

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250527005

地震地电场观测中城市轨道交通信号的 滤波方法研究*

卜玉菲, 张秀霞, 王佳, 潘颖, 袁桂平, 章东

(江苏省地震局, 江苏南京 210014)

摘要: 地电场是地震预测研究的重要内容之一,其数据质量直接影响震前异常识别的准确性。随着全国轨道交通网络的扩张,地铁运行产生的杂散电流成为影响地电场观测的主要干扰源之一。针对地铁干扰抑制问题,系统对比滑动平均滤波、经验模态分解(EMD)滤波及小波滤波三种方法的去噪效果。通过构建贴近真实场景的模拟信号,采用信噪比(SNR)、均方根误差(RMSE)等指标评估滤波性能。仿真实验显示:滑动平均滤波在窗长390 s时效果最优,SNR提升15.50 dB, RMSE降低83.22%;EMD滤波去除前2个本征模态函数(IMF)更合理,可平衡去噪效果与有效信号保留,SNR提升10.99 dB, RMSE降低71.8%;小波滤波选用db4小波基时8层分解后滤波表现最佳,SNR提升16.86 dB, RMSE降低85.7%。对上海青浦台受地铁影响的秒采样地电场数据滤波处理,结果显示,三种方法均使信号标准差降低65%以上,其中小波滤波在保留突变信号细节上优势显著。研究表明,秒采样数据结合优化参数的滤波方法可有效抑制轨道交通干扰,为提升地电场观测数据质量提供技术支持。

关键词: 地电场;城市轨道交通;滑动均值滤波;EMD滤波;小波滤波

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1291-10

Research on Filtering Methods for Urban Rail Transit Signals in Seismic Geoelectric Field Observation

BU Yufei, ZHANG Xiuxia, WANG Jia, PAN Ying, YUAN Guiping, ZHANG Dong

(Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China)

Abstract: The geoelectric field is one of the important aspects of earthquake prediction research, and its data quality directly affects the accuracy of pre-seismic anomaly detection. With the expansion of the national rail transit networks, stray currents generated by metro operations have become one of the main sources of interference affecting geoelectric field observations. To address the issue of metro interference suppression, this study systematically compared the denoising effects of three filtering methods: moving average filtering, empirical mode decomposition (EMD) filtering, and wavelet filtering. By constructing simulated signals that closely resembled real-world scenarios, the filtering performance was evaluated using indicators such as signal-to-noise ratio (SNR) and root mean square error (RMSE). Simulation experiments showed that the moving average filtering achieved the best perfor-

* 收稿日期:2025-05-27;修回日期:2025-07-17

基金项目:江苏省地震局青年科学基金项目(202302)、北京市自然科学基金项目(8212045)资助

作者简介:卜玉菲(1988—),女,工程师,硕士。主要从事地震电磁监测预报工作。E-mail:byf0138007@163.com

通信作者:张秀霞(1971—),女,高级工程师。主要从事地震监测预报工作。E-mail:315742703@qq.com

mance with a window length of 390 s, improving SNR by 15.50 dB and reducing RMSE by 83.22%. For EMD filtering, removing the first two intrinsic mode functions (IMFs) was more reasonable to balance denoising performance and valid signal preservation, improving SNR by 10.99 dB and reducing RMSE by 71.8%. Wavelet filtering demonstrated the best filtering performance after an 8-level decomposition using the db4 wavelet basis, improving SNR by 16.86 dB and reducing RMSE by 85.7%. Filtering processing was applied to the second-sampled geoelectric field data from the Shanghai Qingpu station affected by metro interference. The results showed that all three methods reduced the signal standard deviation by over 65%. Among them, wavelet filtering showed significant advantages in preserving the details of abrupt signal changes. The study indicates that filtering methods with optimized parameters using second-sampled data can effectively suppress rail transit interference, providing technical support for improving the quality of geoelectric field observation data.

Keywords: geoelectric field; urban rail transit; moving average filter; EMD filter; wavelet filter

0 引言

地电场是地球表面天然存在的电场,包括大地电场和自然电场。其中大地电场为固体地球外部,特别是电离层中的各种电流体系与地球介质相互作用,在地球内部产生的感应电场,具有区域性变化特征;自然电场源于地壳浅层,具有局部特征,是地震预测研究的重要内容之一^[1]。大量研究表明地震前存在震前异常变化的地电场信号^[2-7]。从频域看地电场观测的电磁干扰有工频干扰和非工频干扰两种。非工频干扰的中城市轨道交通(地铁)干扰已对北京、上海、江苏等多地在运行的地电场观测造成影响。截至2023年底,全国开通城轨的城市达59座,总规模超11 000公里^[8],不断建设的城市轨道交通必将影响越来越多的地电场观测,急需通过技术手段来解决此问题,提高数据利用率。

近年来,越来越多的学者关注到此影响,并尝试通过数字滤波技术剔除干扰^[9-13]。当前大部分地电场观测采用“十五”时期的ZD9A2系列仪器,该仪器的采样间隔为1 min,根据地铁漏电干扰实验的结果,从频域上看地铁漏电干扰的地电场信号在0~0.1 Hz上都有能量分布^[14],而优势频段取决于地铁列车的运行速度、运动方向、站台间隔等因素,干扰优势频段集中在周期50~300 s^[15-16],因此,基于采样率为1 min的观测并不能满足研究需求。随着背景场和巨灾工程项目的实施,秒采样观测的地电场仪器投入实际应用中,为此研究提供了数据基础。为说明方法的可靠性,需进行仿真实验并进行误差分析。有学者基于高斯白噪声信号进行的仿真实验

来判定去噪效果^[13],这与实际观测到的地铁噪声信号有一定的区别,不能充分检验所用方法去除地铁干扰的效果。

为解决上述问题,本研究选择覆盖地铁干扰优势频段的多个标准信号叠加进未受影响的数据中进行数字滤波仿真实验,对比滑动平均滤波、经验模态分解(EMD)滤波及小波滤波三种较为简便实用的滤波方式的去噪效果,并选择采样率为1 s的地电场数据进行地铁干扰抑制的实际应用效果检验,进一步检测方法的可靠性。

1 方法原理

本文使用的去噪方法主要有滑动平均滤波、EMD滤波以及小波滤波。

1.1 滑动平均滤波

滑动平均滤波又称递推平均滤波法。对离散系统而言,滑动平均滤波就是把连续取得的 N 个采样值看成一个队列,队列的长度固定为 N ,每次采样得到一个新数据放到队尾,并丢掉原来队首的一次数据,把队列中的 N 个数据进行平均运算,就可以获得新的滤波结果。因此在计算过程中, N 过小则去噪不彻底, N 过大则信号过度平滑,滤波后信号将比原始信号延迟 $(N-1)/2$ 个采样点。

$$y_k(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_{k-i}(t) \quad (1)$$

式中, x_k 为原始信号第 k 个数据点; y_k 为重构信号的第 k 个滤波结果; N 为窗长。为了使窗长 N 能完整覆盖目标滤波周期 T ,本研究中窗长 N 取 $1.3T$ 。

1.2 EMD滤波

1.2.1 经验模态分解(EMD)

经验模态分解(EMD)是希尔伯特—黄(HHT)变换的核心^[17-19],该方法核心思想是:首先将信号进行经验模态分解(EMD),它能够有效地把各种频率成分以本征模态函数(IMF)的形式从原始信号 $x(t)$ 中分离出来,也就是将一个频率不规则的波化为多个单一频率的波 $\text{IMF}_i(t)$ +残波 $r_n(t)$ 的形式:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \text{IMF}_i + r_n(t) \quad (2)$$

其中IMF需要满足以下两个条件:①在整个信号范围内,极值点(极大值/极小值)的数量与过零点(信号穿过零线)的数量必须相等,或至多相差1,确保信号在局部呈现对称振荡特性,避免出现非平稳波动;②由局部极大值构成的上包络线和由局部极小值构成的下包络线的均值必须为零(或近似为零),保证信号围绕零基线波动,避免直流偏移或趋势项干扰。

分解过程主要包括:①提取极值点:定位信号的所有极大/极小值;②构造包络线:用三次样条插值连接极值点,形成上下包络;③计算均值曲线:上下包络的均值 $m(t)$;④筛选IMF:原始信号减均值 $h(t) = x(t) - m(t)$,重复迭代直至 $h(t)$ 满足IMF条件;⑤分离残余项:将剩余信号 $r(t) = x(t) - \text{IMF}_1(t)$ 作为新信号重复上述步骤。

1.2.2 EMD滤波实现

从分解出的本征态函数中选取需要的信号,舍去噪声信号,即根据目标频率选择IMF分量进行重构。因此,此滤波方式可实现高频噪声抑制、低频趋势项去除,以及带通滤波等。在地球物理领域,EMD滤波已有广泛应用,被证明该方法在数据处理和提升数据质量方面有显著优势^[20-22]。

本文通过判断每个IMF分量的平均频率值是否处于目标频率范围内,筛选出包含干扰信号的分量并予以剔除,以此实现对干扰成分的抑制。这一方法既避免了盲目去除IMF分量导致的有效信号损失,又能精准锁定并滤除干扰成分,从而在保证去噪效果的同时,最大程度保留有效信息。

1.3 小波滤波

小波分析运用在信号降噪处理中,主要是针对

信号经小波变换后在不同分辨率下呈现不同规律,在不同分辨率下设定不同阈值门限,调整小波系数,达到降低噪声的目的^[22-25]。

对任意的连续函数或信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的小波变换为:

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中, a 为伸缩因子,控制频率分辨率; b 为平移因子,控制时间定位; $\psi_{a,b}$ 为小波基,即母小波函数。

其重构公式为:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (4)$$

小波滤波的降噪过程可按以下方法进行处理:

①小波分解,选择一个小波基并确定一个小波分解的层次 N ,然后对信号进行 N 层小波分解;②对小波系数进行频带选择或衰减;③信号重建,降噪处理后的系数通过小波重建恢复原始信号。

在实际选择小波基的时候,考虑到受地铁影响的地电场信号信噪比较低,所以选择的小波函数应正则,因此本文小波滤波时选择Daubechies(db)系列小波函数中的‘db4’小波,它具有很好的正则性和紧支撑性,能很好地把信号的低频和低频分开。另外,考虑到地电场有效信号主要为低频信号,所以在小波重构的时候仅选择低频近似部分,舍弃高频细节。

2 仿真实验

2.1 构建模拟信号

本文采用已知信号(干净信号) $x(t)$ 和标准信号(噪声信号) $n(t)$ 叠加的方式,获得模拟信号 $y(t)$ 。

$$y(t) = x(t) + n(t) \quad (5)$$

我们选取温泉台2019年9月1日—3日秒采样地电场南北向长极距观测数据作为干净信号 $x(t)$ 。温泉台采用GEF2地电场仪进行观测,采样频率为1 Hz,周边无明显干扰源,所选时间段地电场数据平稳,日变形态正常,未受到明显轨道交通干扰的影响。

$n(t)$ 根据公式(6)构建所得。根据地铁优势频段,选择覆盖地铁干扰优势频段的多个标准信号构建噪声信号函数 $n(t)$,包含7个特征频率(周期为

100、125、150、175、200、250、300 s),各分量分别添加2~6 s的相位差来模拟多源干扰的非同步性:

构建的模拟信号如图1所示。

$$n(t) = 0.2 \cos \frac{2\pi t}{100} + 1.5 \cos \frac{2\pi}{125}(t+2) + 5.2 \cos \frac{2\pi}{150}(t+4) + 6.5 \cos \frac{2\pi}{175}(t+6) + 10.6 \cos \frac{2\pi}{200}(t+3) + 1.8 \cos \frac{2\pi}{250}(t+6) + 2.4 \cos \frac{2\pi}{300}(t+6) \quad (6)$$

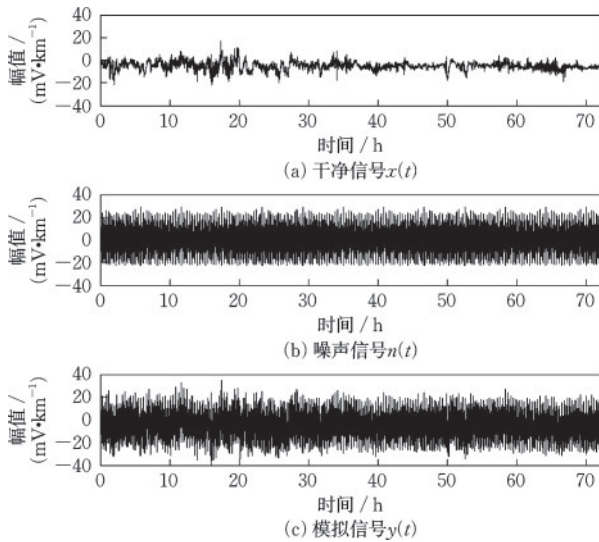


图1 构建模拟信号

Fig.1 Construction of simulated signals

2.2 检验参数

为检验对模拟信号的去噪效果,引入信噪比(SNR)、均方根误差(RMSE)来对去噪效果进行数值检验。

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (7)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (8)$$

式中, y_i 为模拟信号(或含噪信号)在*i*时刻的采样值; \hat{y}_i 为干净信号(或降噪后信号)在*i*时刻的采样值; $y_i - \hat{y}_i$ 为噪声信号(或残差信号)在*i*时刻的采样值; n 为数据长度。

此外,本文还将结合残差信号分析与信号功率谱密度特征,对不同去噪方法的效果展开综合评估。考虑到地电场信号的能量主要集中在0~

0.005 Hz的低频区间^[14],因此在滤波处理中,既需尽可能滤除噪声信号,又要最大限度保留原模拟信号中的低频成分。

2.3 信号去噪效果

首先对模拟信号 $y(t)$ 的SNR和RMSE进行计算,计算结果如表1所示,该结果将作为后续不同去噪方法滤波效果检验的基准值。接下来,分别采用滑动平均滤波、EMD滤波和小波滤波对模拟信号进行去噪处理,再次计算去噪后信号的SNR和RMSE,与表1中的数据进行对比分析。

表1中,SNR为负数,即噪声信号能量大于干净信号,均方根误差很大代表模拟信号失真程度高。

表1 模拟信号的基准参数

Table 1 Benchmark parameters of simulated signals

参数	数值
SNR/dB	-4.09
RMSE/(mV·km ⁻¹)	9.824 0

2.3.1 滑动平均滤波

因滑动平均滤波效果与计算窗长密切相关,故需挑选好合适窗长,考虑到地铁信号的优势周期范围,将目标滤波周期分别设置为100 s/200 s/300 s,对应的窗长*N*取为130 s/260 s/390 s,为更好的对比不同窗长*N*的滤波效果,本文增加了65 s/455 s/585 s的窗长计算滤波后参数,进行对比分析。

对模拟信号采用滑动平均滤波处理后,从表2的数据可见,滤波后信号的SNR和RMSE均得到

表2 滑动平均滤波在不同窗长*N*下的去噪指标

Table 2 Denoising indicators of moving average filtering with different window lengths *N*

参数	<i>N</i> /s					
	65	130	260	390	455	585
滤波后						
SNR/dB	3.85	8.83	10.82	11.41	10.91	10.67
信噪改善*/dB	7.95	12.92	14.91	15.50	15.01	14.77
滤波后						
RMSE/(mV·km ⁻¹)	9.824 0	2.218 8	1.764 4	1.648 7	1.745 2	1.794 5
RMSE降低*/%	59.94	77.41	82.04	83.22	82.23	81.73

注:信噪改善*和RMSE降低*的参考值均为表1中模拟信号参数

显著改善。值得注意的是,随着滤波窗长 N 的增大,SNR与RMSE的变化并非呈现单调上升或下降的趋势——当 N 取值为390 s时,两项指标均达到最优状态:此时SNR较原始模拟信号提升15.50 dB, RMSE则降低83.22%。

图2显示,当 N 取值为260 s及以上时,滤波后信号在时序图上的形态已与干净信号形态较为相似。进一步分析可知,当窗长 N 取值越大,滤波后残差信号中保留的地电场信号(即干净信号)形态越明显;而功率谱密度显示,模拟信号中有效的低

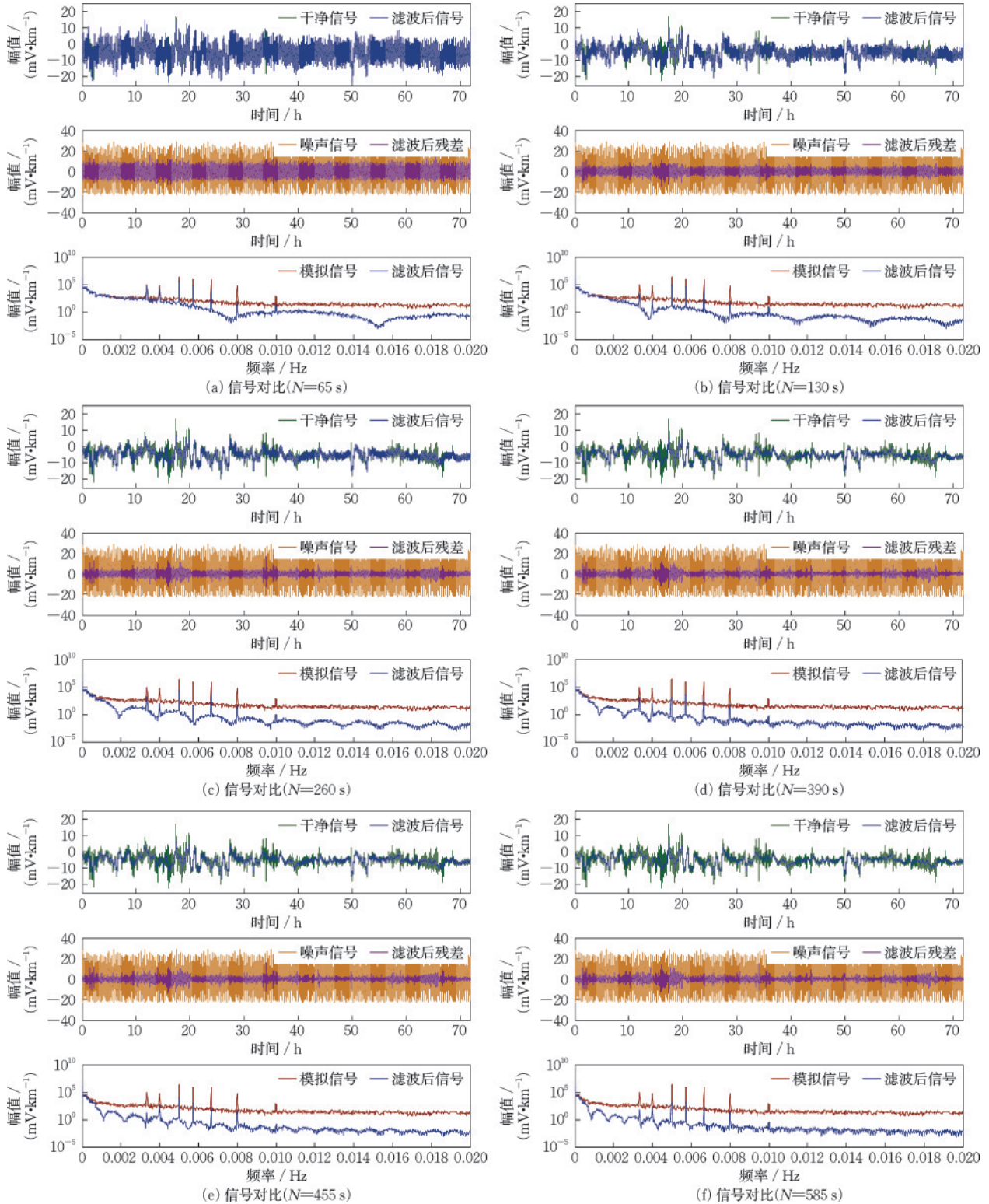


图2 滑动平均滤波结果

Fig.2 Moving average filtering results

频部分能量损失也随之增大。由于本研究中模拟信号中的噪声为标准余弦信号,在图2的功率谱密度图上表现为对应幅值突变为尖峰的频率成分,从滤波后信号的功率谱密度曲线观察到,不同窗长滤波虽未完全消除噪声信号,但整体上减弱了其能量。

根据以上分析可见,针对式(5)模拟信号,窗长 N 为 390 s 是一个较优的选择。

2.3.2 EMD 滤波

因采样率高、数据量大,在分解过程中,为提高计算效率,将迭代次数选为 6,首先计算每个 IMF 分量的平均周期,将平均周期在 300 s 以下的 IMF 分量认为是需要去除的分量。根据此标准,识别出式(5)模拟信号的噪声分量主要分布在 IMF1-2。为了说明去噪过度带来的问题,我们将分别去除 IMF1-2 分量和 IMF1-3 分量,作结果对比。

从表 3 可见,使用 EMD 滤波后 SNR 和 RMSE 均有了显著提高,相对于仅消除 IMF1-2 分量,消除 IMF1-3 分量后,SNR 和 RMSE 均呈现出更优的改善效果。

表 3 EMD 滤波中不同 IMF 分量去除方案的去噪指标
Table 3 Denoising indicators of EMD filtering with different IMF component removal schemes

参数	迭代次数 6	
噪声 IMF	IMF1-2	IMF1-3
滤波后 SNR/dB	6.90	9.39
信噪改善*/dB	10.99	13.49
滤波后 RMSE/(mV·km ⁻¹)	2.771 7	2.079 0
RMSE降低*/%	71.8	78.8

注:信噪改善*和 RMSE 降低*的参考值均是表 1 中模拟信号参数

从图 3 可以清晰观察到,干净信号与滤波后信号的时序曲线形态较为吻合,表明滤波处理较好地保留了原地电场信号的细节特征。通过图 3 功率谱密度对比图进一步分析发现,无论采用消除 IMF12 分量还是 IMF13 分量的处理方式,滤波后信号均已剔除噪声信号的频率成分,这意味着噪声得到了完全滤除。不过值得注意的是,从功率谱对比结果来看,随着消除的 IMF 分量增多,信号中低频能量的损失也随之加剧,这与我们想要更多保留模拟信号中的低频部分相悖,存在过度过滤的现象。

综合考虑 SNR、RMSE 的改善情况和有效低频信号的保留情况,认为针对式(5)模拟信号,EMD 滤波之后,消除 IMF1-2 分量属于更为妥当的选择。

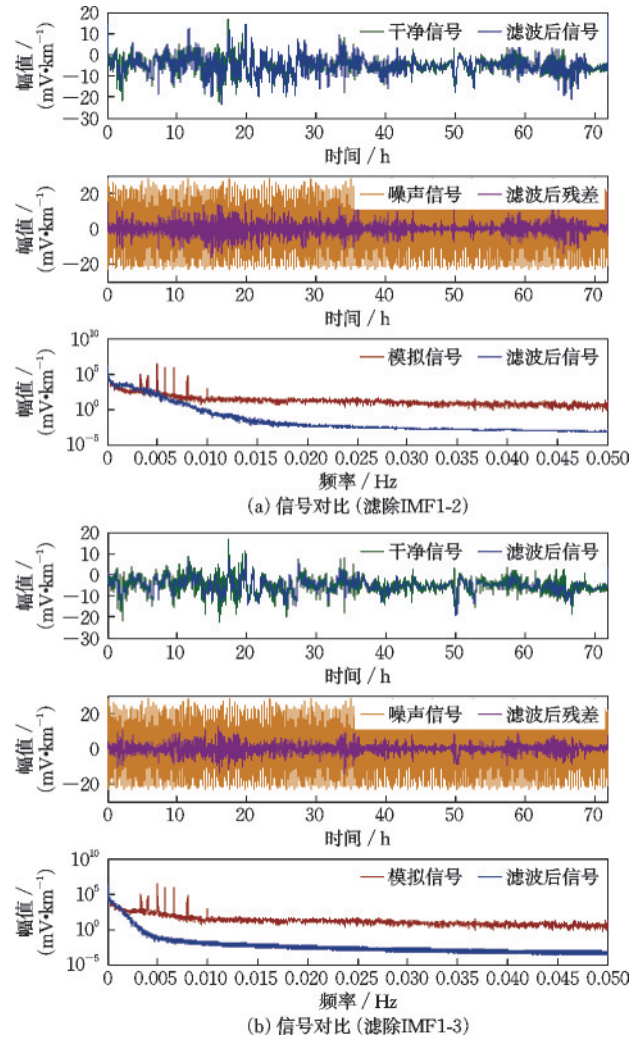


图 3 EMD 结果

Fig.3 EMD filtering results

2.3.3 小波滤波

小波分解层数越高,对信号的细化程度就越深,虽然能更精准地分离出高频噪声,但同时也可能导致低频有效信号的过度损耗,使得重构后的信号在保留原始地电场信号特征方面效果有所减弱,故选择合适的层数是小波滤波需选择和考虑的。为确定合适的分解层数,本文分别对比了 7~10 层的小波滤波情况。

从表 4 可见,使用小波滤波后信噪比和均方差参数表现均有了明显提高,特别是分解层数 8 层,信噪比提高了 16.86 dB, RMSE 降低了 85.7%,去噪效果明显。但提高分解层数并未使 SNR 与 RMSE 持续优化,从分解 9 层开始,这两项指标的表现反而呈现下降趋势。从图 4 滤波后信号和干净信号的对比来看,分解层数越高,滤波后信号越“细”一平滑,信

号的能量损失越大。从功率谱对比来看,7层分解噪声功率谱密度的幅值仍然很大,从8层分解开始,噪声能量被有效抑制,但随着分解层数的增大,低频信号能量被降低,存在过滤现象。因此,针对式(5)模拟信号,采用db4小波基进行滤波,分解层数最优选择为8层。

表4 不同分解层数的去噪指标

Table 4 Denoising indicators with different decomposition levels

参数	分解层数/s			
	N=7	N=8	N=9	N=10
滤波后 SNR/dB	5.73	12.77	11.89	10.46
信噪改善*/dB	9.82	16.86	15.98	14.55
滤波后 RMSE/(mV·km ⁻¹)	3.171 1	1.409 5	1.560 5	1.839 9
RMSE降低*/%	67.7	85.7	84.1	81.3

注:信噪改善*和RMSE降低*的参考值均是表1中模拟信号参数

3 实际应用

本文选取上海青浦台地电场观测台站作为实际应用对象,该台站的地电场数据长期受上海地铁运行干扰,每日地铁运营时段,观测数据会出现明显畸变,这不仅严重影响了数据质量,也大幅降低了观测资料的使用价值,因此对其进行去噪处理具有重要的实际意义。

为开展具体研究,本文选取了该台站2019年9月1日—3日期间,由GEF2地电场仪记录秒采样数据。针对这些受干扰的数据,分别采用滑动平均滤波、EMD滤波和小波滤波三种方法进行去噪处理(处理结果如图5所示),其中各项滤波参数的选择均参照上一章节确定的最优参数设置。

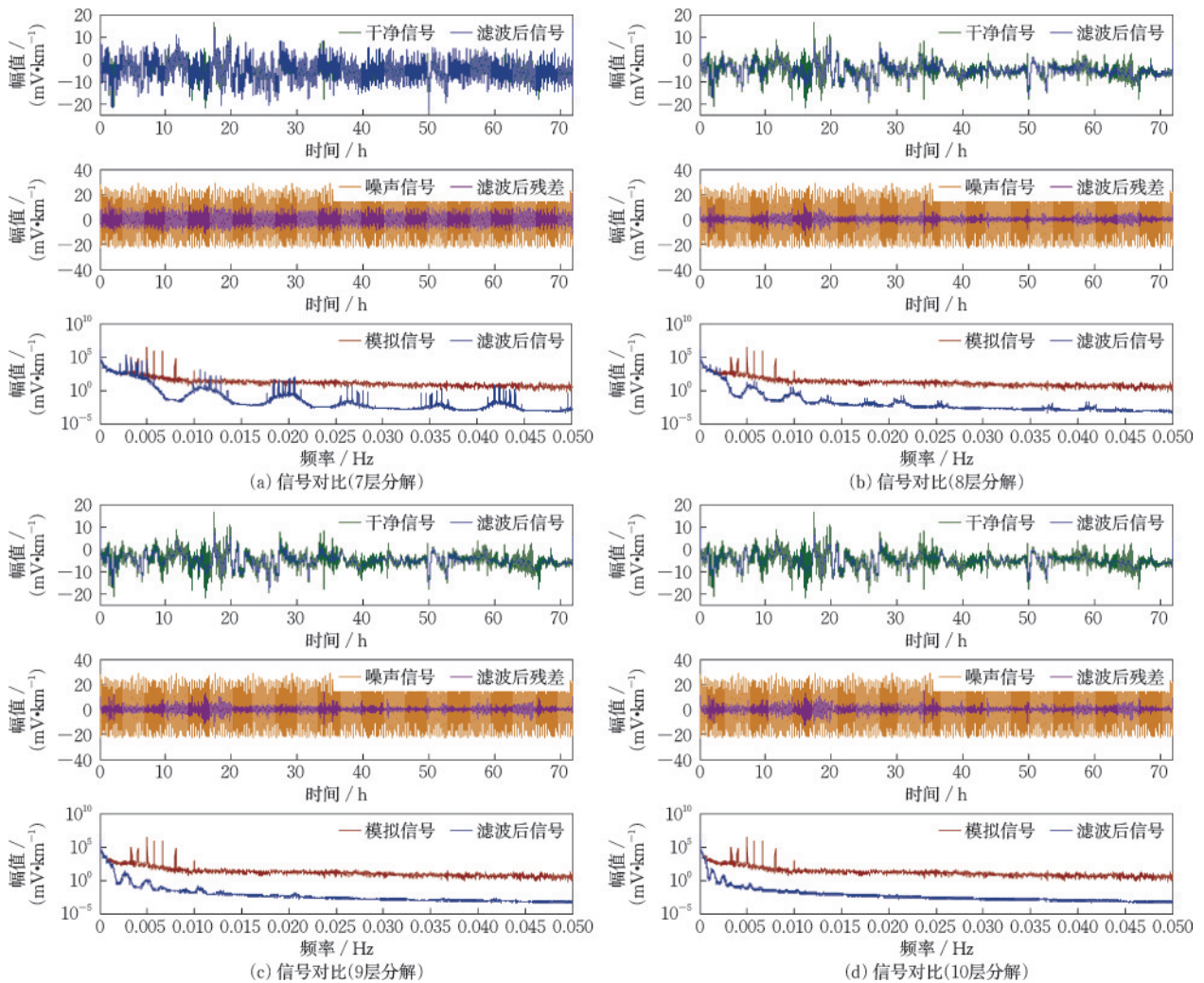


图4 小波滤波结果

Fig.4 Wavelet filtering results

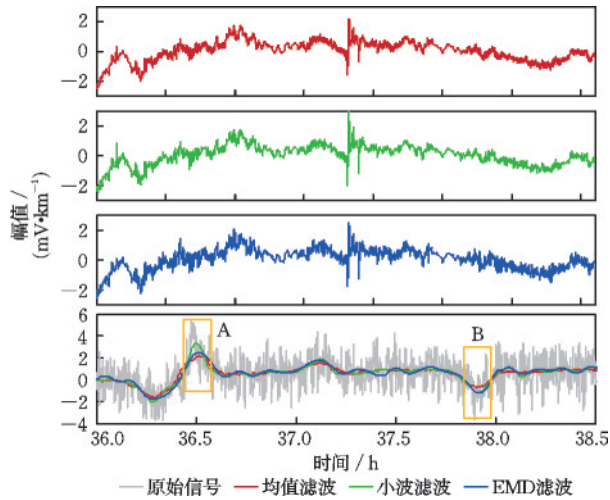


图5 青浦观测结果不同去噪方法的滤波效果

Fig.5 Filtering results of different denoising methods for Qingpu observation data

为全面、客观地判断不同滤波方法处理后数据质量的提升情况,研究采用定量指标与定性分析相结合的评估方式。在定性分析方面,通过绘制原始信号与滤波后信号的时域波形图,直观对比分析滤波后信号对原始信号趋势及细节特征的保留情况,以此判断滤波处理是否在去除噪声的同时,有效保留了地电场信号的有效信息。而在定量分析环节,由于实际观测到的受干扰数据缺乏对应的无噪声干净信号作为参考标准,无法直接计算用于评估去噪效果的均方根误差(RMSE)和信噪比(SNR)。基于此,本研究选用标准差(SD)作为定量分析指标来对比不同滤波方法的去噪效果(具体结果如表5所示)。标准差(SD)是方差的算术平方根,其数值大小能够反映数据偏离均值的离散程度,通过对比滤波前后数据标准差的变化,可间接评估滤波方法对噪声的去除效果。

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

式中, \hat{y}_i 为信号在*i*时刻的值; \bar{y} 为信号的均值。计算上海青浦台地电场原始信号SD为1.444 2 mV/km。

表5 上海青浦观测结果不同去噪方法后的标准差对比
Table 5 Comparison of standard deviation using different denoising methods for Qingpu observation data

参数	滑动平均滤波	EMD滤波	小波滤波
SD/(mV·km ⁻¹)	0.437 3	0.477 9	0.452 9
SD降低/%	69.7	66.9	68.6

表5为上海青浦台实测数据经不同滤波方法处理后的结果,结果表明:在参数优化的前提下,滑动平均滤波、EMD阈值滤波与小波阈值滤波均能有效抑制地铁干扰,显著改善数据质量。从标准差(SD)的数值来看,三种方法的优化效果相差甚微,未表现出明显的优劣之分,且对原始信号SD的降低幅度均超过65%,说明它们在整体降噪能力上处于同一水平。但是,从图5(A、B区段)局部细节对比可以发现,三种方法在处理突变信号时的表现存在差异:其中小波滤波的细节重建能力最为突出,能够较好地保留突变信号的特征;EMD滤波次之,对突变信号的还原效果稍弱;滑动平均滤波在这方面则稍显逊色,对突变信号的处理略显平滑,损失了部分细节信息。

4 结论和讨论

秒采样地电场观测数据能够完整覆盖地铁干扰的优势频段(周期50~300 s),为精准分离干扰信号与地电场有效信号提供了关键数据支撑。本文针对性设计仿真实验与实测验证相结合的研究方案:仿真实验采用实际未受干扰的地电场信号叠加覆盖地铁优势频段的标准噪声信号,更贴近真实干扰场景;同时选取受地铁影响的实测地电场数据,对滑动平均滤波、经验模态分解(EMD)滤波及小波滤波三种方法的去噪效果开展系统对比。通过信噪比(SNR)、均方根误差(RMSE)等指标量化仿真去噪效果,结合功率谱密度与残差信号分析滤波对噪声信号的抑制能力以及对有效低频成分的保留能力,并在实测数据中进一步验证不同方法对突变信号细节的还原性能,结果表明:

(1)三种滤波方法对地铁干扰均有抑制效果。仿真实验表明,滑动平均滤波在窗长*N*=390 s时效果最优(SNR提升15.50 dB, RMSE降低83.22%);EMD滤波去除IMF12分量时更合理(SNR提升10.99 dB, RMSE降低71.8%),可减少低频有效信号损失;小波滤波采用db4小波基、8层分解时表现最佳(SNR提升16.86 dB, RMSE降低85.7%)。

(2)实际应用也验证了方法有效性。上海青浦台数据处理显示,三种方法均使信号标准差降低65%以上,其中小波滤波在保留突变信号细节上优势显著,EMD滤波次之,滑动平均滤波因平滑作用损失部分细节。

(3)三种方法适用场景差异显著。滑动平均滤波原理简单、计算高效,适合实时处理,但窗长选择敏感,易过度平滑;EMD滤波自适应分解能力强,却存在过度过滤低频信号的风险,需严格控制去除的IMF分量;小波滤波在低信噪比下表现突出,尤其适合需保留细节的场景,但分解层数需谨慎优化。

需要说明的是,相较于传统高斯白噪声仿真,本研究采用地铁优势频段的标准余弦信号叠加,更真实模拟多源非同步干扰,提升了方法验证的可靠性。但是,模拟的噪声信号相对实际地铁干扰信号仍有不足,存在频率较为单一等问题;另外,实际受干扰的数据缺乏绝对干净信号,难以精准量化去噪效果。未来可结合多种滤波方法融合优化,扩大观测台站数据验证范围,并探索自适应参数调整算法,进一步提升干扰抑制的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 钱家栋,杨冬梅,熊仲华,等.地震电磁学理论基础与观测技术[M].北京:地震出版社,2010:222-239.
Qian J D, Yang D M, Xiong Z H, et al. Theoretical basis and observation technology of seismic electromagnetics [M]. Beijing: Seismological Press, 2010: 222-239. (in Chinese)
- [2] 赵玉林,钱复业.大地电场的临震周期变化[J].地震,1981(3):13-16.
Zhao Y L, Qian F Y. Periodic changes of the geoelectric field before earthquakes[J]. Earthquake, 1981(3): 13-16. (in Chinese)
- [3] 钱复业,赵玉林.地电场短临预报方法研究[J].地震,2005,25(2):33-40.
Qian F Y, Zhao Y L. Study on geoelectric field method for short-term and impending earthquake prediction[J]. Earthquake, 2005, 25(2): 33-40. (in Chinese)
- [4] 马钦忠.与2008年汶川 M_s 8.0地震有关的成都台地电场异常信号[J].地震学报,2018,40(3):351-363.
Ma Q Z. Abnormal signals of geoelectric field related to Wenchuan M_s 8.0 earthquake recorded at the Chengdu station[J]. Acta Seismologica Sinica, 2018, 40(3): 351-363. (in Chinese)
- [5] 马钦忠,赵卫国,张文平.文县地电场震前异常变化及其在2001年昆仑山口西 M_s 8.1地震预测研究中的应用[J].地震学报,2009,31(6):660-670.
Ma Q Z, Zhao W G, Zhang W P. Abnormal variations of geoelectric field recorded at Wenxian station preceding earthquakes and their application to the prediction of the 2001 M_s 8.1 Kunlun earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2009, 31(6): 660-670. (in Chinese)
- [6] 马钦忠,方国庆,李伟,等.芦山 M_s 7.0地震前的电磁异常信号[J].地震学报,2013,35(5):717-730.
Ma Q Z, Fang G Q, Li W, et al. Electromagnetic anomalies before the 2013 Lushan M_s 7.0 earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35(5): 717-730. (in Chinese)
- [7] Ye Q, Fan Y, Du X B, et al. Diurnal characteristics of geoelectric fields and their changes associated with the Alxa Zuoqi M_s 5.8 earthquake on 15 April 2015 (Inner Mongolia) [J]. Earthquake Science, 2018, 31(1): 35-43.
- [8] 中国城市轨道交通协会.中国城市轨道交通协会2023年工作报告[R].北京:中国城市轨道交通协会,2024.
China Association of Metros. Annual work report of China Association of Metros 2023 [R]. Beijing: China Association of Metros, 2024. (in Chinese)
- [9] 安张辉,杜学彬,元丽华,等.HHT方法在受城市轨道交通干扰地电场观测数据中的应用[J].地震学报,2011,33(2):243-251.
An Z H, Du X B, Yuan L H, et al. Application of Hilbert-Huang transform to geo-electric data disturbed by urban track traffic[J]. Acta Seismologica Sinica, 2011, 33(2): 243-251. (in Chinese)
- [10] 王同利,胡乐银,崔博闻,等.北京城市轨道交通对地电场观测的干扰影响[J].地震地质,2013,35(4):887-893.
Wang T L, Hu L Y, Cui B W, et al. A preliminary analysis on the interference generated by urban railway transit in Beijing to the geoelectric field observations [J]. Seismology and Geology, 2013, 35(4): 887-893. (in Chinese)
- [11] 李伟,马钦忠,宋志平,等.小波变换在地电场数据分析中的应用[J].地震学报,2013,35(1):26-35.
Li W, Ma Q Z, Song Z P, et al. Application of wavelet transform to the analysis of geoelectric field data[J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35(1): 26-35. (in Chinese)
- [12] 陈星星,张建涛,王明贵,等.地电场地铁干扰滤波算法适用性研究[J].地震地磁观测与研究,2024,45(3):100-106.
Chen X X, Zhang J T, Wang M G, et al. Research on the applicability of filtering algorithms for geoelectric fields imposed by subway interference [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2024, 45(3): 100-106. (in Chinese)

- [13] 冯红武, 颜文华, 王建昌, 等. 地电场观测中城市轨道交通干扰剔除[J]. 地震地磁观测与研究, 2019, 40(3): 70-78.
Feng H W, Yan W H, Wang J C, et al. Interference elimination generated by urban track traffic during the geoelectric field observation[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2019, 40(3): 70-78. (in Chinese)
- [14] 邱颖. 地电场观测中已知源干扰抑制研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2008.
Qiu Y. Research on restraining the known source interference in geoelectric field observation[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, 2008. (in Chinese)
- [15] 席继楼, 关华平, 刘超, 等. 2015年尼泊尔8.1级地震前后拉萨地电场观测数据变化分析[J]. 地震, 2016, 36(2): 1-13.
Xi J L, Guan H P, Liu C, et al. Geo-electric field changes observed at Lhasa geomagnetic station before and after the 2015 Nepal M8.1 Earthquake [J]. Earthquake, 2016, 36(2): 1-13. (in Chinese)
- [16] 王兰炜, 张宇, 张兴国, 等. 地电阻率观测中地铁杂散电流特征[J]. 地震学报, 2023, 45(2): 285-301.
Wang L W, Zhang Y, Zhang X G, et al. Characteristics of subway stray current in geoelectrical resistivity observation [J]. Acta Seismologica Sinica, 2023, 45(2): 285-301. (in Chinese)
- [17] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [18] 罗奇峰, 石春香. Hilbert-Huang变换理论及其计算中的问题[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(6): 637-640.
Luo Q F, Shi C X. Hilbert-Huang Transform and several problems in its calculation method [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2003, 31(6): 637-640. (in Chinese)
- [19] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [20] 熊璐伟, 李庶林, 杨明辉, 等. 改进的VMD-WT微震信号联合去噪方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(1): 188-197.
Xiong L W, Li S L, Yang M H, et al. Improved VMD-WT microseismic signal joint denoising method [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2025, 45(1): 188-197. (in Chinese)
- [21] 刘玉萍, 张衡, 张宝金, 等. 基于EMD的地震数据速度谱优化方法[J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(3): 465-472.
Liu Y P, Zhang H, Zhang B J, et al. Optimization method for seismic data velocity spectrum based on empirical mode decomposition [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(3): 465-472. (in Chinese)
- [22] 罗飞雪, 戴吾蛟. 小波分解与EMD在变形监测应用中的比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(3): 137-141.
Luo F X, Dai W J. Comparison of EMD with wavelet decomposition for dynamic deformation monitoring [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(3): 137-141. (in Chinese)
- [23] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
Yang F S. Engineering analysis and application of wavelet transform [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)
- [24] 刘光耀, 刘习军, 张素侠. 基于提升小波变换和统计理论的简支梁桥损伤识别分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(3): 594-602, 694.
Liu G Y, Liu X J, Zhang S X. Damage identification analysis of simply supported beam bridge based on lifting wavelet transform and statistical theory [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 594-602, 694. (in Chinese)
- [25] 夏春旭, 柳春光. 基于小波变换和极点对称模态分解对近断层多脉冲地震动的联合分析研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(5): 697-704.
Xia C X, Liu C G. Conjoint analysis of near-fault multiple pulse ground motion based on wavelet transformation and extreme-point symmetric mode decomposition [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(5): 697-704. (in Chinese)

(本文编辑: 池营营)