

莫建国.高速铁路地震监测系统中降低信号远程传输失真的技术探讨[J].地震工程学报,2019,41(3):781-787.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.781

MO Jianguo.Discussion of Signal Distortion Reduction after Long-distance Transmission in Seismic Monitoring System of High-speed Railway[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(3):781-787.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.781

高速铁路地震监测系统中降低信号 远程传输失真的技术探讨

莫建国^{1,2}

(1.吉林铁道职业技术学院铁道信号学院,吉林吉林132200;2.石家庄铁道大学,河北石家庄050000)

摘要:当前信号远程传输方法,没有实现传输通道能量与传输通道信号并行,导致信号远程传输失真性较高。为提高地震信号远程传输的效率,提出新的高速铁路地震监测系统中信号远程传输技术。采用信号传输通道中地震信号能量的并行方法,通过信号传输通道中信号并行传输结构,实现信号在传输通道中双向传输;利用高频阻波电路阻断信号的高频载波通过谐振补偿电容,确保传输通道能量传输不受干扰;根据通道能量传输结构与信号传输过程,实现传输通道能量、信号并行,完成高速铁路地震信号远程传输中的失真控制。实验结果表明,所提方法丢包率较低,均值约为3%,远程传输时延仅为0.9s,是一种低误差、高效率的高速铁路地震信号远程传输方法。

关键词:高速铁路;地震监测系统;Lab VIEW编程;高频阻波;信号

中图分类号:U238

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2019)03-0781-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.787

Discussion of Signal Distortion Reduction after Long-distance Transmission in Seismic Monitoring System of High-speed Railway

MO Jianguo^{1,2}

(1.School of Railway Signaling, Jilin Railway Technology College, Jilin 132200, Jilin, China;

2.Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050000, Hebei, China)

Abstract: The current long-distance signal transmission method does not realize parallelism between the transmission channel energy and transmission channel signals, which leads to high distortion of long-distance signal transmissions. To improve the long-distance transmission efficiency of seismic signals, in this paper, we propose a new technique for long-distance signal transmission in the seismic monitoring systems of high-speed railways. By adopting a method using parallel seismic signal energies in the signal transmission channel and parallel signal transmission structures in the transmission channel, we realize the bidirectional transmission of signals in the transmission channel. Based on the channel energy transmission structure and the signal transmission process, we made the transmission channel energy and signal parallel, and controlled the

收稿日期:2018-09-18

基金项目:吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20170405KJ);国家自然科学基金(11171087)

作者简介:莫建国(1977-),男(蒙古族),吉林省吉林人,高级工程师,主要研究方向:铁道通信信号、自动化控制等。

E-mail:mjg197712112739@163.com.

distortion of seismic signals in long-distance transmissions of high-speed railways. The experimental results show that the proposed method has a low packet-loss rate of about 3% and a long-distance transmission delay of only 0.9 s. This represents a low-error and high-efficiency long-distance transmission method for seismic signals in high-speed railways.

Keywords: high-speed railway; seismic monitoring system; Lab VIEW programming; high-frequency wave attenuation; signal

0 引言

地震灾害是众多自然灾害中生命财产损失较高、波及范围较广、发生频率较大的灾害形式^[1]。铁路是人群比较集中的地点,一旦发生地震灾害,后果极其严重。对于行驶速度较低的列车而言,抗震工作集中在列车经过的桥梁、隧道以及路面等方面,通过加固修筑、采用合理的建筑结构等方式可提高这些设施的抗震性能^[2]。但是对于高速铁路而言,列车行驶的速度极快,地震灾害易导致列车脱轨,产生灾难性的后果。与此同时,列车在铁轨上长期行驶,铁轨和车轮之间不断发生摩擦,彼此接触呈不平稳状态,建设铁路之初的焊接处也会有磨损。高铁重量达数千吨,行驶速度可达每小时几十千米,由于行驶中不断振动带来的能量巨大,对周围构筑物会造成一定程度的损害,这种损害甚至可以传播至几千米之外。因此,设计合理的高速列车地震监测系统十分必要,其中实现系统信号传输通道远程配置是获取有效地震信号的关键。地震预防研究领域高速铁路地震监测系统远程传输方法较多,文献[3]中描述的基于网络化控制方法,采集地震信号过程中缺乏分析、处理地震信号的步骤,导致采集的地震信号有效性较低,大大降低了传输通道远程配置的可靠性,远程配置效果差;文献[4]采用基于异构数据融合方法,没有实现传输通道能量与传输通道信号并行,传输通道中信号的远程配置缺乏能量支持,导致远程传输的效率较低。

针对上述方法存在的缺陷,为提高高速铁路地震监测系统信号远程传输的效果,提出新的高速铁路地震监测系统信号远程传输失真控制方法;以地震信号采集与存储为基础,从传输通道能量与传输通道信号两方面完成信号传输通道的远程配置^[5],为确保乘客生命财产安全提供有效依据,具有一定的社会和经济意义。

1 高速铁路地震监测系统中降低信号远程传输失真技术

分别使用短周期地震仪与宽频地震仪进行地震

信号监测采样,采样目标包括列车本身振动所致地震和天然地震动信号。具体采样点设置如图1所示。

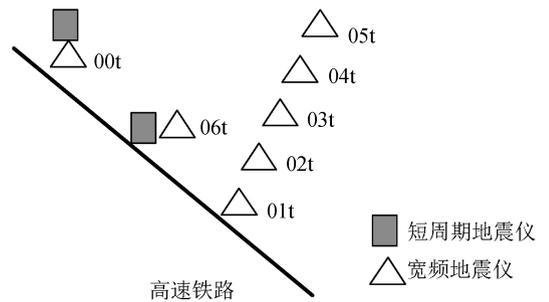


图1 采样点设置

Fig.1 Setting of sample points

1.1 基于 Lab VIEW 编程的地震信号收集存储

采用 Lab VIEW 编程实现高速铁路地震信号的收集存储^[6]。波形界面、采样率、端口、开始-终止采集按钮是 Lab VIEW 界面的主要功能设置。Lab VIEW 编程客户端采用 TCP/IP 协议模块,所以存储高速铁路地震信号的功能十分强大。TCP/IP 协议模块包括 TCP Open、TCP Read、TCP Write、TCP Close,根据这些函数归纳 Lab VIEW 编程客户端收集存储高速铁路地震信号的流程(图2)。

图2描述的流程中构建了两次 TCP/IP 连接,下达采集数据指令、接受数据、显示数据在首次构建的 TCP/IP 连接中完成,启动停止收集指令后地震数据仍在收集,但是 TCP/IP 连接处于关闭状态;第二次构建的 TCP/IP 连接负责发送首次 TCP/IP 连接关闭时收集到的数据,任务完成后关闭第二个 TCP/IP 连接。

1.2 信号远程传输结构设计

通过 Lab VIEW 编程完成高速铁路地震监测系统信号的收集存储,在此基础上采用信号能量并行的方法完成信号传输通道的远程传输。高速铁路地震监测系统信号传输通道中能量信号并行传输结构用图3描述。分析图3能够看出,为实现地震信号远程传输,系统增加信号加载电路、信号检波电路、高频载波电路,更新以往系统传输通道结构^[7],其中高频载波电路可有效防止传输通道中谐振补偿

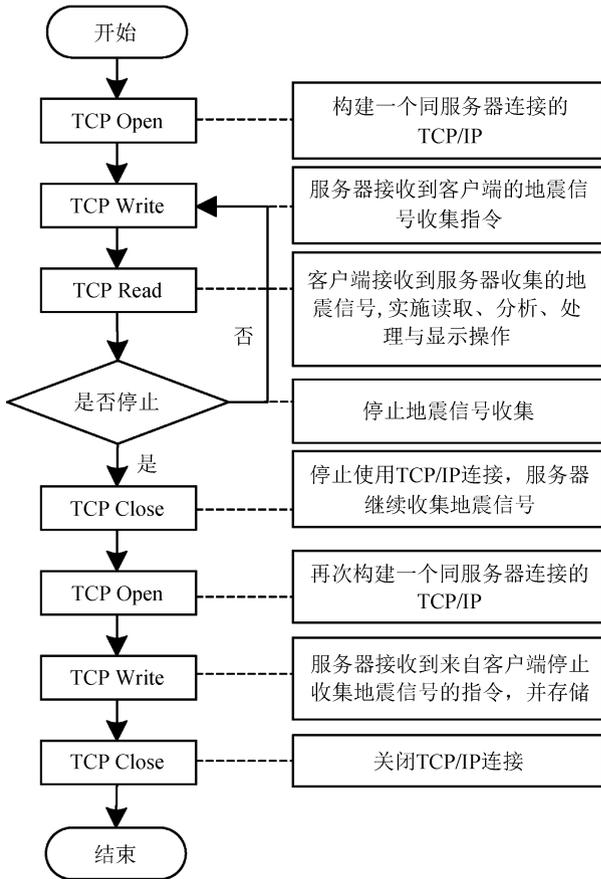


图 2 Lab VIEW 编程收集存储地震信号流程
Fig.2 Flow of collecting and storing earthquake signal by Lab VIEW program

输, 传输原理为: 正向传输情况下, 信号检波 1 从传输信道中采集信号加载 1 输入的的信号载波; 反向传输情况下, 由 2 号信号检波、信号加载按同样原理操作。

1.2.1 高频阻波电路

为实现传输通道能量、传输通道信号并行, 在以往电路结构上增加高频阻波电路。高频载波通过谐振补偿电容的状况可采用高频阻波电路有效阻止, 确保传输通道的能量传输不会受到干扰^[9]。其原理为^[10]: 阻波电路由电感电容以并联方式组成, 设置信号载波频率与阻波电路中心频率相同, 则会出现短路与断路的情况, 一方面因为能量传输频率远远小于载波频率, 导致能量传输频率状态下阻波电路的特征阻抗极小^[11]; 另一方面因为阻波电路特征阻抗在载波频率下极大。短路与断路均造成载波阻断, 同时传输通道的能量传输不受干扰。

1.2.2 传输通道的能量传输结构

研究传输通道能量传输状态, 可不考虑信号加载电路、检波电路, 因为两者在能量传输频率设置下属于断路无效状态^[12]。图 4 描述了系统传输通道的能量传输结构, 图中信号传输通道的直流输入电源、传输通道的原边谐振补偿电容分别用 E_{dc} 、 C_p 表示; 传输通道的耦合线圈内阻表示成 R_p 、 R_s ; 高频阻波电路由 L_1 、 C_{p1} 、 L_2 、 C_{p2} 构成, 采用高频阻波电路可有效防止削弱能量传输谐振电路的情况, 因为信号载波必须从耦合机构中通过。此传输结构可确保整个通道电压、电流、传输通道能量稳定, 传输通道

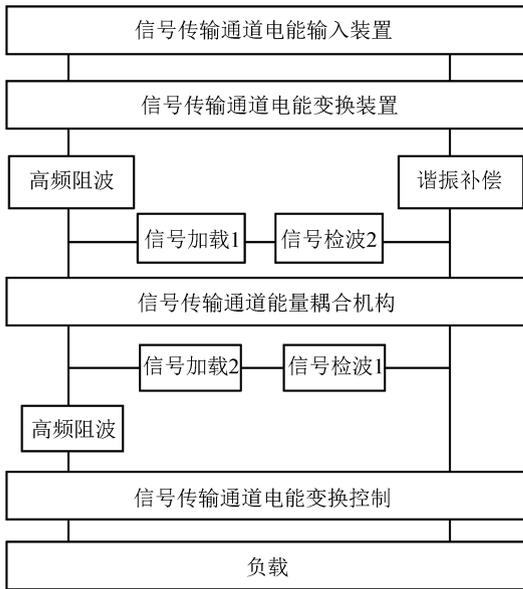


图 3 能量信号并行传输结构

Fig.3 Parallel transmission structure of energy signal

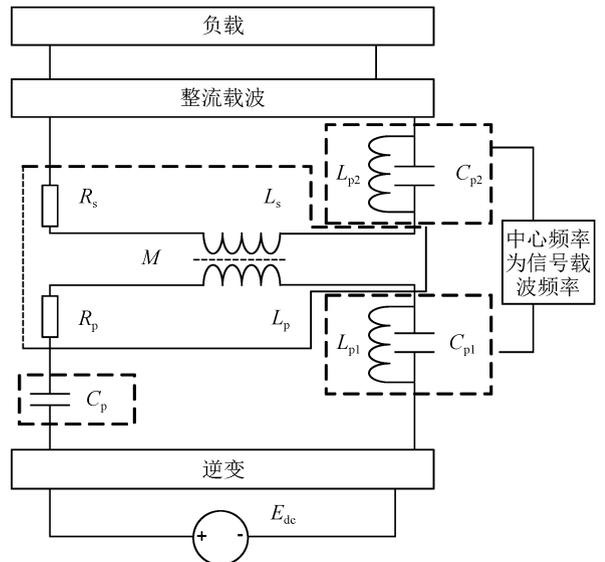


图 4 系统传输通道的能量传输结构

Fig.4 Energy transmission structure of system transmission channel

电路受到高频载波的干扰, 以便更好地传输地震信号^[8]。这种结构能够实现信号在传输通道中双向传

能量稳定传输为传输通道信号传输提供了能量支持,提高了信号传输效率。

1.2.3 传输通道的信号传输过程

由于传输通道能量在传输过程中用阻波电路阻止载波通过,因此研究传输通道信号传输可不考虑能量传输部分。传输通道的信号传输过程用图 5 描述。

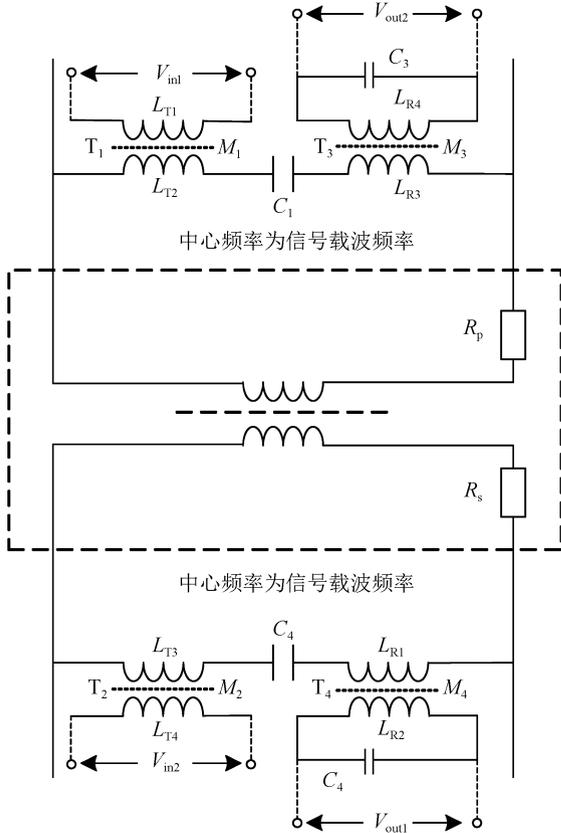


图 5 系统传输通道的信号传输电路

Fig.5 Signal transmission circuit of system transmission channel

系统信号的反向传输与正向传输原理相同,分析图 5 能看出信号在传输通道中正向传输的过程为^[13]:变压器 T_1 负责将地震信号载波输入信号传输通道,信号载波的提取由变压器 T_4 完成,采用信号处理模块完成信号到数字的转换,最后显示地震信号结果。在此过程中,电容 C_1 同变压器 T_1 、 T_3 以副边串联的方式存在,带通滤波器特性是这种组合方式的主要特点,此时存在两种情况,一是信号载波传输不受阻碍,二是能量传输呈现断路状态,即不干扰能量传输^[14],因为信号载波频率与调节中心频率一致。

上述方法结合传输通道的能量与信号,实现传输通道能量、传输通道信号并行,完成高速铁路地震监测系统信号远程传输的失真控制。

2 实验分析

2.1 信号采集测试

为验证本文方法的有效性优势,展开仿真实验研究。选取某高速铁路地震监测系统作为实验系统,系统信号传输通道数量为 5^[15-16],命名为 A、B、C、D、E。本文方法的采样率是 150 sample/s。实现高速铁路地震监测系统信号远程传输控制,信号正向传输时,信号加载端到信号检波端即信号输入到输出的通道衰减伯德图用图 6 描述。

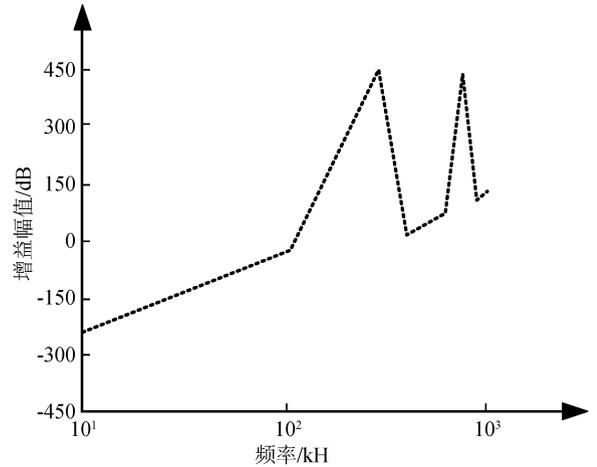


图 6 信号加载端到信号检波端衰减伯德图

Fig.6 Attenuation bode diagram from signal loading end to signal detector end

分析图 6 能够看出,频率在 $10^1 \sim 10^2$ kHz 间时,载波传输通道衰减增益幅值上升趋势平缓,未出现峰值;频率为 $10^2 \sim 10^3$ 间时,载波传输通道衰减增益幅值出现两次峰值,均达 450 dB 左右,衰减情况不稳定且衰减程度大,此时信号传输通道存在多谐振性质。上述两种情况下,衰减波动大的传输通道对应的载波频率不能使用,因此,本文方法选择 $10^1 \sim 10^2$ 区间作为实现信号传输通道远程配置的载波频率。

本文方法在通道 A 上的采样噪声如图 7 所示。分析图 7 能够看出,本文方法在通道 A 中的采样噪声稳定在 $-1.0 \times 10^{-6} \sim 1.25 \times 10^{-6} \mu\text{V}$ 间,说明本文方法采样噪声较小、稳定性好,所以其在系统通道中采集到的地震信号可靠程度较高,可为远程配置传输通道信号提供较好的数据基础。

为验证本文方法传输地震信号的性能,采用量化分析的方式计算信号噪声,采用本文方法分别在 5 个通道上展开 3 次采样测试,利用 STDEVA 函数计算信号噪声均方差,将结果列于表 1。

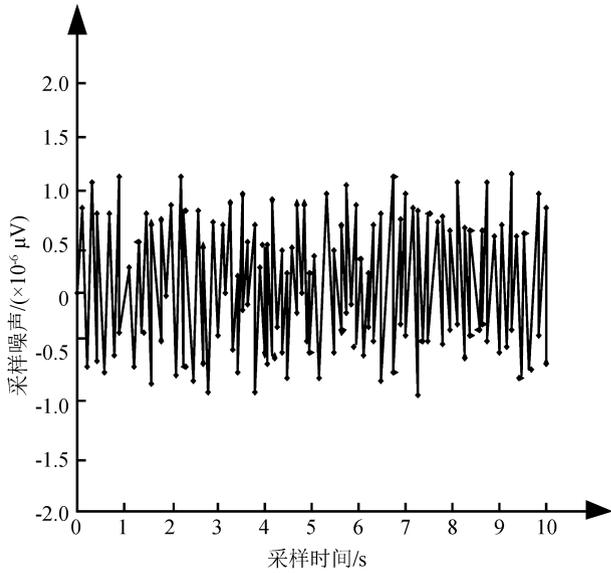


图 7 通道 A 的采样噪声

Fig.7 Sampling noise in channel A

表 1 信号噪声均方差情况(单位:μV)

Table 1 Mean square deviation of signal noise (Unit:μV)

| 通道名称 | 实验次数 | | |
|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 1 | 2 | 3 |
| 通道 A | 3.12×10^{-7} | 3.17×10^{-7} | 3.15×10^{-7} |
| 通道 B | 3.66×10^{-7} | 3.75×10^{-7} | 3.60×10^{-7} |
| 通道 C | 3.65×10^{-7} | 3.72×10^{-7} | 3.64×10^{-7} |
| 通道 D | 3.71×10^{-7} | 3.75×10^{-7} | 3.66×10^{-7} |
| 通道 E | 3.81×10^{-7} | 3.83×10^{-7} | 3.75×10^{-7} |

分析表 1 可知,本文方法在 5 个信号传输通道上采集到的信号噪声均方差均在 $4.0 \times 10^{-7} \mu V$ 以下,且稳定在 $3.5 \times 10^{-7} \mu V$ 以上,说明噪声的一致性较优,数据波动性小、稳定性强。这说明采用本文方法远程传输地震监测系统信号的失真较少,再一次验证了其传输信号的有效性。

2.2 远程传输的丢包率分析

为突出本文方法在高速铁路地震监测系统信号远程传输方面的优势,采用基于网络化控制的远程配置方法、基于异构数据融合的方法展开对比实验,分析三种方法远程传输信号的丢包率。采用三种方法在 5 个信号通道上进行高速铁路地震监测系统信号远程传输实验,每种方法在每个通道上完成 3 次测试,取 3 次测试的均值作为实验分析依据。图 8 描述了三种方法的丢包率情况。

分析图 8 可知,本文方法的丢包率最低,均值在 3%左右,虽在 B 通道上有所增加,但在进入工作状态之后丢包率逐渐降低,直到实验结束时丢包率仅为约 1.9%,由此证明本文方法的丢包率较低;基于网络化控制方法在 5 个传输通道上的丢包率总体呈

上升趋势,实验结束时达到最大值 27.5%,与本文方法对比,该方法丢包率高,远程配置信号传输通道的性能较差;在实验后期,基于异构数据融合方法的丢包率虽然快速下降,但是该方法的初始丢包率较高,达到 27%,即使后期丢包情况有所缓解,但是仍达不到有效配置信号传输通道的标准。

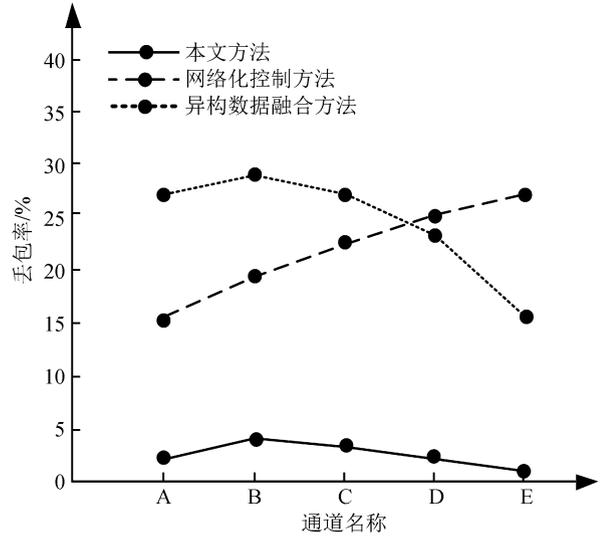


图 8 三种方法丢包率对比

Fig.8 Comparison of packet loss rates of three methods

综上所述,本文方法在信号远程传输过程中,能够将地震信号全面地传输到高速铁路地震监测系统的客户端,相比同类方法具有较高的传输优势。

2.3 远程传输时延分析

高速铁路地震监测系统信号远程传输过程中,由于距离较长,耗费的时间较多,因此远程传输时延是衡量方法性能的关键指标。记录 2.2 小节中三种方法的时延情况,并列于表 2~表 4。

对比表 2~表 4 数据能够看出,本文方法的时延均值约为 0.9 s,在通道 A、D 上的传输时延均大于 1.0 s,另外三种通道上的传输时间较短,小于 1.0 s,同时,分析本文方法的 5 组数据可知,本文方法的波动性较小、稳定性较强;基于网络化控制方法的传输时延约为 7.3 s,相比本文方法高出 6.4 s,所

表 2 本文方法的时延情况(单位:s)

Table 2 Time delay of this method (Unit:s)

| 通道名称 | 实验次数 | | |
|------|------|-----|-----|
| | 第一次 | 第二次 | 第三次 |
| 通道 A | 1.2 | 1.1 | 1.0 |
| 通道 B | 0.8 | 0.7 | 0.8 |
| 通道 C | 0.9 | 0.9 | 0.8 |
| 通道 D | 1.1 | 1.2 | 1.1 |
| 通道 E | 0.7 | 0.8 | 0.8 |

表3 网络化控制方法的时延情况(单位:s)

Table 3 Time delay of networked control method (Unit:s)

| 通道名称 | 实验次数 | | |
|------|------|-----|-----|
| | 第一次 | 第二次 | 第三次 |
| 通道 A | 5.6 | 6.2 | 6.1 |
| 通道 B | 8.9 | 8.5 | 8.6 |
| 通道 C | 5.9 | 6.2 | 6.2 |
| 通道 D | 8.4 | 8.2 | 8.3 |
| 通道 E | 7.6 | 7.5 | 7.4 |

表4 异构数据融合方法的时延情况(单位:s)

Table 4 Time delay of heterogeneous data fusion method (Unit:s)

| 通道名称 | 实验次数 | | |
|------|------|-----|-----|
| | 第一次 | 第二次 | 第三次 |
| 通道 A | 2.1 | 2.3 | 2.5 |
| 通道 B | 3.6 | 3.8 | 3.7 |
| 通道 C | 6.5 | 6.4 | 6.3 |
| 通道 D | 1.4 | 1.3 | 1.6 |
| 通道 E | 3.5 | 3.4 | 3.8 |

以该方法远程传输的效率较低,不能有效完成信号远程传输;同理,基于异构数据融合方法相比本文方法高出 2.6 s,不能作为有效的信号远程传输方法使用。

综合上述数据能够看出,本文方法相比同类方法具有远程传输效率高的优势。

3 结论

本文针对基于网络化控制方法、基于异构数据融合方法存在的缺陷,提出新的高速铁路地震监测系统信号远程传输降低失真的方法。本文方法的优点为采用信号能量并行的远程传输,首先利用高频阻波电路阻断信号的高频载波通过谐振补偿电容,确保传输通道能量、传输通道信号并行;其次根据传输通道的能量传输结构与信号传输过程,实现所采集高速铁路地震信号的准确远程传输。

经验证,本文方法信号采样噪声较小、稳定性好,远程传输时延仅为 0.9 s,是一种高效率的信号远程传输方法,可为高速铁路抗灾减灾提供有效基础。

鉴于论文篇幅所限,有关的技术环节未做更多阐述,有兴趣的读者可与作者联系讨论。

参考文献(References)

[1] 王彬,李孝宾,刘自凤,等.宾川地震信号发射台的震源系统、观测系统和观测结果[J].中国地震,2016,32(2):193-201.
WANG Bin, LI Xiaobin, LIU Zifeng, et al. The Source and Observation System of Binchuan Earthquake Signal Transmitting Seismic Station and Its Preliminary Observation Results[J].

Earthquake Research in China, 2016, 32(2): 193-201.

[2] 张俊,谢强.高速铁路接触网系统地震响应分析[J].铁道标准设计,2017,61(4):140-146.
ZHANG Jun, XIE Qiang. Analysis of Seismic Response of High-speed Railway Catenary System [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(4): 140-146.

[3] 宋洪波,刘国平.具有多传输通道系统的网络化预测控制[J].控制理论与应用,2015,32(7):912-917.
SONG Hongbo, LIU Guoping. Networked Predictive Control for Systems with Multiple Communication Channels [J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(7): 912-917.

[4] 徐田华,杨连报,胡红利,等.高速铁路信号系统异构数据融合和智能维护决策[J].西安交通大学学报,2015,49(1):72-78.
XU Tianhua, YANG Lianbao, HU Hongli, et al. Heterogeneous Data Fusion and Intelligent Maintenance Decision for High Speed Railway Signaling Systems [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(1): 72-78.

[5] 王子珺,赵伯明.高速铁路地震预警P波与S波复合自动快速识别的理论方法与应用[J].中国铁道科学,2016,37(4):121-127.
WANG Zijun, ZHAO Boming. Theoretical Method and Application of Auto-rapid P and S Waves Recognition in Earthquake Early Warning for High Speed Railway [J]. China Railway Science, 2016, 37(4): 121-127.

[6] 张永亮,杨世杰,陈兴冲.基于线桥一体化模型的高速铁路桥梁地震反应分析[J].桥梁建设,2016,46(4):23-28.
ZHANG Yongliang, YANG Shijie, CHEN Xingchong. Analysis of Seismic Responses of High-speed Railway Bridges Based on Integrated Track and Bridge Model [J]. Bridge Construction, 2016, 46(4): 23-28.

[7] TAO X D, BODINGTON D, REINIG M, et al. High-speed Scanning Interferometric Focusing by Fast Measurement of Binary Transmission Matrix for Channel Demixing [J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14168.

[8] 张广军,张博.高铁接入既有铁路枢纽信号系统改造方案研究[J].铁道标准设计,2017,61(3):153-156.
ZHANG Guangjun, ZHANG Bo. Research on Upgrading Program for Access of High Speed Railway to Existing Railway Hub Signaling System [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(3): 153-156.

[9] ZHANG C, FAN P Y, XIONG K, et al. Optimal Power Allocation with Delay Constraint for Signal Transmission from a Moving Train to Base Stations in High-speed Railway Scenarios [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(12): 5775-5788.

[10] 周银兴,张素灵,郭凯,等.高速铁路地震预警系统控车方案研究[J].震灾防御技术,2015,10(1):116-125.
ZHOU Yinxing, ZHANG Suling, GUO Kai, et al. High Speed Train Control Strategy in Earthquake Early Warning System [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2015, 10(1): 116-125.

[11] 张宝军,史建平,马莉.高速铁路车载地震装置在线管理系统

- 研究[J].铁道运输与经济,2017,39(7):47-52.
ZHANG Baojun, SHI Jianping, MA Li. Study on On-line Management System of High-speed Railway On-board Earthquake Emergency Treatment Device[J]. Railway Transport and Economy, 2017, 39(7): 47-52.
- [12] 朱旭芳, 颜冰, 马剑飞. 基于序列相关检测法的地震波传播速度测量方法[J]. 海军工程大学学报, 2017, 29(3): 87-91.
ZHU Xufang, YAN Bing, MA Jianfei. Seismic Wave Propagation Velocity Estimation Method Based on Serial Correlation Detection[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2017, 29(3): 87-91.
- [13] 孟军红, 刘丹丹, 耿立明. 微机控制系统信号传输通道的抗干扰措施[J]. 电子测试, 2015(14): 98-100.
MENG Junhong, LIU Dandan, GENG Liming. The Anti-interference Method of Signal Transmission Channel in the Microcomputer Control System[J]. Electronic Test, 2015(14): 98-100.
- [14] 向涯, 王彬, 杨润海, 等. 气枪主动源与天然地震信号的传播特征对比研究[J]. 地震研究, 2017, 40(4): 605-612.
XIANG Ya, WANG Bin, YANG Runhai, et al. Comparison of Propagation Characteristics of Signals Triggered by Air-gun Active Source and Natural Earthquakes[J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(4): 605-612.
- [15] 李寅, 王立夫, 孙怡. 数字化地震信号压缩方法研究[J]. 计算机工程, 2016, 42(9): 279-285.
LI Yin, WANG Lifu, SUN Yi. Research on Digital Seismic Signal Compression Method[J]. Computer Engineering, 2016, 42(9): 279-285.
- [16] 吴茜, 程梁. 城际铁路信号系统与防淹门系统接口设计研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(4): 173-176.
WU Xi, CHENG Liang. Research on Interface Design between Signal System and Flood Gate System in Intercity Railway[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(4): 173-176.

(上接第 749 页)

- [22] SCHWEITZER J, HYPOSAT. An Enhanced Routine to Locate Seismic Events[J]. Pure Appl Geophys, 2001, 158(12): 277-289.
- [23] 吴忠良, 黄静, 周公威. 震源深度与矩心深度的分布特征及其与震源机制类型之间的关系[J]. 中国地震, 2002, 18(4): 337-345.
WU Zhongliang, HUANG Jing, ZHOU Gongwei. Distribution of Hypocenter and Centroid Depths and its Focal Mechanism Dependence[J]. Earthquake Research in China, 2002, 18(4): 337-345.
- [24] 申学林, 王秋良, 魏贵春, 等. 基于近台数据的 2017-06 巴东 M4.3 地震序列震源深度研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(1): 14-17.
SHEN Xuelin, WANG Qiuliang, WEI Guichun, et al. Study on Focal Depth of Badong M4.3 Earthquake Sequence in June 2017[J]. 2018, 38(1): 14-17.