

光载信息能量同传方案及其通信检测应用

兰子林¹, 邹喜华¹, 白文林¹, 李沛轩¹, 李 阳¹, 潘 炜¹, 闫连山¹, 蒋灵明², 陈 亮²

(1. 西南交通大学信息科学与技术学院, 四川成都 611756; 2. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070)

摘 要: 基于光纤的大传输带宽、微型传能通道、抗电磁干扰等优势, 本文设计了一种光载信息能量同传方案. 它基于光纤一体化分布式链路, 结合微波光子模拟收发前端, 同步实现能量远程配送与高频宽带信号的采集传输. 首先, 设计并测试了光纤传能(Power over Fiber, PoF)链路: 高功率激光经多模光纤链路传输 2 km 后转换为百毫瓦级电能, 为远端模块供电或电池充电. 在此基础上, 设计并测试了基于 PoF 的光载无线通信(Radio over Fiber, RoF)和电磁干扰检测链路. RoF 链路实现了 2.4 GHz 频段的 16QAM-OFDM 宽带信号的 2 km 单模光纤传输; 电磁干扰远程采集与监测链路实现了对高铁 GSM-R(Global System for Mobile Communications-Railway)无线频段的带内干扰、邻带干扰和带外干扰的检测与识别等. 相关方案和系统在易燃易爆、强电磁干扰、强辐射等特殊场景具有重要应用价值.

关键词: 光纤传能; 电磁干扰检测; 光载无线通信; 微波光子技术; GSM-R

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)04-0804-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211079

Information and Power Over Fiber Scheme and Its Applications for Communications and Detections

LAN Zi-lin¹, ZOU Xi-hua¹, BAI Wen-lin¹, LI Pei-xuan¹, LI Yang¹, PAN Wei¹, YAN Lian-shan¹,
JIANG Ling-ming², CHEN Liang²

(1. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China;

2. China Railway Signal and Communication Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Based on the distinct advantages of large transmission bandwidth, compact energy transmission channel, and strong electromagnetic interference(EMI) immunity from optical fiber, a hybrid scheme is designed for simultaneous transmission of both information and energy over fiber. Remote energy distribution and high-frequency broadband signal acquisition & transmission are simultaneously implemented, by incorporating a comprehensive fiber distribution link and an analog microwave photonic frontend. Firstly, the power over fiber(PoF) link is designed and experimentally demonstrated. The high-power laser energy is transmitted via a 2 km multi-mode fiber link and then converted into electrical energy of hundreds milliwatts, providing power for the remote module or battery. Moreover, PoF-based radio over fiber(RoF) link and EMI detection link have been also developed and successfully verified. In the experiments, a wideband 16QAM-OFDM signal centered at 2.4 GHz is delivered through the RoF link with a 2 km single-mode fiber. Furthermore, the EMI remote monitoring link is used to perform the detection and identification of in-band, adjacent-band, and out-of-band EMIs for the GSM-R system along the high-speed railways. The proposed scheme and system will find significant applications in specific scenarios, such as inflammable and explosive conditions, strong EMI, and strong radiation.

Key words: power over fiber; electromagnetic interference detection; radio over fiber; microwave photonics; GSM-R

1 引言

当前,随着 5G/6G 通信、物联网等技术^[1,2]的迅速发

展,小型化、密集化的微基站和感知前端被大规模部署以提供大容量宽带业务、泛在感知和互联能力^[3,4]. 然

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2022-02-21; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 国家自然科学基金(No.61922069, No.62001401, No.61901397); 四川省科技计划项目(No.2020YJ0014); 中央高校基本科研业务费项目(No.2682021ZTPY103, No.2682021CX045)

而,海量微基站和感知前端给其部署成本和能耗带来了极大压力.光载信息能量同传技术为新型微微基站和感知前端的部署提供了一种新的有效解决方案^[5],具有链路简单无源、维护方便、抗恶劣环境等优势.

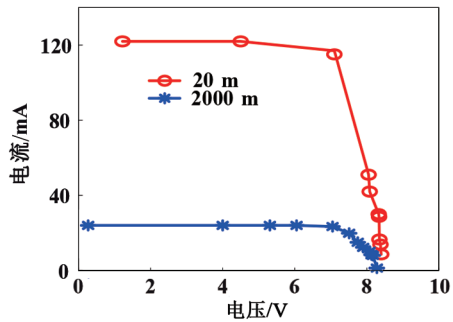
光载信息能量同传技术利用不同类型激光器分别产生宽带信号光和高功率能量激光,并通过单根光纤从中心站远距离传送到基站.其中,信号光通过光电探测器转换为待传信息;能量光通过光伏或光电探测转换为电能,为终端有源器件提供能源.1978年美国贝尔实验室搭建了基于光纤传能(Power over Fiber, PoF)技术的原理样机,为远端的声音报警系统供电^[6].随后,该实验室通过PoF技术实现了基站和远端单元之间语音信号的双向传输^[7],但传输能量和通信速率都比较低.2003年,Tetsuya团队^[8]利用PoF系统通过基站发送了2.4 GHz带宽的无线信号,实现了通信速率的提升.2008年,Wake团队^[9]通过基站部署的大功率激光器为远端单元供电,实现了基于IEEE 802.11g标准的64-QAM OFDM宽带信号传输,而且,该PoF系统转换的电功率被调节成不同电压为多个终端供电.2012年,Lethien团队^[10]将多终端供电的概念扩展到能量自主的微微小区远端天线单元的光纤无线电(Radio over Fiber, RoF)系统,功率信号、射频信号和数字信号被组合在一根多模光纤中,实现了100 m多模光纤传输及5 m无线信号覆盖.此后,日本的Matsuura团队长期致力于大功率长距离PoF系统的设计与改进.2015年,该团队提出了使用双包层光纤(Double-Cladding Fiber, DCF)的60 W光纤功率馈电^[11],用于带有光功率远程天线单元的光纤无线电系统,该系统的光纤传输距离为300 m,在接收端能够提供10 W的电能.而且,该团队使用DCF进行功率信号和数字信号的传输^[12]:DCF单模内核用于数字信号的上行链路和下行链路的同时传输,DCF多模内包层用于对远程无线单元(Remote Access Unit, RAU)进行光功率传输,实现了DCF上的双向RoF传输,光载传能功率为400 mW.2018年,该团队通过偏移发射技术^[13]和中心发射技术^[14]改善了多模光纤的模式色散,使用多模光纤实现了4 km长度的光功率馈电^[15].2019年,该团队创新性提出了使用双包层光纤的150 W光纤功率馈电系统^[16],实现了光载1 km传输的7.08 W电能传送,是目前为止最大的功率距离乘积.另外,2018年,Umezawa团队^[17]设计并制造了通过多芯光纤进行光载信息能量同传方案测试,RoF系统中实现了92 GHz频段的12 Gbps数据传输速率.上述方案都是通过多芯光纤、双包层光纤和多模光纤来实现光纤的信能共传.然而,2021年Al-Zubaidi等人^[18]使用单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)也同样实现了光纤的信能共传,实验演示了经过10 km的SMF链路传输后可为

光伏电池提供870 mW的光功率.

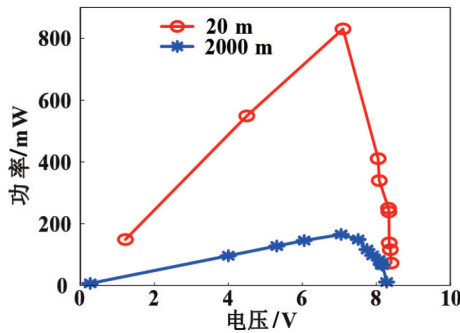
本文设计并实验验证了一种基于光纤一体化分布式链路的光载信息能量同传方案,利用直调型微波光子模拟收发前端,同步实现了低成本的能量远程配送与高频宽带信号的采集传输.首先,设计了长距离传输的PoF子链路,实现了165 mW功率的2 km多模光纤长度的能量传送.在此基础上,设计并实验演示了基于PoF系统的RoF和电磁干扰检测子链路.在RoF子链路中,完成了2.4 GHz载频、1 GHz带宽的16QAM-OFDM信号的2 km单模光纤传输;在电磁干扰检测子链路中,验证了对高铁GSM-R(Global System for Mobile Communications-Railway)通信系统内的电磁信号的远程采集与检测,并实现了对带内、邻带和带外等多种干扰信号的高精度检测和识别.

2 光载信息能量同传总体方案设计

光载信息能量同传总体方案设计如图1所示.在中心站,布置多组模拟微波光子前端模块,该微波光子前端由直调激光器(Directly Modulated Lasers, DML)、光电探测器(PhotoDetector, PD)和光环行器组成,分别完成下行链路的电光转换与上行链路的光电转换.每个微波光子前端模块发射不同波长的信息光载波,通过波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM)复用至一根光纤进行远距离传输.另外,由多个高功率激光器构成了集中式光纤馈电装置,且利用锥形光纤耦合技术进行激光能量耦合.这里DML与高功率激光器(High-Power Laser Diode, HPLD)的工作光波段分别为1 550 nm和980 nm.然后,信息光载波和激光能量信号通过 $N \times 1$ 锥形光纤束耦合器将传输能量光(红色)的多模光纤(MultiMode Fiber, MMF)和传输信息光(蓝色)的SMF进行耦合至一体化DCF中.该DCF是由单模光纤内芯和多模光纤内包层组成,两者分离且独立完成高功率能量光和信号光的传输^[12].接着,通过DCF链路远距离传输至远端 N 个分布式节点的微波光子前端.在远端节点处,首先通过可调光耦合器灵活分配每一个节点的远端微波光子前端所需要的光功率.配置智能化能量反馈系统,根据每一个节点的信息量大小和所需能耗的大小,配置节点的能量占比.然后,在不同的节点处通过光插分复用器(Optical Add Drop Multiplexer, OADM)来选择对应波长的信息传输信道,利用 $1 \times N$ 锥形光纤束分束器分离信息光与能量光.光伏激光能量转换器(Photovoltaic Power Converter, PPC)将大功率能量光转换成远端微波光子前端中DML和PD所需的电能.DML将天线接收的电磁信号调制到光载波上,通过光环行器和回传链路发送至中心站,构成上行通信链路;PD将来自中心站的信息光信号恢复为电信



(a) I-V 特性曲线

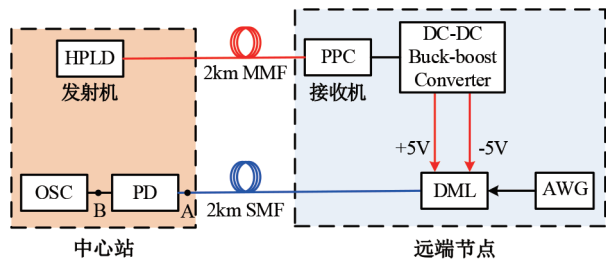


(b) P-V 特性曲线

图3 20 m和2 km传输距离下PoF系统的能量转换特性

表1 PoF能量转换效率测试结果

输出光功率/ mW	传输距离/m	输出电功率/ mW	能量转换效率/%
1000	20	304	30.4
1000	2000	64	6.4
3000	20	827.2	27.6
3000	2000	165	5.5



(OSC:示波器,AWG:任意波形发生器)

图4 基于PoF的大宽带信号传输方案

通过2 km多模光纤传输至远端,DC-DC降压模块将PPC的输出电压转换为 ± 5 V,从而为远端节点的DML供电.实验中使用的DML(KG-DML-15-18G-10-SM-FA)的额定功率为110 mW,根据表1可知PoF系统在2 km多模光纤传输长度的最大输出电功率为165 mW,该PoF系统仅可支持单个DML的信息传输,因此通过点对点的实验测试验证PoF系统的RoF传输.

RoF链路中,利用任意波形产生器生成2.4 GHz载频、1 GHz带宽的16QAM-OFDM矢量信号,通过DML调制至光载波上.然后,通过2 km单模光纤传输至中心站后,利用PD完成光电转换恢复传输的电矢量信号.采用采样率为40 GSa/s的实时示波器完成数字采集并结合数字信号处理算法对16QAM-OFDM矢量信号进行解调.

首先,分析RoF链路中B点处的电信号频谱.图5给出了背靠背和2 km传输后16QAM-OFDM的信号频谱,由图可知基于光载信息和能量共传2 km后信噪比仍可达到24 dB.

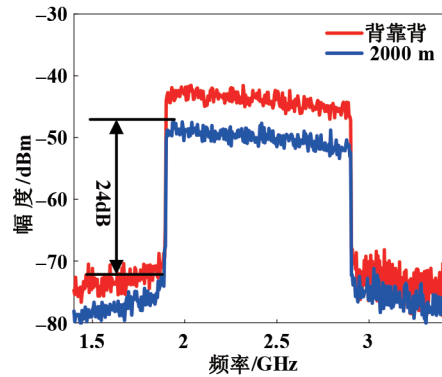


图5 PoF-RoF链路中背靠背和2 km单模光纤传输后16QAM-OFDM信号频谱图

然后,对基于PoF的RoF链路中宽带信号的传输性能进行分析.2 km信息能量共传距离下,系统的误码率曲线和星座图如图6所示.分别取输入光功率为-3 dBm、-6 dBm和-9 dBm时的星座图进行对比.随着PD输入光功率减小,BER增大,星座图模糊,系统传输数据性能相应变差;当PD输入光功率大于-4.1 dBm时,RoF系统解调信号的BER达到前向纠错门限 3.8×10^{-3} .

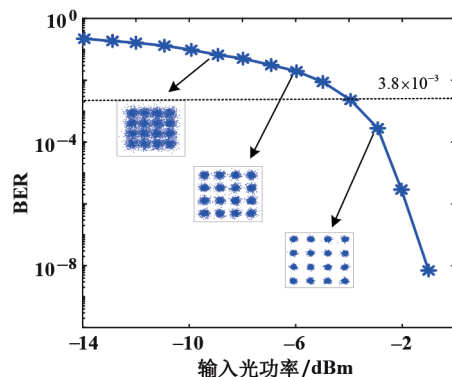


图6 PoF-RoF链路中传输距离为2 km时BER曲线及星座图

4.2 基于光载信息能量同传的高铁电磁干扰检测

GSM-R系统是我国及欧盟各国铁路通信专用的数字移动通信系统,一旦受到电磁干扰或电磁攻击,支撑高铁无线车地通信的GSM-R系统可能会被干扰或中

断,轻则导致延误、堵塞,重则导致交通事故^[22].因此,针对铁路无线通信系统进行宽带电磁干扰检测极为重要.目前,铁路管理部门主要通过来巡检列车定时对高铁 GSM-R 通信系统的电磁干扰进行检测,然后通过“五步干扰清除法”来清除高铁沿线的干扰源^[23,24].然而,这种方法主要针对静态干扰源,无法实时地监测和处理铁路沿线的电磁干扰源,尤其难以应对实际铁路环境中的一些突发干扰.对此,国内的一些高铁线路实施了 GSM-R 网格化监测系统(如武广高铁),但覆盖频段有限且成本高昂,不利于进一步的推广应用^[25,26].本文作者在前期工作中,提出了一种基于微波光子学的铁路电磁干扰检测方法,通过光纤链路传输电磁信号,可以远距离实时地监测铁路沿线的电磁干扰^[27].并且,本文提出的光载信息能量同传的方式可通过电磁不敏感的光纤传输电能,为远端收发设备提供或储备能量.它能够在高电压、高磁场、高辐射等极端场景下正常工作,这对于频繁暴露在高压列车牵引供电等环境下的高铁 GSM-R 通信系统以及电磁干扰监测系统的不间断运行具有重要意义.在此基础上,利用该光载信息能量同传系统,可实现高铁 GSM-R 通信以及电磁干扰监测.

基于光载信息能量同传的高铁电磁干扰检测方案如图 7 所示,其基本结构与光载信能同传方案相同,PoF 系统为远端 DML 供电.在电磁干扰检测应用中,将远端微波光子前端模块分布式布置于高铁沿线轨旁监测节点,用于高铁沿线电磁信号的采集与接收.实验中,通过矢量信号源设置 GSM-R 专用的 GMSK 调制格式信号(中心频率设置为 930 MHz,符号速率为 270.83 Kb/s)为工作频点.同时,通过微波源产生 3 种不同频率(930 MHz,930.2 MHz 和 932 MHz)的正弦单音信号作为电磁干扰源,分别模拟 GSM-R 系统受到的带内干扰、邻带干扰和带外干扰.采集的电磁信号通过 2 km RoF 链路传输至中心站,通过信号分析仪观测接收信号的频谱图、星座图和眼图,进而分析 GSM-R 系统所受到的电磁干扰类型.

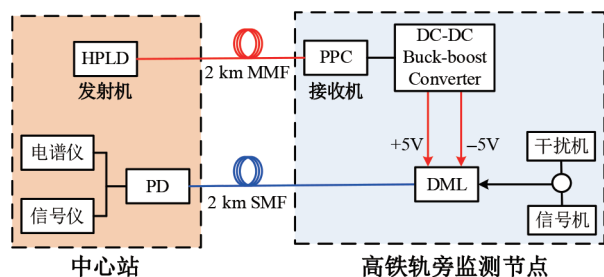


图7 基于光载信息能量同传的高铁电磁干扰检测方案图

在带内干扰、邻带干扰和带外干扰情形下,GSM-R 信号的频谱图、星座图及眼图如图 8 所示.无干扰时,频谱图中无异常频点,星座图集中,眼图清晰,信号质量好;受到带内干扰时,工作频点峰值功率略高于无干

扰情形,星座图分散,眼图模糊,信号质量差;受到邻带干扰时,工作频点附近出现相邻频率为 930.2 MHz 的异常信号,星座图分散,眼图模糊,信号质量差;受到带外干扰时,在 932 MHz 频点处出现异常信号,星座图集中、眼图清晰,信号质量好.

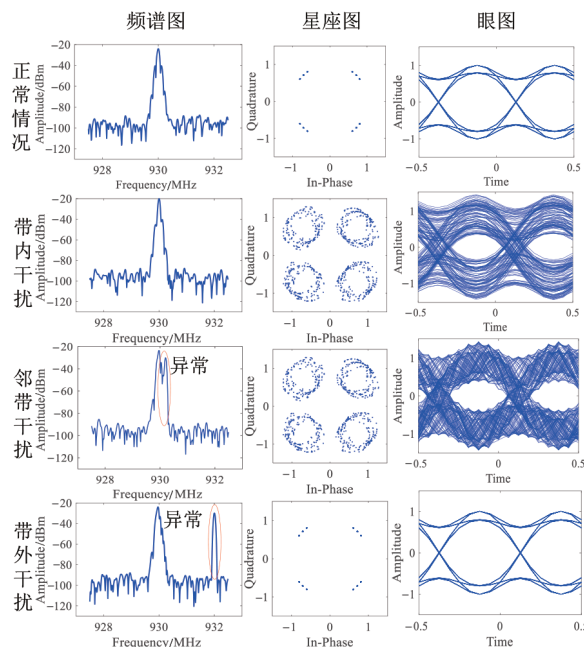


图8 不同干扰下 GSM-R 铁路无线通信专网的电磁信号的频谱图、星座图及眼图对比

因此,该方案可以通过频域、时域有效识别 GSM-R 通信网络中的多种干扰类型,而且对隐秘性强、影响大的带内干扰仍可以精准识别,从而为高铁通信干扰预警与干扰清除提供依据.该光载信息能量同传的高铁电磁干扰检测方案将有助于推动广域、长距离覆盖的高铁沿线电磁干扰检测应用.

5 结论

本文设计并实验验证了一种光载信息能量同传方案,基于光纤一体化分布式系统实现了长距离多节点的无源光网络系统构建,利用集中式光纤馈电装置和微波光子前端同步实现了高频宽带模拟信号与高功率激光能量的传输.在实验中,首先对 PoF 方案的整体性能进行测试,在 2 km 多模光纤传输距离下实现了 165 mW 电能供应.在此基础上,实现了 RoF 和电磁干扰检测,RoF 传输方案中完成了 2.4 GHz 载频、1 GHz 带宽的 16QAM-OFDM 矢量信号的 2 km 单模光纤传输;在电磁干扰检测方案中,通过频域和时域同时对高铁 GSM-R 无线通信系统内的带内、邻带和带外干扰进行高精度检测与识别.因此,本文提出的光纤分布式一体化的光载信息能量同传方案,可以为强电磁干扰、强辐射等的特殊场景中

的通信探测提供极具应用价值的解决方案。

参考文献

- [1] WANG C X, HAIDER F, GAO X Q, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 122-130.
- [2] AGIWAL M, ROY A, SAXENA N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1617-1655.
- [3] YAO J P. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- [4] MARTI J, CAPMANY J. Microwave photonics and radio-over-fiber research[J]. IEEE Microwave Magazine, 2009, 10(4): 96-105.
- [5] 杨海林, 刘丽娟, 彭迪, 等. 光纤信能共传技术研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1100001.
YANG H L, LIU L J, PENG D, et al. Research progress of power-over-fiber technique applied to radio-over-fiber systems[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1100001. (in Chinese)
- [6] DELOACH B C, MILLER R C, KAUFMAN S. Sound alerter powered over an optical fiber[J]. The Bell System Technical Journal, 1978, 57(9): 3309-3316.
- [7] MILLER R C, LAWRY R B. Optically powered speech communication over a fiber lightguide[J]. Bell System Technical Journal, 1979, 58(7): 1735-1741.
- [8] TETSUYA M, KATSUYASU K, NOBUO N, et al. Novel radio on fiber access eliminating external electric power supply at base station[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(S1): 611-612.
- [9] WAKE D, NKANSAH A, GOMES N J, et al. Optically powered remote units for radio-over-fiber systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(15): 2484-2491.
- [10] LETHIEN C, WAKE D, VERBEKE B, et al. Energy-autonomous picocell remote antenna unit for radio-over-fiber system using the multiservices concept[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(8): 649-651.
- [11] MATSUURA M, FURUGORI H, SATO J. 60 W power-over-fiber feed using double-clad fibers for radio-over-fiber systems with optically powered remote antenna units[J]. Optics Letters, 2015, 40(23): 5598-5601.
- [12] MATSUURA M, SATO J. Bidirectional radio-over-fiber systems using double-clad fibers for optically powered remote antenna units[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(1): 1-9.
- [13] RADDATZ L, WHITE I H, CUNNINGHAM D G, et al. An experimental and theoretical study of the offset launch technique for the enhancement of the bandwidth of multimode fiber links[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(3): 324-331.
- [14] SIM D H, TAKUSHIMA Y, CHUNG Y C. High-speed multimode fiber transmission by using mode-field matched center-launching technique[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(8): 1018-1026.
- [15] KUBOKI H, MATSUURA M. Optically powered radio-over-fiber system based on center- and offset-launching techniques using a conventional multimode fiber[J]. Optics Letters, 2018, 43(5): 1067-1070.
- [16] MATSUURA M, TAJIMA N, NOMOTO H, et al. 150-W power-over-fiber using double-clad fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 38(2): 401-408.
- [17] UMEZAWA T, DAT P T, KASHIMA K, et al. 100-GHz radio and power over fiber transmission through multi-core fiber using optical-to-radio converter[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 617-623.
- [18] AL-ZUBAIDI F M A, LÓPEZ CARDONA J D, MONTERO D S, et al. Optically powered radio-over-fiber systems in support of 5G cellular networks and IoT[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(13): 4262-4269.
- [19] 倪雨, 郝帅翔. 扰动观测法控制 MPPT 系统运动特性分析[J]. 电子学报, 2015, 43(7): 1388-1394.
NI Y, HAO S X. Motion characteristics analysis of P & Q control MPPT system[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(7): 1388-1394. (in Chinese)
- [20] 宁勇, 戴瑜兴, 王镇道, 等. 不同 MPPT 架构光伏系统发电效率的比较研究[J]. 电子学报, 2016, 44(9): 2134-2140.
NING Y, DAI Y X, WANG Z D, et al. A comparative study of central and grouped and distributed MPPT architectures for power generation efficiency of photovoltaic system[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(9): 2134-2140. (in Chinese)
- [21] 刘宿城, 汤运泽, 刘晓东, 等. 不同负载条件下光伏接口 MPPT 变换器的小信号建模及实验验证[J]. 电子学报, 2019, 47(2): 454-461.
LIU S C, TANG Y Z, LIU X D, et al. Small-signal modeling and experimental verification of PV-interfacing MPPT converter under different load conditions[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(2): 454-461. (in Chinese)
- [22] 魏波, 虞凯, 段永奇. 中低速磁浮对高铁 GSM-R 通信系统的电磁干扰影响研究[J]. 铁道通信信号, 2015, 51(7): 48-52.
WEI B, YU K, DUAN Y Q. Electromagnetic interference

- influence of low & middle speed maglev train on high-speed railway GSM-R communication system[J]. Railway Signalling & Communication, 2015, 51(7): 48-52. (in Chinese)
- [23] ZHAO L J, CHEN X, DING J W. Interference clearance process of GSM-R network in China[C]//2010 2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering. Kyoto: IEEE, 2010: 424-428.
- [24] 赵武元. GSM-R 移动通信系统干扰分析及查找[J]. 铁道通信信号, 2009, 45(12): 55-57.
- [25] 常晓军. 武广高铁湖南段 GSM-R 电磁环境保护性监测系统研究与实现[D]. 成都: 西南交通大学, 2017: 53-64.
- CHANG X J. Research and Design of GSM-R Electromagnetic Environment Monitoring System[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017: 53-64. (in Chinese)
- [26] 湖南省无线电管理委员会办公室. 武广高铁(湖南段) GSM-R 频率网格化实时监测系统固定监测小站(基本型及频率扩展型)、系统集成与数据处理中心软件采购项目招标、中标通告[Z]. 长沙: 中国采招网, 2014.
- [27] 白文林, 邹喜华, 蒋灵明, 等. 面向铁路电磁干扰检测的光子学技术集成系统与现场应用[J]. 铁道学报, 2021, 43(10): 60-68.
- BAI W L, ZOU X H, JIANG L M, et al. Photonics-enabled integrated system and field applications for electromagnetic interference detection along in-service railways [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(10): 60-68. (in Chinese)

作者简介



兰子林 男, 1996 年出生, 湖南岳阳人. 现为西南交通大学信息科学与技术学院硕士研究生. 主要研究方向为光纤传能及微波光子学技术.

E-mail: 2284640582@qq.com



邹喜华(通讯作者) 男, 1981 年出生, 湖南衡阳人. 西南交通大学信息科学与技术学院副院长、教授、博士生导师, 国际光学工程学会会士(SPIE Fellow), 德国洪堡学者, 国家优秀青年基金获得者, 全国优秀科技工作者. 主要研究方向为微波光子学、集成光电子、光通信与信号处理等. 先后主持国家自然科学基金重点/面上项目、国家重点研发计划课题等 10 余项; 以第一发明人获授权发明专利 13 项、PCT 国际专利 1 项. 先后荣获教育部自然科学二等奖、教育部霍英东青年教师奖、四川省青年科技奖等.

E-mail: zouxihua@swjtu.edu.cn