MT 时间序列的 FIR 数字滤波分析

李建华^{1,2},林品荣²,何畏³,郑采君²

(1. 桂林工学院,广西桂林 541004;2. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所,河北 廊坊 065000;3. 中国矿业大学,北京 100083)

摘要:大地电磁测深法(MT)野外观测得到的原始资料是包含多种频谱的时间序列,这种时间序列中常包含不需要的信息和50 Hz 及其谐波的干扰。结合 FIR 数字滤波技术与 MT 时间序列的特征,提出了一种基于 FIR 数字滤波技术的 MT 时间序列去嗓方法,讨论了 FIR 数字滤波器的原理和实现,分析了理论数据通过 FIR 数字滤波的带通 和陷波处理,探讨了对实测时间序列的带通和陷波所取得的效果。

关键词:大地电磁测深; FIR 数字滤波; 数据处理;去噪

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 8918 (2007) S0 - 0024 - 05

大地电磁测深法(MT)作为地球物理勘探的主 要方法之一,是进行金属矿勘查、石油勘探、地热调 查、深部地球物理探测的有效手段。然而,由于大地 电磁测深的电磁波场特征[1-2]和数据处理的局限 性,信号分辨率较低,这一直是实际工作中困扰 MT 广泛应用的问题。近年来,MT 的响应函数估计方 法研究取得了喜人的进展。单站 Robust 与 Robust 远参考方法^[3]的引入,使 MT 抗噪性能大大提高,对 随机干扰的抑制更为有效,但当磁场和电场中含有 较强的相关噪声时,已有的数据处理技术就显不足。 在 MT 的资料处理中,通常用手工编辑或平滑方法 直接对受噪声于扰的视电阻率或阻抗相位曲线进行 处理,这不失为一种有效的去噪手段,但因存在较大 的随意性,它也只能当成一种补救措施,因此,需要 研究一种直接消除噪声影响的去噪方法。应用 FIR 数字滤波技术,可以在频率域直观地分析滤波的有 效性,而滤波的过程是在时间序列完成^[4],这种方 法能有效地应用于信噪分离。对干扰严重的 MT 数 据,在进入常规处理前,通过 FIR 数字滤波对其时间 序列进行处理,再转入 MT 常规计算,信噪比有所提 高,阻抗结果也得到了改善。

1 FIR 数字滤波器设计

在数字滤波器中, FIR 数字滤波器是一类结构 简单且总是稳定的滤波器。严格讲也只有 FIR 滤波 器可以实现线性相位。在大地电磁测深中,50 Hz 及其谐波干扰是最主要的噪声之一,为抑制其对被 测信号的污染,经常使用各种陷波器;为消除频带外 噪声对频带内信号的影响,可使用带通滤波来实现。

1.1 FIR 数字滤波器理论

数字滤波器是对数字信号进行滤波处理以得到 期望的响应特性的离散时间系统。用软件实现时, 它只是一段线性卷积程序^[5-8]。设数字滤波器的输 入为x(n)、输出为y(n),冲激响应为h(n),数学表 达式为

$$y(n) = \sum_{k=0}^{n=1} h(k)x(n-k)$$

一般的,数字滤波器的频率响应可表示为

$$H(e^{jw}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n) e^{-jwn} o$$

FIR DF 是指冲激响应函数 h(n) 为有限个值的数字 滤波器, FIR 数字滤波器的频率响应可表示为

$$H(e^{jw}) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-jwn},$$

或 $H(e^{jw}) = H_g(w)e^{j\theta(w)}$,

式中 $H_{g}(w)$ 称为幅度特性, $\theta(w)$ 称为相位特性。

1.2 FIR 数字滤波器的实现

1.2.1 FIR 数字带通滤波器

采用窗函数法^[9-10]设计 FIR 数字带通滤波器。 窗函数设计 FIR 滤波器的基本思想,就是根据给定 的滤波器技术指标,选择滤波器长度N和窗函数 w(n),使其具有最窄宽度的主瓣和最小的旁瓣。其

收稿日期:2007-09-10

基金项目:国土资源部百名优秀青年科技人才计划项目;中国地质调查局科技项目(1212010660301)资助

核心是从给定的频率特性通过加窗确定有限长单位 脉冲响应序列 h(n)。

设计之前,我们根据具体的应用要求确定了滤 波器的技术指标。该滤波器需要滤出频带范围外的 干扰,但在滤波过程中要求基本不改变频带范围内 的信号谱结构,因此,滤波器的理想频率特性为

$$H_{d}(e^{j\omega}) = \begin{cases} e^{-j\omega\tau}, & \omega_{l} \leq |\omega| \leq \omega_{h} \\ 0, & \pm \ell \ell \end{cases}$$

对上式求逆傅氏变换,可得到其冲击响应为

$$H_{d}(n) = \begin{cases} \frac{\sin[(n-\tau)\omega_{h}] - \sin[(n-\tau)\omega_{l}]}{\pi(n-\tau)}, & n \neq \tau \\ \frac{\pi^{-1}(\omega_{l} - \omega_{l})}{\pi(n-\tau)}, & n = \tau \end{cases}$$

式中, τ 、 ω_l 、 ω_h 分别是滤波器的群延时、高通截止频率和低通截止频率; ω 为数字角频率,它与模拟滤波频率f的关系为 $\omega = 2\pi f/f_{sa}$, f_{sa} 为采样率。Kaiser 窗是接近最优化窗结构的窗函数,它可以根据不同的参数调整滤波器的各项指标,设计中经过反复多次地寻优逼近及对滤波器频率响应的有效性分析,确定滤波器的长度 N 和 Kaiser 窗参数。

将上式代入 $h(n) = h_d(n)\omega(n)$,即可得到所求的滤波器冲激响应函数。计算采用 Fortran 语言编程实现,通过在计算机上仿真,得到带通滤波器的幅频响应如图 1 所示,可以看出,该带通滤波器在截止频率处过渡带窄,衰减达到 40 dB 以上,各项技术指标满足设计要求。



图1 带通滤波器的幅频响应

1.2.2 FIR 数字陷波器

FIR 数字陷波器采用模块法设计。所谓模块 法^[11],即是把滤波器所要求的频率特性看成由若干 个位于不同频率点上的近似于三角形的基本频率单 元(模块)组成,把与这些基本频率单元所对应的时 域序列相加便得到滤波器的冲激响应。本设计将数 字陷波器等效成为一个全通滤波器减去一个由基本 频率单元构成的点通滤波器,如图2所示;进而推导 出计算数字陷波器冲激响应的数学公式。该方法具 有公式简单、物理概念清晰,便于连续控制陷波点频 率等优点。



图 2 模块法构成陷波器的频域示意

根据图2,不难写出陷波器频率特性的数学表 达式

 $H(j\omega) = 1 - B[j(\omega - \omega_{*})] - B[j(\omega + \omega_{*})],$ 式中, $B[j(\omega - \omega_{*})]$ 为位于 ω_{*} 角频率处的基本频率 单元,并且B(0) = 1.5 ω_{*} 为陷波器陷波点的角频 率。为求得陷波器的滤波系数(冲激响应),做逆傅 里叶变换,有

$$h(n) = \delta(n) - \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \{B[(\omega - \omega_{s})] + B[j(\omega + \omega_{s})]\} e^{j\omega n} d\omega$$

进一步得到

$$h(n) = \delta(n) - 2\cos\omega_{s}n \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} B(j\omega) e^{j\omega n} d\omega$$

式中, $\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} B(j\omega) e^{j\omega n} d\omega$,是对应于基本频率单元的 时域序列;n = 0时, $\delta = 1$,否则, $\delta = 0$ 。

理想三角形频率单元在时域上是无限宽的^[12], 而我们需要的陷波器长度是有限的。为了得到有限 的冲激相应,应将 $B(j\omega)$ 所对应的时域序列限制为 有限序列,在实际应用中采用成熟的窗口序列作为 基本频率单元的时域序列。注意到 B(0) = 1和窗 口序列的 $\omega(0) = 1$,则应有

$$\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}B(j\omega)e^{j\omega n}d\omega = K\omega(n)$$

其中 K 为常系数,是由窗口宽度 N 及其形状所决定 的。通过对不同窗函数所设计陷波器的频率响应的 对比,选择汉宁窗作为陷波器的窗函数,经过一系列 的推导,得到相应的具有多个(p 个)独立陷波点特 性的滤波器计算公式

$$h(n) = \delta\left(n - \frac{N-1}{2}\right) -$$

· 25 ·

$$2K\sum_{i=1}^{p}\cos\omega_{i}\left(n-\frac{N-1}{2}\right)\omega\left(n-\frac{N-1}{2}\right),$$

式中,0≤n≤N-1。针对工频干扰的特征和数据处 理的需要,所设计的多点数字陷波器的幅频特性如 图3所示。可见,该陷波器对陷波点处的幅值衰减





达到 120 dB 以上,表明对 50 Hz 及其谐波干扰具有 良好的压制效果。

2 理论数据的 FIR DF 去噪分析

为对方法的可行性进行检验,根据 MT 中相应 频段的数据采样率构建了理论数据。图4 是滤波前 后的时间序列对比。可以发现,无论是带通还是多 点陷波后的时间序列的波形,均与其相应的理论时 间序列的波形几乎没有差别。振幅有所增加或减 少,这是由分析系统造成的,但这对 MT 的后期处理 几乎不会带来影响,因为,MT 形成阻抗结果时,利 用的是电场与磁场的商,而滤波对各道同时进行,在 求商的过程中,这种振幅的增加或减少会被抵消,不 会影响阻抗估算结果。



图4 滤波前后时间序列对比

3 实测数据的 FIR DF 去噪分析

采用前述的 FIR 滤波技术对野外实测数据进行 了处理,取得较满意的效果。

图 5 为海南某测区某测点的一个频段(采样率 为4 KHz)实际数据在滤波前后时域和频域的对比。 该测点由于临近工业区,数据存在较强的 50 周干 扰。为了获得用于工程勘察更精确的结果,经过带 通滤波器和多点陷波器对其进行滤波处理。从原始 时间序列和频谱曲线可以看到,50 Hz 及其谐波干 扰严重,基本上淹没了微弱的天然电磁场信号,时间 序列仅见的 50 Hz 干扰,其峰值达到1100 mV;而滤 波后的时间序列峰值最大仅为125 mV,且频谱曲线 也变得平滑。表明运用该滤波技术基本将不需要的 带外信号滤出,同时 50 周及其谐波的干扰得到了很 好的抑制。

在大地电磁测深实际工作中,根据数据处理的 需要将采样分成在多个不同的频段进行,每频段的 采样率均不相同,设计了针对不同频段的多个 FIR 数字滤波器^[13]。经过验证,均取得了与图 5 相似的 效果。

图 6a 是利用上面所述的原始数据,不做滤波处 理直接计算的视电阻率曲线。曲线明显不连续,在 50 Hz 及其谐波频率附近,视电阻率发生突变。在 图 7a 的阻抗相位曲线上同样能看到类似的特征,在 某些频点上阻抗相位跳动幅度大,曲线不连续。利



图 7 滤波前后阻抗相位曲线对比

用这样的曲线进行反演,往往会产生错误的结果。 经过带通、陷波后,阻抗估算质量得到了明显地 改善(图 6b、图 7b)。视电阻率曲线相对圆滑、连 续,突变现象不明显。同样,阻抗相位曲线也得到了 改善,原始阻抗相位曲线中的"飞点"得到了较为成 功的抑制,即通过带通陷波后,压制了带外与50 Hz 及其谐波的干扰,使阻抗估算的结果更能反应地下 地质体的电性变化。

4 结论

讨论了设计 FIR 数字滤波器的目的、原理和方法,通过理论数据与实测数据的 FIR 滤波检验,表明 FIR 数字滤波技术可以用于 MT 的去噪处理,以提 高大地电磁测深资料的数据质量和分辨率。

参考文献:

- [1] 考夫曼 A A,凯勒 G V. 大地电磁测深法[M]. 北京:地震出版 社,1987.
- [2] 陈乐寿,王光锷.大地电磁测深法[M].北京:地质出版社.
- [3] 张全胜,杨生.大地电磁测深资料去噪方法应用研究[J].石油 物探,2002,12.
- [4] 巴特 M. 地球物理学中的诸分析[M]. 郑冶真, 叶正仁, 等译. 北京: 地震出版社, 1978.
- [5] 程佩青.数字滤波与快速傅里叶变换[M].北京:清华大学出版社,1990.

- [6] 宗孔德, 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [7] 程佩青.数字信号处理教程(第2版)[M].北京:清华大学出版社,1995.
- [8] 丁玉美.数字信号处理(第二版)[M].西安:西安电子科技大 学出版社,2001.
- [9] 奧本海姆 A V, 谢弗 R W. 离散时间信号处理[M]. 北京:科学 出版社,1998.
- [10] ZENG Zhezhao. Study on optimal design of high-order FIR digital filter with multi-band Stop[J]. Journal of changsha university of electric power(natural science), 2004, (8).
- [11] Nuttall A H. Some windows with very good sidelobe behavior[J]. IEEE Trans, 1981, ASSP-1(4).
- [12] 董绍平,赵淑清.模块法设计 FIR 数字滤波器[J]. 电子学报, 1984,13(2):88.
- [13] 林品荣,郑采君,石福升,等. 电磁法综合探测系统研究[J]. 地 质学报,2006,10.

A FIR DIGITAL FILTER ANALYSIS OF MT TIME SERIES

LI Jian-hua^{1,2}, LIN Pin-rong², HE Wei³, ZHENG Cai-jun²

(1. Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Langfang 065000, China; 3. China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The time series in Magnetotellurics (MT) contains multiple spectra and often has unneeded natural electromagnetic signals and the interference of 50 Hz and its harmonic frequency. In this paper, combining FIR digital filter technology and features of MT time series, the authors put forward a method for removing the noises in MT. The principles and designs of FIR DF are discussed, the processes which include band-passing and trapping noises of theoretical data through the FIR DF are analyzed, and the effectiveness of actual data through FIR band-pass filter and FIR trap filter is also investigated.

Key words: MT; FIR digital filter; data-processing; denoising

作者简介:李建华(1981-),女,硕士研究生,地球探测与信息技术专业。