

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306840

基于改进 CEEMDAN 的应答器上行链路信号降噪研究*

刘德伟¹ 朱爱红¹ 赵岩浩² 李 博³

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院 兰州 730070; 2. 中国铁路兰州局集团有限公司银川电
务段 银川 750021; 3. 北京铁路信号有限公司 北京 102613)

摘 要:针对在高速铁路复杂电磁环境中应答器上行链路(balise uplink, BU)信号传输受扰的问题,提出了一种基于自适应白噪声完备经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)与小波包自适应阈值的联合降噪方法。首先,采用 CEEMDAN 算法将模拟 BU 信号分解为 12 个模态分量,根据相关系数判断分量为相关分量或无关分量;然后,相关分量经小波包降噪处理后重构为降噪后的 BU 信号;最后,选用信噪比(signal-noise ratio, SNR)和均方根误差(root mean square error, RMSE)作为评价指标,将方法与目前广泛采用的 6 种降噪方法进行对比,信噪比提高了 0.486 1~6.144 dB,均方根误差降低了 0.054 9~11.091。为检验该方法的实际应用效果,采用联合降噪方法对实测 BU 信号进行降噪处理。仿真验证和实验验证的结果表明,采用联合降噪方法降噪后的 BU 信号不仅噪声分量得到了有效去除,而且信号特征保存完好,证明该方法能够应用于解决实际 BU 信号受扰问题。

关键词: 应答器上行链路信号;自适应白噪声完备经验模态分解;小波包自适应阈值;降噪

中图分类号: U284 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.80

De-noising of balise uplink signal based on improved CEEMDAN

Liu Dewei¹ Zhu Aihong¹ Zhao Yanhao² Li Bo³

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Yinchuan Telecommunication Depot, China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Yinchuan 750021, China;
3. Beijing Railway Signal Co., Ltd., Beijing 102613, China)

Abstract: For the problem that the balise uplink (BU) signal transmission was interfered in the complex electromagnetic environment of high-speed railway, a denoising method based on the complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) combined with wavelet packet adaptive threshold was proposed. Firstly, the CEEMDAN algorithm was used to decompose the simulated BU signal into 12 modal components, and the components were determined to be correlated or irrelevant based on the correlation coefficients; Then, the relevant components were reconstructed into the denoised BU signal after wavelet packet denoising processing; Finally, signal noise ratio (SNR) and root mean square error (RMSE) were selected as evaluation metrics to compare this method with six widely used denoising methods. The SNR increased by 0.486 1~6.144 dB and the RMSE decreased by 0.054 9~11.091. To verify the practical application effect of this method, this joint denoising method was adopted to denoise the measured BU signal. The results of simulation and experimental verification showed that the BU signal denoised by the joint denoising method not only effectively removed the noise component, but also preserved the signal features well, proving that this method can be applied to solve the problem of actual BU signal interference.

Keywords: balise uplink signal; complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN); wavelet packet adaptive threshold; denoising

0 引言

应答器传输系统 (balise information transmission system, BITS) 是一种基于射频识别原理 (radio frequency identification, RFID) 的高速点式信息传输系统。其中应答器与应答器传输模块 (balise transmission module, BTM) 之间采用无线通信的方式实现车-地信息传输, 在列车定位、信息交互等领域发挥着重要的作用。应答器可以为列车提供大量固定或可变化的线路信息和限速信息, 是列车运行控制系统中的重要组成部分^[1]。然而, 应答器传输系统所处的电磁环境极其复杂, BTM 经常受到牵引系统和外界环境产生的噪声干扰, 应答器信息丢失、全零应答器、幽灵应答器等故障常有发生^[2]。车载设备无法正常识别报文信息会直接影响行车安全, 因此, 对 BU 信号处理方面的研究具有重大的实际意义和应用价值。

目前国内外在应答器信号处理方面已经取得了一些研究成果。Liu 等^[3]提出了一种基于自适应最优核的应答器上行链路信号解调方法, 相较于相干解调具有良好的解调效果。王瑞峰等^[4]将混沌理论应用到应答器信号检测中, 利用 Duffing 振子检测微弱的应答器上行链路信号。杨红强等^[5]研究表明应答器上行链路信号经过小波分析去噪后, 一定程度上改善了噪声对原始信号的影响, 但对信号中高频部分的去噪效果不佳。张友鹏等^[6]利用集合经验模态分解 (ensemble empirical mode decomposition, EEMD) 算法对应答器上行链路信号进行处理, 对其中两个主要分量进行重构得到去噪后的信号, 但难以保证信息完整性。Geng 等^[7]所提出改进变分模态分解算法 (variational mode decomposition, VMD) 可以将目标信号自适应分解成若干信号分量, 提高了处理信号的效率, 但降噪效果依赖于参数的设定, 处理不同噪声时需要重新设定参数。吕城锦等^[8]建立噪声估计模型, 将噪声模型和 Kalman 滤波算法相结合用于应答器上行链路信号降噪, 但降噪效果受限于所搭建的噪声模型。

针对上述问题, 本文提出了一种基于 CEEMDAN 结合小波包自适应阈值的 BU 信号处理方法, 利用 CEEMDAN 对信号分解的自适应特性, 克服 EMD 等经验模态分解算法所存在的模态混叠、虚假模态等问题。同时利用小波包分析对信号高频部分具有高分辨率的特点, 对相关分量进一步处理, 最后将处理后的相关分量进行重构, 得到降噪后的信号。经本文方法处理后的 BU 信号, 噪声得到有效抑制, 经解调验证后信号中的有效信息得到完整保留, 并且该方法在仿真验证和实验验证中均有良好的降噪效果。

1 应答器传输系统

1.1 应答器传输系统工作原理

应答器传输系统由车载设备和地面设备两部分组成。车载设备包含 BTM 天线和 BTM, 地面设备包含轨旁电子单元 (lineside electronic unit, LEU) 及有源/无源应答器^[9], 应答器传输系统结构如图 1 所示。

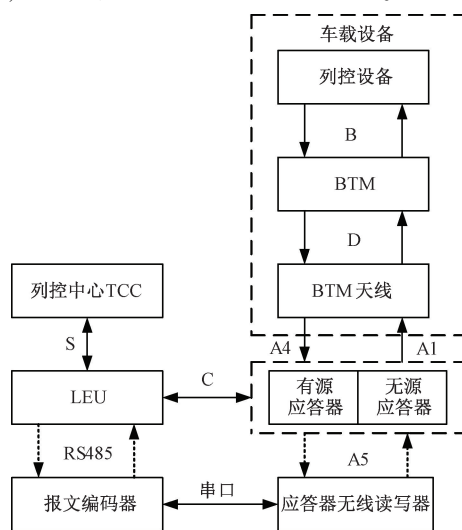


图 1 应答器传输系统结构框图

Fig. 1 Structure diagram of balise transmission system

应答器传输系统工作原理为当列车驶过应答器上方时, BTM 天线向应答器发送 27.095 MHz 的射频能量信号, 通过电磁感应的方式激活应答器, 随后应答器将报文信息调制生成中心频率为 4.234 MHz 的 2FSK 信号发送到 BTM 天线, BTM 接收到信号后, 经过内部的解调和解码模块将 2FSK 信号转换为原始的应答器报文, 以串口通信的方式传输给车载安全计算机, 经车载安全计算机计算后生成行车速度-距离曲线^[10], 应答器传输系统原理图如图 2 所示。车载安全计算机能否得到有效、完整的报文信息很大程度上取决于 BTM 天线所接收的 BU 信号质量。

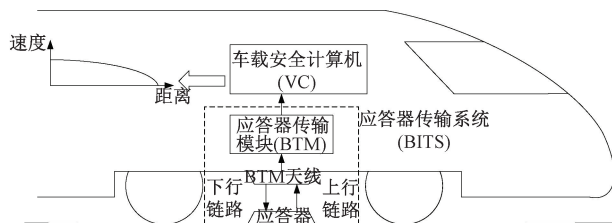


图 2 应答器传输系统原理

Fig. 2 Schematic diagram of balise transmission system

1.2 应答器上行链路信号

应答器上行链路信号是用于传输应答器报文信息的 2FSK 信号。依据应答器技术规范,其中心频率为 4.234 MHz±175 kHz,频偏为 (282.24±7%) kHz,传输速率为 (564.48±2.5) kbit/s^[11]。BU 信号的数学表达式如式(1)所示:

$$U_{2FSK}(t) = A_m \cos \{ 2\pi [f_c + s(t) \times \Delta f] t \} \quad (1)$$

式中: A_m 为 2FSK 信号的载波幅值; f_c 为中心频率; Δf 为信号频偏; $s(t)$ 为调制符号序列,取值±1,取值为-1 时对应着码元“0”,载波频率为 3.948 MHz,取值为+1 时对应着码元“1”,载频频率为 4.512 MHz。

2 基本理论和方法

2.1 CEEMDAN 原理

CEEMDAN 是在经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 的基础上发展而来的,适用于非线性性和非平稳信号的处理^[12]。但 EMD 在分解过程中会导致模态混叠,对后续分解结果造成干扰。针对这一问题,通过对原始信号添加高斯白噪声,提出了一些改进的经验模态分解算法,如集成经验模态分解 (ensemble empirical mode decomposition, EEMD)、互补总体经验模态分解 (complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD) 和自适应白噪声完备经验模态分解 (CEEMDAN)。EEMD 和 CEEMD 通过直接在原始信号中添加高斯白噪声的方法解决模态混叠的问题,但添加的噪声会向下传递影响后续的分解,造成噪声残留,同时还存在迭代次数较多和虚假模态的问题。与这两种方法不同的是,CEEMDAN 是在计算每阶 IMF 分量时都会重新添加正负高斯白噪声再对结果求均值,有效解决了 EEMD 和 CEEMD 所存在的问题,更适合对非线性、非平稳信号进行时频分析。BU 信号符合 CEEMDAN 算法所要求的条件,因此选择 CEEMDAN 算法对信号进行分解。算法计算过程如下:

1) 假设原始信号为 $x(t)$; i 为添加高斯白噪声的次数, δ 为噪声系数, $m=1$ 时添加负高斯白噪声, $m=2$ 时添加正高斯白噪声, k 表示模态分量的阶数,添加高斯白噪声 $w^i(t)$ ($i=1,2,3,\dots,I$) 后的第 i 个 k 阶待处理信号为:

$$x_k^i(t) = x(t) + (-1)^m \delta w^i(t) \quad (2)$$

2) $E(x_k^i(t))$ 表示对第 i 个 k 阶待处理信号进行 EMD 分解,对一阶待处理信号分解后求和取平均得到第一阶模态分量 $IMF_1(t)$ 为:

$$IMF_1(t) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E(x_k^i(t)) \quad (3)$$

3) 计算第一阶残差 $r_1(t)$,其计算公式为:

$$r_1(t) = x(t) - IMF_1(t) \quad (4)$$

4) 向 $r_1(t)$ 中继续添加 i 次高斯白噪声 $w^i(t)$,得到二阶待处理信号 $x_2^i(t)$ 为:

$$x_2^i(t) = r_1(t) + (-1)^m \delta w^i(t) \quad (5)$$

5) 对二阶待处理信号分解后求和取平均,得到二阶模态分量 $IMF_2(t)$ 为:

$$IMF_2(t) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E(x_2^i(t)) \quad (6)$$

6) 计算第 k ($k=1,2,3,\dots,n$) 阶残差 $r_k(t)$ 为:

$$r_k(t) = r_{k-1}(t) - IMF_k(t) \quad (7)$$

7) 向 $r_k(t)$ 中继续添加第 i 次高斯白噪声 $w^i(t)$,得到 k 阶待处理信号 $x_k^i(t)$ 为:

$$x_k^i(t) = r_k(t) + (-1)^m \delta w^i(t) \quad (8)$$

8) 对经 EMD 分解后的 k 阶待处理信号求和并取平均,得到 $k+1$ 阶模态分量 $IMF_{k+1}(t)$ 为:

$$IMF_{k+1}(t) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E(x_k^i(t)) \quad (9)$$

9) k 依次递加,重复步骤 6)~8),当残差信号的极值小于 2 时分解结束,最终原始信号可以表示为 K 个模态分量与 1 个残差信号之和,其表达式为:

$$X(t) = \sum_{k=1}^K IMF_k(t) + r_k(t) \quad (10)$$

2.2 小波包分析

小波分析是一种信号时频局部化分析方法,在工程实际应用领域中,常用于对已经分解或未分解的非线性信号进行降噪处理^[13]。小波分析是将信号分解为高频和低频两个部分,如果只是对信号的低频部分做进一步分解,随着信号频率的增加会导致信号分辨率的下降,影响信号分解的效果。小波包分析方法是对小波分析方法的改进,它能弥补对信号高频部分分解效果差的缺点,为信号提供一种更加精细的分析方法。在处理信号时,小波包变换将信号的高、低频部分同时进行分解,自适应地获取信号对应的频率。相较于小波变换,该方法可以更好地区分原始信号中的突变成分和噪声^[14]。小波包分解树如图 3 所示,其中“A”表示信号低频部分,“D”表示信号高频部分。

小波包降噪效果取决于小波包基函数、阈值处理方法及分解层数的选择,如果参数设置得太高,提取的信号误差较大,参数设置得太低,滤波效果差^[15]。阈值确定方法有无偏风险估计准则、固定阈值准则、极小极大准则等,阈值通用表达式如式(11)所示。

$$\mu = \sigma \sqrt{2 \ln N} \quad (11)$$

式中: σ 为噪声的标准差; N 为信号在时域中的长度。

目前常用的有硬阈值和软阈值两类阈值函数,软阈值判定准则如式(12)所示,硬阈值判定准则如式(13)所

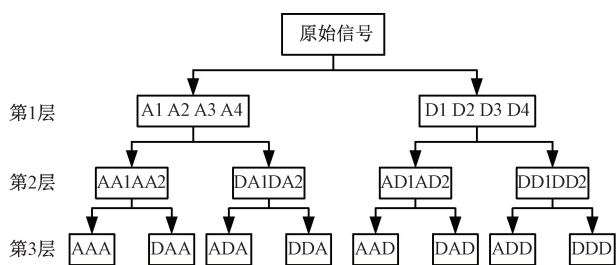


图 3 小波包分解树

Fig. 3 Wavelet packet decomposition tree

示,由于硬阈值的势函数不连续,容易产生震荡,采用软阈值方法降噪后信号的平滑性较好^[16]。本文小波包自适应阈值方法采用软阈值处理方法,并且对经 CEEMDAN 算法分解后的分量进一步处理时可以根据各分量信号的特点自动设置阈值^[17],相较于传统的小波包降噪算法一定程度上减少了阈值对结果的影响。

$$\begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k}) (|\omega_{j,k}| - \mu), & |\omega_{j,k}| \geq \mu \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \mu \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \omega_{j,k}, & |\omega_{j,k}| \geq \mu \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \mu \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\omega_{j,k}$ 表示含噪信号小波系数, μ 为阈值。

2.3 CEEMDAN-小波包自适应阈值降噪

虽然 CEEMDAN 算法减少了模态混叠现象的出现且重构误差小,但重构时会造成高频部分中 useful 信号的丢失^[18]。小波包分析相较于小波分析在信号频域分辨率上有了较大的提升,但对于所含频率较多的含噪信号,不仅阈值较难设置,而且不管采用软阈值还是硬阈值的方法,最终的结果往往都很难达到理想的效果。如果单独采用 CEEMDAN 算法或小波包分析算法对 BU 信号进行处理,必然会导致关键信息的丢失,难以满足 BU 信号对于信号完整性方面的要求。所以需要先对信号进行分解,对分解后的分量进行干扰项的判断,尽可能减小干扰项对小波包降噪的影响。

综合上述两种算法的特点,本文提出了一种基于 CEEMDAN-小波包自适应阈值的联合降噪方法,对仿真生成和现场采集的 BU 信号进行降噪处理。首先,将 BU 信号通过 CEEMDAN 算法分解为从高频到低频的多个固有模态分量。然后,通过计算各模态分量的相关系数进行分类,设定两个相关系数的分界点,相关系数小于 0.01 的分量中基本不含有有效信息,结合相应频谱图综合分析界定为无关分量;相关系数大于 0.01 小于 0.8 的分量中含有较多噪声,界定为含噪较多的相关分量;相关系数大于 0.8 的分量含有噪声较少,界定为含噪较少的相关分量。为提高联合算法的运行效率,仅对相关分量采用小波包自适应阈值方法进行滤波提取有用信息,再

将处理后的相关分量进行重构得到降噪后的 BU 信号。联合降噪算法流程图如图 4 所示。

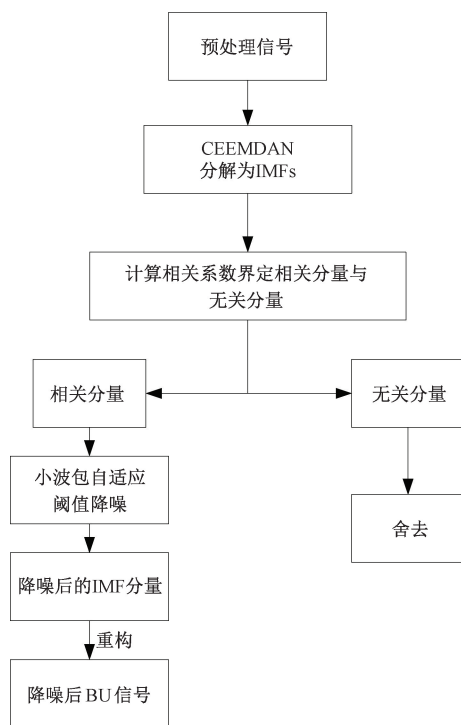


图 4 联合降噪算法流程图

Fig. 4 Joint denoising algorithm flow chart

3 仿真实验

为验证本文所采用的 CEEMDAN-小波包联合降噪方法的可行性,首先对在 MATLAB 平台上仿真生成的 BU 信号进行降噪处理。2FSK 信号主要频率设置为 4.512 和 3.948 MHz,采样率 f_s 设置为 38.4 MHz,传输速率 V_b 设置为 128 kbit/s。通过在 2FSK 信号中加入高斯白噪声 $N_0(t)$ 来模拟现实状态下受环境噪声影响的 BU 信号,模拟信号 $F_{BU}(t)$ 表达式为:

$$F_{BU}(t) = U_{2FSK}(t) + N_0(t) \quad (14)$$

图 5 为 2FSK 信号的波形图,图 6 为模拟 BU 信号的波形图,图 7 为模拟 BU 信号频谱图。由 BU 信号的波形图和频域图可以明显看出噪声严重影响了信号的上边频和下边频,且频率分布广泛,将会严重影响 BU 信号的解调,增加了错误解码可能性,如果车载 BTM 连续未识别报文信息,列车将输出紧急制动^[19]。

对含噪的 BU 信号进行 CEEMDAN 分解,算法参数设置:噪声标准差为 0.2,各阶 IMF 分量求和平均次数为 100 次。最终 BU 信号被分解成 11 个本征模态分量和 1 个残差分量,再对 12 个分量进行傅里叶变换,得到 IMF1~IMF12 的时域分析图和频域分析图,分解结果如图 8 所示。

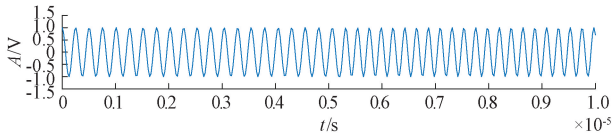


图 5 2FSK 信号波形图

Fig. 5 2FSK signal waveform diagram

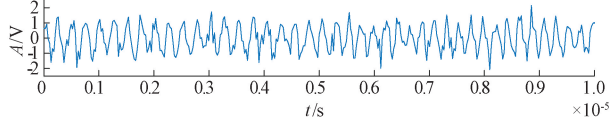


图 6 模拟含噪 BU 信号波形图

Fig. 6 Simulated noisy BU signal waveform diagram

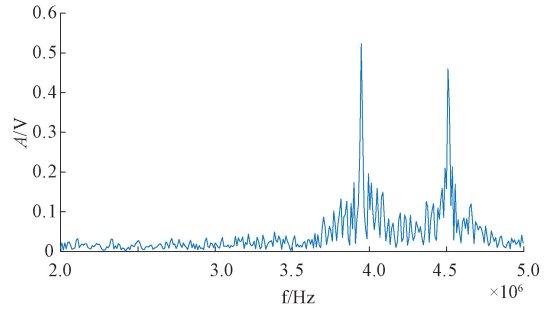


图 7 模拟含噪 BU 信号频谱图

Fig. 7 Simulated noisy BU signal spectrum diagram

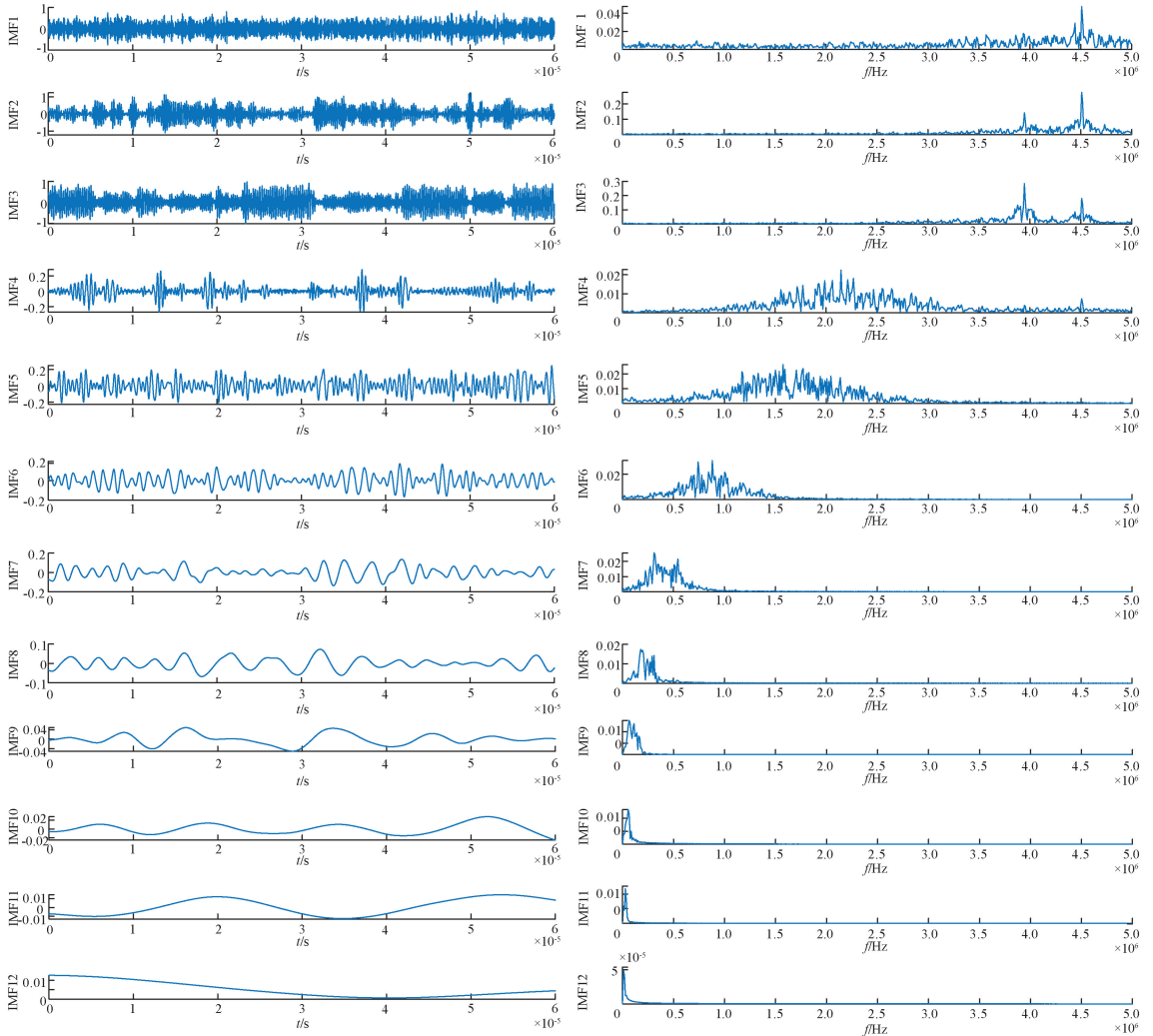


图 8 模拟含噪 BU 信号的 CEEMDAN 分解图及对应频谱图

Fig. 8 CEEMDAN decomposition diagram and corresponding spectrum diagram of simulated noisy BU signal

由于经 CEEMDAN 分解后的 IMF 分量中会存在一些趋势项,而这些趋势项中基本不含有信号的有效信息,仅代表信号的变化趋势^[20],将这些 IMF 分量定义为无关分量。通过计算 12 个 IMF 分量的相关系数,界定相关分量与无关分量。相关系数的计算公式如式(15)所示。各

IMF 分量相关系数计算结果如表 1 所示。

$$c_k = \frac{\sum (IMF_k - \overline{IMF_k}) (F_{BU} - \overline{F_{BU}})}{\sqrt{\sum (IMF_k - \overline{IMF_k})^2 \sum (F_{BU} - \overline{F_{BU}})^2}} \quad (15)$$

表 1 模拟 BU 信号各分量的相关系数

Table 1 Correlation coefficient of each component of simulated BU signal

IMF	1	2	3	4	5	6
c_k	0.506 4	0.833 7	0.843 6	0.209 0	0.135 6	0.073 1
IMF	7	8	9	10	11	12
c_k	0.066 6	0.043 8	0.028 0	0.009 5	0.008 4	0.002 3

由表 1 相关系数的结果界定 IMF1~IMF9 为相关分量,因为 IMF10~IMF12 的相关系数接近于 0,并结合相应的频谱图分析发现与所需的 BU 信号主要频率相差较大,因此可以认为这些分量中几乎不含有 BU 信号有效信息,认定 IMF10~IMF12 为无关分量。IMF2、IMF3 的相关系数均大于 0.8,说明这两个分量为含噪较少的相关分量,其他相关分量的相关系数在 0.8 以下,认定为含噪较多的相关分量。

如果仅对含噪较少的 IMF2、IMF3 进行重构,必然会造成 BU 信号中有效信息的缺失,进而导致应答器信息丢失,危及行车安全。故需要对相关分量 IMF1~IMF9 进行小波包降噪处理,提取有效信息。通过多次试验发现采用软阈值处理方法,sym5 小波,对加噪的 BU 信号进行 4 层分解时,降噪效果最好。对经小波包降噪后的 IMF 分量进行重构,得到经 CEEMDAN 和小波包联合降噪后的 BU 信号。

联合降噪后 BU 信号的波形图如图 9 所示,频域分析图如图 10 所示。对比降噪前后信号波形图,可以看出降噪的同时保留了大量原始信号波形,对比降噪前后的频谱图,可以看出通过联合降噪后的 BU 信号两个主频更加明显,幅值更大,且其他频段的信号幅值都有明显地降低。

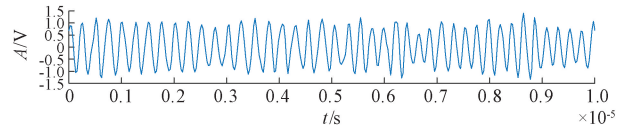


图 9 联合降噪后 BU 信号波形图

Fig. 9 Waveform diagram of BU signal after joint denoising

为了验证本文方法的优越性,故选取 SNR 和均方根误差(RSME)作为评价指标,计算公式如式(16)、(17)所示。

$$SNR = 10\lg\left\{\frac{\sum_{i=1}^N F_{BU}(t)^2}{\sum_{i=1}^N [F_{BU}(t) - F'_{BU}(t)]^2}\right\}$$

(16)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [F_{BU}(t) - F'_{BU}(t)]^2}$$

(17)

式中: $F_{BU}(t)$ 为含噪的 BU 信号, $F'_{BU}(t)$ 为降噪后的 BU 信号, N 为信号长度。

将本文所提出的方法分别与模拟 BU 信号、CEEMD、

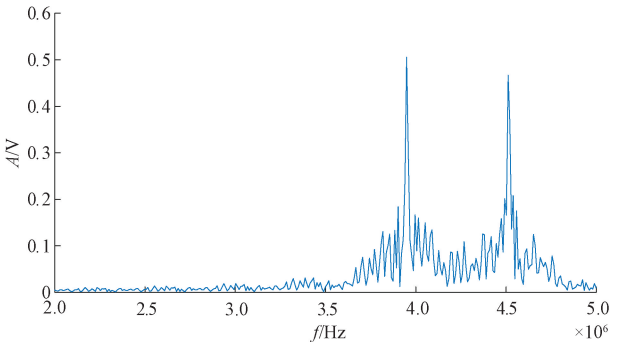


图 10 联合降噪后 BU 信号频谱图

Fig. 10 Spectrum diagram of BU signal after joint denoising

CEEMD-小波包、EEMD、EEMD-小波包、CEEMDAN 进行对比,对比结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,采用本文方法降噪后的 BU 信号与模拟 BU 信号对比,两项指标均大幅提高,说明本方法具有良好的降噪效果。与其他 5 种算法的对比结果可知,采用本文方法降噪后信号的 RMSE 值均低于其他算法,说明本文所提出的方法在去除噪声的同时,更好地保留了信号中的有效成分。在仿真实验中,CEEMDAN 分解出的模态分量为 12 个,EEMD 为 18 个,CEEMD 为 15 个,说明 CEEMDAN 相较于 EEMD 和 CEEMD 在运行效率上也有所提高。通过 3 组联合算法与单一算法的对比可以证明小波包分析方法在对模拟 BU 信号进行处理时起到了重要作用,相较于单一算法降噪效果更好。

表 2 不同降噪方法的效果对比

Table 2 Comparison of the effects of different denoising methods

处理方法	SNR	RMSE
模拟 BU 信号	1.894 0	11.371 3
CEEMD	6.484 2	0.335 2
CEEMD-小波包	7.401 4	0.301 6
EEMD	7.3136	0.304 7
EEMD-小波包	7.552 3	0.296 4
CEEMDAN	7.433 4	0.320 2
本文方法	8.038 4	0.280 3

4 实测信号降噪

为验证方法的实际应用效果,故对采集到的实测 BU

信号采用本文方法进行降噪处理。实测 BU 信号是在 BTM 无法解码报文时通过 DSOX3504A 示波器采集到的,采样率设置为 500 MHz,实验平台如图 11 所示。



图 11 应答器实验平台
Fig. 11 Balise experimental platform

采集到的信号时域分析图如图 12 所示,图中可以看出信号中明显包含大量瞬态噪声分量,有用信息完全淹没在噪声中,BTM 已无法识别 BU 信号。由图 12 可以看出,实测 BU 信号中含有两个载波频率(3.948 和 4.512 MHz)以外的噪声信号,且噪声信号频率分布广泛,其所具有的能量足以扰乱 BTM 的解码。在噪声环境下,能否正常识别出应答器所提供的信息,是检验 BITS 抗干扰性能的关键指标^[21]。

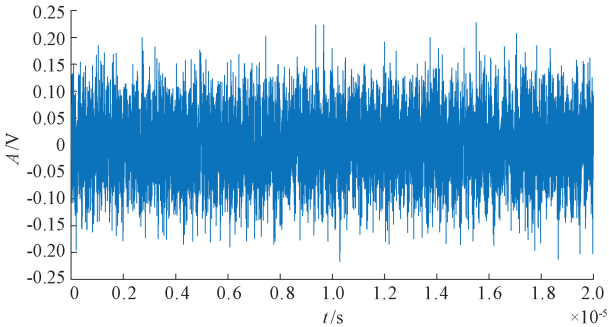


图 12 实测 BU 信号波形图
Fig. 12 Measured BU signal waveform diagram

采用 CEEMDAN-小波包联合降噪方法对受噪声污染的实测 BU 信号进行处理,降噪后信号波形图如图 13 所示,降噪前后信号频谱对比图如图 14 所示。对比图 12 和 13 可以看出降噪后波形比降噪前波形的变化趋势更加清晰,信号中的瞬态噪声被基本滤除,BTM 可以正确识别到 3.948 和 4.512 MHz 的两个载波。降噪效果在图 14 中体现得更加直观,降噪后 BU 信号的两个载波频率幅值更加突出,并没有因为使用了降噪算法而衰减,其他频率的噪声信号得到了有效抑制,特别是 0~3.5 MHz 的噪声信号。降噪后信号的频谱图较为干净,含有噪声

成分较少,不影响 BTM 的正常解码。分析表 3 可知,采用本文提出的联合降噪方法,降噪后信号的信噪比显著提高了 13.541 8 dB,均方根误差降低了 9.933 2,降噪效果良好,进一步证明了本文方法的有效性。为了验证降噪后信号的完整性,采用相干解调方法对降噪后的实测 BU 信号进行解调验证,将解调结果与应答器报文信息对比后发现两者所含信息相同,误码率为 0%。综上所述,本文方法具可行性、有效性及实用性,可以用于解决实际现场中 BU 信号受扰问题。

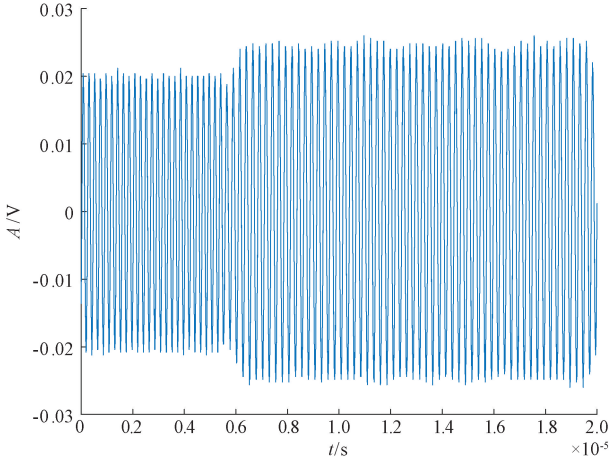


图 13 降噪后实测 BU 信号波形图
Fig. 13 Measured BU signal waveform after denoising

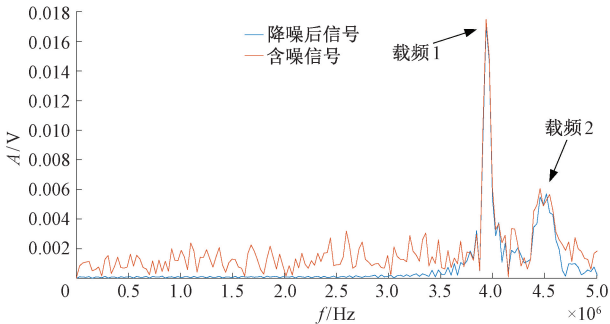


图 14 降噪前后频谱对比
Fig. 14 Comparison of spectrum before and after denoising

表 3 降噪效果对比		
Table 3 Comparison of denoising effects		
评价指标	实测 BU 信号	降噪后实测 BU 信号
SNR	1.128 6	14.670 4
RMSE	10.398 5	0.465 3

5 结 论

针对应答器传输系统在工程应用时频繁反映的 BU

信号受扰问题及 BU 信号在列控系统中的作用,本文提出了一种基于自适应白噪声完备经验模态分解联合小波包自适应阈值算法来应用到 BU 信号降噪中,得到如下结论:

1) 针对信号经 CEEMDAN 分解后的 IMF 分量中存在趋势项或与原始信号无关的分量,采用相关系数法界定相关分量和无关分量,有利于后续对信号做进一步降噪处理,同时可以提高信号处理效率。

2) 与采用小波包单独降噪或者 CEEMDAN 单独降噪相比,联合降噪方法更适用于对 BU 信号进行降噪处理,降噪后的信噪比和均方根误差均有大幅度改善。

3) 通过对比降噪前后信号的频谱图、波形图和解调验证,结果表明受噪声污染的 BU 信号得到了有效降噪并且完整提取了应答器中的报文信息。

参考文献

- [1] LI Z J, CAI B G. Modelling and performance analysis of balise under dynamic energy harvesting in high-speed railway[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2022, 16(11): 1504-1520.
- [2] 李智宇. 分相区应答器传输系统电磁干扰分析及防护技术研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(7): 1-6.
LI ZH Y. Research on electromagnetic interference and protection technology of balise transmission system in neutral section[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(7): 1-6.
- [3] LIU G, ZHAO L, WANG T. Balise uplink signal demodulation method based on adaptive optimal kernel time-frequency analysis [C]. IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 2017.
- [4] 王瑞峰,张宏雁. 基于 Duffing 振子的 2FSK 信号检测方法研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(7): 63-67.
WANG R F, ZHANG H Y. Study on detection method of 2FSK signal based on duffing oscillator[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(7): 63-67.
- [5] 杨红强,米根锁,王宝宝. 自适应小波阈值算法在应答器信号去噪中的应用[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 31-34.
YANG H Q, MI G S, WANG B B. Application of adaptive wavelet threshold algorithm in balise signal denoising [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 37 (1): 31-34.
- [6] 张友鹏,梁鹏飞. 基于 EEMD 的应答器上行链路信号处理的研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 86-90.
ZHANG Y P, LIANG P F. Dispose of balise uplink signal based on ensemble empirical mode decomposition [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 86-90.
- [7] GENG Q, WEN Y H, LIU S, et al. A VMD based improved denoising of onboard BTM receiving signal[J]. Chinese Journal of Electronics, 2020, 29(1): 66-72.
- [8] 吕城锦,赵会兵,朱林富,等. 基于 Kalman 滤波的应答器上行链路信号处理的研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(11): 64-68.
LYU CH J, ZHAO H B, ZHU L F, et al. Research on balise uplink signal process based on Kalman filter[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(11): 64-68.
- [9] GAO Z, ZHANG S, HAO L, et al. Modeling and analysis the effects of EMP on the balise system[J]. CMC-Computers, Materials & Continua, 2019, 58(3): 859-878.
- [10] 李正交,蔡伯根,戴胜华,等. 考虑列车运行速度的应答器传输系统可靠性评估[J]. 铁道学报, 2017, 39(12): 86-93.
LI ZH J, CAI B G, DAI SH H, et al. Reliability evaluation of balise transmission system considering train velocity [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(12): 86-93.
- [11] 国家铁路局. 应答器传输系统技术条件: TB/T 3485-2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
State Railway Administration. Technical specification of balise transmission system: TB/T 3485 - 2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [12] 黄国峰,庄学彬,谢礼伟,等. 基于 CEEMDAN-WP-SG 的 MEMS 陀螺仪去噪算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 106-113.
HUANG G F, ZHUANG X B, XIE L W, et al. MEMS gyroscope denoising algorithm based on CEEMDAN-WP-SG [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 106-113.
- [13] ZHOU Z, ZHANG J, CHENG R, et al. Improving purity of blasting vibration signals using advanced empirical mode decomposition and wavelet packet technique[J]. Applied Acoustics, 2022, 201: 109097.
- [14] 杨智中,林军志,汪魁,等. 基于 CEEMDAN-小波包自适应阈值混凝土声发射信号降噪研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(3): 139-149.
YANG ZH ZH, LIN J ZH, WANG K, et al. De-noising of concrete acoustic emission signals based on CEEMDAN wavelet packet adaptive threshold [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(3): 139-149.
- [15] BEALE C, NIEZRECKI C, INALPOLAT M. An adaptive

- wavelet packet denoising algorithm for enhanced active acoustic damage detection from wind turbine blades [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 142: 106754.
- [16] 马红荣,刘洪伟,牟宗磊. 矿用永磁直驱电机异响声信号降噪方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4): 44-53.
- MA H R, LIU H W, MOU Z L. Research on denoising method of abnormal sound signal for direct-driven permanent magnet motor in coal mine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4): 44-53.
- [17] 周建, 向北平, 倪磊, 等. 基于 Shannon 熵的自适应小波包阈值函数去噪算法研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(16): 206-211.
- ZHOU J, XIANG B P, NI L, et al. A study on adaptive wavelet packet threshold function de-noising algorithm based on Shannon entropy [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(16): 206-211.
- [18] YANG Y, LI S S, LI C, et al. Research on ultrasonic signal processing algorithm based on CEEMDAN joint wavelet packet thresholding [J]. Measurement, 2022, 201: 111751.
- [19] 朱林富. 轨道交通应答器传输系统天线建模与优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- ZHU L F. Antenna modeling and optimization research of rail traffic balise transmission system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [20] 费鸿禄, 山杰. CEEMDAN-小波阈值法在爆破振动信号处理中的应用[J]. 爆破, 2022, 39(3): 41-47.
- FEI H L, SHAN J. Application of CEEMDAN-Wavelet threshold method in the signal processing of blasting vibration [J]. Blasting, 2022, 39(3): 41-47.
- [21] FRANCO D, AGUADO M, PINEDO C, et al. A contribution to safe railway operation: Evaluating the effect of electromagnetic disturbances on balise-to-BTM communication in railway control signaling systems [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2021, 16(2): 104-112.

作者简介



刘德伟 (通信作者), 现为兰州交通大学硕士研究生, 主要研究方向为交通信号控制、信号处理。

E-mail: 904753031@qq.com

Liu Dewei (Corresponding author) is now a M. Sc. candidate at Lanzhou Jiaotong University. His main research interests include traffic signal control and signal processing.



朱爱红, 2004 年于兰州交通大学获得工学硕士学位, 现为兰州交通大学副教授, 主要研究方向为交通信号控制、信号处理。

E-mail: 791338890@qq.com

Zhu Aihong received a M. Sc. degree of Engineering degree from Lanzhou Jiaotong University in 2004. She is now an associate professor of Lanzhou Jiaotong University. Her main research interests include traffic signal control and signal processing.