition of SAR images[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2007, 44(6): 1275-1280.