

高铁无线光通信技术研究现状

陈习锋^{1,2}, 丁举鹏^{1,2*}, 梅弘业^{1,2}, 刘雯雯^{1,2}, 马洪兵³, 赖惠成^{1,2}

(1. 新疆大学 信息科学与工程学院, 乌鲁木齐 830046;

2. 新疆大学 信号检测与处理新疆维吾尔自治区重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3. 清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘要:针对传统高铁通信系统中用户通信频繁中断和轨道安全等问题,介绍了无线光通信技术在高铁通信中的应用,主要围绕高铁无线光小区切换、光跟踪、光轨道监测和光通信实验这4种技术,分析了高铁无线光通信信道模型,包括湍流、雨和雾天信道模型。最后展望了高铁无线光通信技术的研究方向。

关键词:高铁通信;无线光通信;无线光信道

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2021)01-0005-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.01.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research status of high-speed rail free space optical communication technology

CHEN Xifeng^{1,2}, DING Jupeng^{1,2*}, MEI Hongye^{1,2}, LIU Wenwen^{1,2}, MA Hongbing³, LAI Huicheng^{1,2}

(1. School of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Signal Detection and Processing in Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Aiming at the problems of frequent interruption of user communication and track safety in traditional high-speed railway communication system, this paper introduces the application of free space optical communication technology in high-speed rail communication. It mainly focuses on the four technologies of high-speed rail free space optical cell switching, optical tracking and pointing, optical track monitoring and optical communication experiment, and analyzes the channel models of high-speed rail free space optical communication, including turbulence, rain and fog. Finally, the research direction of high-speed rail free space optical communication technology is also discussed.

Key words: high-speed rail communication; free space optical communication; free space optical channel

0 引言

随着5G时代到来,通信用户要求不断提高,人们对高铁通信的需求不断提升,传统高铁通信系统已不能满足旅客用户需求。

高铁通信因地势多变、多用户和覆盖区域广等问

收稿日期:2020-05-19。

基金项目:国家自然科学基金(62061043)资助;新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2019D01C020)资助;新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJ2020G063)资助。

作者简介:陈习锋(1996—),男,江西赣州人,硕士生,现就读于新疆大学信息科学与工程学院电子与通信工程专业,主要研究方向为铁路无线、矿井无线通信和无线光通信。

***通信作者:**丁举鹏(E-mail: jupeng7778@163.com)。



题,导致射频信号通信不理想,无线光通信成为其填补技术之一。高铁的高速移动导致了用户通信频繁中断,而且高铁运行环境复杂、多变,因此高铁无线光通信需要考虑切换、光束跟踪和轨道安全监测等问题。无线光虽然能够提供高速通信,但湍流、雨和雾等信道介质对无线光影响严重,建立高铁无线光信道模型尤为重要。本文综述高铁无线光通信技术难点、无线光信道模型以及无线光技术在高铁通信中的应用。

1 高铁无线光通信技术

1.1 高铁无线光小区切换技术

高铁无线光小区切换过程是指高铁与源基站断开链接而与目标基站建立通信链接的过程,一般发生在相邻通信小区,可利用无线光视距传播特性实现无

陈习锋,丁举鹏,梅弘业,等:高铁无线光通信技术研究现状

缝切换。根据无线光视距传播特点,在高铁通信中采用双无线光收发器方案来解决因频繁切换过程带来系统性能差的问题^[1]。基站和高铁都安装2个无线光收发器,基站收发器光束分别指向高铁车头和车尾的收发器,采用多输入/多输出(MIMO)实现通信和切换过程。高铁可在相邻基站覆盖重叠区域完成切换过程,且高速移动过程中始终有一基站与高铁保持通信。高铁切换过程中需要时刻检测新基站信号,触发切换来完成切换过程。

为避免用户通信经历切换过程,文献[2]提出了一种旋转收发器切换方案。基站采用旋转收发器进行光束对准和跟瞄,旋转装置的型号为NM23AD-T4的步进电机,旋转速度为140 rad/s。列车车顶同样安装相同旋转收发器,并在相同位置安装一个固定收发器。旋转收发器跟瞄基站与列车的通信光束,固定收发器探测下一基站光束信号。固定收发器在小区间重叠区域与下一基站建立通信后,旋转收发器断开基站链接,检测下一基站光束并建立通信,完成切换过程。

通常,如果基站通信小区覆盖区域太小或布置不合理,在同距离下会导致切换次数大大增加。因此,优化高铁基站覆盖区域,能够有效减少切换次数。基于波分复用(WDM)技术的双波长高铁无线光覆盖方法,用于优化基站覆盖范围同时减少切换次数^[3]。其工作原理为:轨道沿线相邻基站发射2个不同波长光束,因光束的指向性特点,可通过调整光束入射角和发射角得到覆盖重叠区域大小,并且该区域大小可在高铁正常行驶速度时完成切换过程。2个不同波长光束交替覆盖,使得切换触发过程简单化,切换次数也相应减少。

1.2 高铁无线光跟瞄技术

高铁无线光通信时,由于无线光视距传播,列车遇到振动、湍流和雨等情况会使得光束偏移。偏移严重情况下,会导致通信性能降低甚至通信中断。高速移动中,无线光光束是否对准为关键因素,光束跟瞄技术是现有高铁无线光通信技术难点之一。

列车与基站通信中主要用无线光收发器实现光束跟瞄^[4],该收发器包含激光器(LD)、雪崩光电二极管(APD)、红外线发光二极管(LED)、广角四象限光电二极管(QPD)、望远QPD、镜子控制器和控制中心等。LD和APD分别发射和接收承载数据通信的激光信号,LED和2个QPD负责分别发送接收信标信号和跟瞄信号。广角QPD对下一基站的信标信号进行探测,而望远QPD进行信号跟瞄。控制中心根据广角四象限

QPD输出4路信号,调整镜子控制器实现光束跟瞄。

上述方案中,QPD不能探测出偏移点到光束最强中心点间距离且切换时间太长。文献[5]提出了一种高速图像传感器无线光收发器方案,该方案利用高速图像传感器替代广角QPD,并在镜子控制器中安装近距离传感器用来测量镜子和基座间距离,实现控制中心对镜子控制检测反馈。高速图像传感器不仅有广角QPD功能,还能对光束偏离中心点距离测距,并通过镜子控制器调整镜子和基座间的距离来实现光束跟瞄,从而使光束一直位于传感器中心点。

1.3 高铁无线光轨道监测技术

高铁正常行驶情况下,车体和轨道间发生振动是导致光束偏移的主要原因。轨道的不规律振动令跟瞄技术更加复杂,同时也增加了高铁安全运行危险系数,因此监测轨道信息非常重要。

传统高铁轨道检测方式有动态检测和静态检测2种。动态检测方式采用轨检小车对轨道进行等速动态荷载检测;静态检测方式采用轨检小车对轨道静态几何状态进行检测维护^[6]。此类检测方式时间周期长、投入成本高和效率低,而且无法在客运列车运行时间实现轨道检测。于是,基于全球导航卫星系统/惯性导航系统多传感器的高铁轨道测量系统被提出^[7],虽然该系统可利用轨检小车测量轨道内部和外部的几何参数,但无法通过实时轨道状态监测来应对突发山洪、山体滑坡等安全事故,且在隧道、无人区等地区的卫星信号覆盖弱,实现定位和传送测量数据较困难。

为解决以上问题,无线光测量被应用于高铁轨道测量,无线光技术利用视距传播特性监测振动幅度,由LD和位置灵敏探测器(PSD)构成^[8],LD安装在轨道旁,而PSD安装在轨道的轨腰上,通过PSD对光束位置偏移实现轨道振动幅度的测量。上述方案虽然能够实时检测轨道信息,但LD能量消耗高且长距离传输中使用的硬件设备成本高。LED节能高效,传输容量满足振动信息量,且可借助轨道旁的现有设施。因此,LED光束可用于轨道振动信息传输,并可根据监控网络层级划分实现长距离轨道监控。一个分层异构无线光网络被应于轨道监测,该网络主要包括光传感器、路灯和分析站,它们可利用可见光和自由空间光(FSO)实现轨道信息监测^[9]。监测过程如下:光传感器包含LED和光电二极管(PD),LED发射光束被铁轨反射到PD上,由此计算出铁轨振动幅度;考虑到轨道监测全部覆盖,光传感器在轨道两边呈“之”字型排布;光传感器节点可通过可见光收发器将轨道信息加

载到可见光光束上,加装可见光装置的路灯接收可见光光束;路灯间通过FSO光束实现轨道信息转发,轨道交汇处的分析站接收FSO光束;分析站将轨道信息分析并传递至远端控制中心,实现高铁轨道信息监测。表1列出了上述方案中无线光轨道监测信息参数。

表1 高铁无线光轨道监测信息

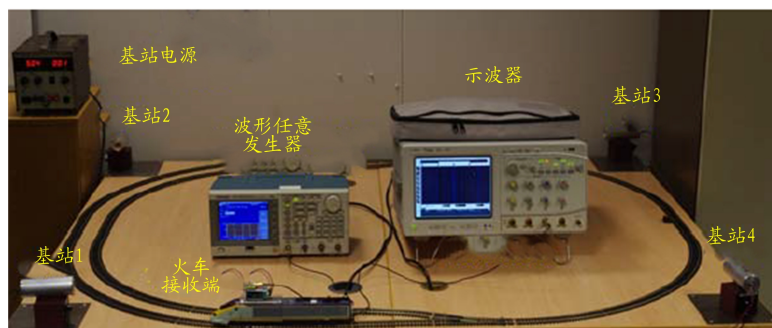
轨道长度 /m	光源	接收器	车速 $/(km \cdot h^{-1})$	车长 /m	振动 幅度	振动 频率	文献
29000	LD	PSD	220	158.9	± 4 mm	30 Hz	[6]
4000	LED	PD	100	100	1 cm	20 Hz	[7]
1000	LD	PD	100	100	± 4 mm	—	[8]

光传感器需考虑续航时长,上述方案只适用轨道旁有路灯或交通灯的区域,在路灯损坏情况下无法监测该区域轨道信息。文献[9]提出了一个车载无线光传感器监测振动系统,优化能源受限问题和实现实时监测轨道信息。该系统将激光器和光电探测器安装在车底,激光器发射的光束经轨道反射到探测器接收,光电探测器接收反射光束,并可根据反射光束在探测器的接收位置与激光器光源间距离,计算出轨道振动幅度。监测的轨道信息经车载光纤网络发送到车载FSO发射器,与轨道旁的FSO基站实现通信,FSO基站再将信息发送到远程控制中心实现轨道信息监测。

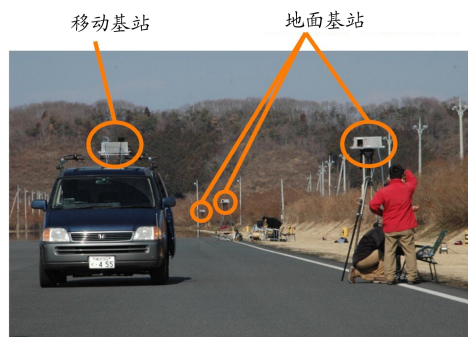
1.4 高铁无线光通信实验

高铁在轨道上高速行驶,无线光通信系统性能还需要考虑实际场景中多普勒频移、环境干扰等因素。因此,高铁无线光通信实验与仿真结果对比非常有必要。PAUDEL R等人^[10]考虑到实验成本和安全因素,实验验证了列车无线通信性能。该实验利用LED和PD作为光源、接收器,在环状轨道测量通信误码率低至 10^{-16} 。实验中,电信号调制方式为开关键控(OOK)方式,LED光源和驱动电路易于实现信号调制。无论是LED或LD作为光源,驱动电路等调制电路均围绕OOK方式来设计。OOK方式的带宽效率高、易于检测且成本低,使得整个实验容易实现。为验证室外场景,文献[11]利用车辆当作列车与路边基站进行无线光通信。同时,采用高速图像传感器收发器测量通信系统切换时间。日本电机工程师^[12]铁道技术研究所采用速度为120~130 km/h的火车进行无线光通信实验。该实验将无线光基站安放在轨道旁,移动基站在火车车头处接收无线光信号。

HARUYAMA S等人^[13]建立了基于270 km/h的动车的无线光通信实验,对行驶过程中通信速率和所需切换时间进行测量。图1为高铁无线光通信实验装置和不同列车通信实验图。表2给出了高铁无线光通信实验相关数据。这些实验中无论在室内或室外,对无



(a) 高铁无线光通信实验装置



(b) 模拟小车



(c) 传统火车



(d) 地面基站



(e) 动车

图1 高铁无线光通信实验装置图和不同列车通信实验^[10-13]

陈习锋,丁举鹏,梅弘业,等:高铁无线光通信技术研究现状

线光信道仅考虑了单一天气情况(如晴朗天气),没有涉及复杂天气对无线光传输带来的影响。

表 2 高铁无线光实验

文献	光源	接收器	车速 $/(km \cdot h^{-1})$	基站间 距离	切换 时间	速率
[10]	LED	PD	—	155 cm	—	25 Mb/s
[11]	LD	APD	90	100 m	21 ms	1 Gb/s
[12]	LD	APD	130	100 m	120 ms	500~700 Mb/s
[13]	LD	APD	270	100 m	124 ms	566 Mb/s

2 高铁无线光信道模型

上述高铁无线光通信和监测技术皆需要考虑信道因素对无线光的影响。无线光通信因场景和用户数量不同,其对应通信信道模型也不同,如图 2 所示。

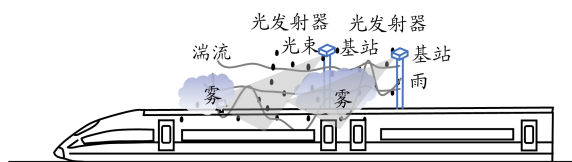


图 2 湍流、雨、雾情况下的高铁无线光通信模型

2.1 湍流信道

大气湍流会引起光束信号发生闪烁、光束展宽和漂移,使得无线光传输距离减少和误码率增大,现有研究优化方式有空间分集、波前校正、中继辅助、自适应光学和孔径平均等。铁路无线光通信中,列车高速行驶引起环境快速变化导致温度和压强不规律变化。GAO J 等人^[14]研究了基于伽马-伽马湍流信道模型的铁路无线光通信链路性能,该模型归一化光束宽度在湍流信道下的链路距离大于 100 m 时其平均性能不发生变化。

2.2 雨天信道

在自然天气中,雨和湍流经常同时出现而影响无线光通信性能。高铁运行时,不可避免遭遇降雨天气,不仅会衰减无线光信号强度,而且信号质量会遭受损害,因此评估铁路无线光雨天信道性能至关重要。为评估平均误码率和中断概率,ZHANG Y 等人^[15]研究了基于双逆高斯模型铁路无线光通信链路性能。实验结果表明:在相同轨道长度下,随着轨道弯曲半径增加,误码率和中断概率也有所增加;无线光通信性能受降雨和湍流的影响很大,暴雨对无线光信号的稳定性和正确性产生干扰影响。

2.3 雾信道

雾天情况常出现在雨后、清晨和铁路沿线山区的地方,雾粒子的尺寸大小与传输光波长相等导致信号衰减严重。铁路无线光在雾天通信时,无线光链路出现指向错误,无线光通信的接收功率、信噪比、误码率和链路余量等受到影响。江南大学团队^[16]设计了基于雾与霾信道建立铁路无线光通信模型,研究了湍流强度、光束覆盖轨道程度以及雾对链路余量和信噪比的影响。实验结果表明:湍流强度和轨道弯曲程度增加或大气能见度降低时,链路余量和信噪比随之降低。

3 高铁无线光通信发展趋势及展望

无线光通信具有带宽高、频谱资源丰富和保密性高等特性,适用于高铁众多用户和高铁专用控制通信。

高铁运营过程中,用户在通信小区存在频繁切换,切换质量会影响通信质量,甚至造成通信中断。传统射频基站通信小区切换区域位于基站覆盖边缘区域,该区域电磁干扰严重且信号强度低。无线光基站通常安装在轨道旁,可通过无线光束高指向性优化衰减问题,但无线光信号通信需考虑天气干扰因素。因此,高铁通信小区切换可采用混合射频/无线光切换方案完成小区切换。

5G 技术中,多天线阵列能为大量用户提供高质量通信,该方式可借鉴到高铁无线光通信中,采用分集或 MIMO 方式优化光束偏移问题。基站可发射多个光束对准列车接收端,当外界因素导致光束偏移时,可通过接收功率对比方式选择最强光束进行通信。高铁移动中的光束跟瞄问题,可借助高铁接触网设施实现光束短距离跟瞄或者采用向下覆盖方式代替跟瞄方式实现实时通信,并且室内的非朗伯光束的非圆周对称和具有指向性^[17-19],同样可以借鉴到高铁光束跟瞄技术中,减少光束偏移影响。

目前,高铁无线光轨道监测只优先监测轨道振动信息,无法像传统轨道检测方式那样既可检测轨道振动信息,也可检测轨距、轨向、压力和温度等信息。为实时监测上述轨道信息,同时优化监测网络成本和传感器能效问题,可在轨道安装多个传感器收集轨道信息,轨道旁无线光发射器发射不携带信息光束,此光束可为轨道接收端的多个传感器供能,同时利用角反射器功能,将轨道信息加载至反射光束,轨道旁无线光收发器接收反射光束实现轨道信息监测。高铁无线光通信技术应用不仅可为高铁和用户的高速率通信服务,还为轨道监测网络提供较好的改良方案。

在智能交通系统中,高铁用户购票、闸机身份验证和高铁卫星定位等均可通过无线光通信技术进行优化。

4 结束语

随着无线光通信技术和高铁交通快速发展,高铁无线光通信必然成为国内外重要研究方向。高铁无线光通信可以实现基站到高铁车顶接收器通信链路,也可以实现车厢内车载网络接入点到用户通信。但是,高铁无线光切换、跟瞄和轨道监控技术依旧是难点,同时还需要考虑无线光室内外信道对通信质量的影响。

参考文献:

- [1] FAN Q, ANSARI N, FENG J, et al. Reducing the number of FSO base stations with dual transceivers for next-generation ground-to-train communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 11143–11153.
- [2] FAN Q, TAHERI M, ANSARI N, et al. Reducing the impact of handovers in ground-to-train free space optical communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(2): 1292–1301.
- [3] FATHI-KAZEROONI S, KAYMAK Y, ROJAS-CESSA R, et al. Optimal positioning of ground base stations in free-space optical communications for high-speed trains[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(6): 1940–1949.
- [4] HIDEKI U, HARUYAMA S, SHOGENJI T, et al. High data rate ground-to-train free-space optical communication system [J]. Optical Engineering, 2012, 51(3): 1–9.
- [5] MORI K, TERADA M, YAMAGUCHI D, et al. Fast handover mechanism for high data rate ground-to-train free-space optical communication transceiver for internet streaming applications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, E99-8(5): 1206–1215.
- [6] 黎奇,白征东,陈波波,等. GNNSS/INS 多传感器组合高速铁路轨道测量系统[J]. 测绘学报, 2020, 49(5): 569–579.
- [7] PINTO N, RIBEIRO C A, GABRIEL J, et al. Dynamic monitoring of railway track displacement using an optical system [J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2015, 229(3): 280–290.
- [8] KRICHEN D, ABDALLAH W, BOUDRIGA N. An optical wireless network for railways condition monitoring[C]//2016 22nd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), August 25–27, 2016, Yogyakarta, Indonesia. Piscataway: IEEE, 2016: 153–160.
- [9] ABDALLAH W, BOUDRIGA N. The design of an optical wireless sensor network based train vibration monitoring system[C]//2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 2–6, 2017, Girona, Spain. Piscataway: IEEE, 2017: 1–5.
- [10] PAUDEL R, TANG X, GHASSEMLOOY Z. Laboratory demonstration of FSO ground-to-train communications with multiple base stations [C]//2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), July 20–22, 2016, Prague, Czech Republic. Piscataway: IEEE, 2016: 1–6.
- [11] MORI K, TERADA M, NAKAMURA K, et al. Fast handover mechanism for high data rate ground-to-train free-space optical communication system[C]//2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), December 8–12, 2014, Austin, USA. Piscataway: IEEE, 2014: 499–504.
- [12] KAZUKI, NAKAMURA, SHINGO, et al. Development of broadband telecommunications system for railways using laser technology [J]. Electrical Engineering, 2015, 132(5): 666–674.
- [13] HARUYAMA S, URABE H, SHOGENJI T, et al. New ground-to-train high-speed free-space optical communication system with fast handover mechanism [C]//2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 6–10, 2011, Los Angeles, USA, Piscataway: IEEE, 2011: 1–3.
- [14] GAO J, ZHANG Y, CHENG M. Average capacity of ground-to-train wireless optical communication links in the non-Kolmogorov and gamma-gamma distribution turbulence with pointing errors[J]. Optics Communications, 2016, 358: 147–153.
- [15] ZHANG Y, YANG Y Q, HU B B, et al. Average BER and outage probability of the ground-to-train OWC link in turbulence with rain[J]. Optics Communications, 2017, 68(3): 85–90.
- [16] YANG Y, GAO J, ZHANG Y. Effects of fog-haze random media on the short-range optical wireless communications link[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 138: 8–14.
- [17] DING J P, CHIH-LIN I, ZHANG H, et al. Cells planning of VLC networks using non-circular symmetric optical beam [C]//2019 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 20–24, 2019, Shanghai, China. Piscataway: IEEE, 2019: 1–6.
- [18] DING J P, XU Z Y, LAJOS H. Accuracy of the point-source model of a Multi-LED Array in high-speed visible light communication channel characterization[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(4): 1–14.
- [19] DING J P, CHIH-LIN I, CHEN X F, et al. Asymmetrical emission beams based visible light communication access points design [C]//2019 28th Wireless and Optical Communications Conference, May 9–10, 2019, Beijing, China. Piscataway: IEEE, 2019: 1–5.