

## 全双工光载无线隧道通信系统

王侯军, 闫连山, 叶佳, 潘炜, 邹喜华, 罗斌, 李沛轩

(西南交通大学 信息光子与通信研究中心, 四川 成都 611756)

**摘要:** 鉴于长距离隧道内复杂的无线传输环境, 传统通信技术不能满足旅客高质量的通信需求, 提出了一种基于波分复用无源光网络的光载无线(RoF)分布式隧道通信系统。采用波分复用技术实现不同业务在光域的物理隔离, 协同分布式天线技术, 在隧道内部提供高频无线接入, 提升系统带宽的同时解决了隧道内部信号急剧衰减的问题。通过实验搭建了全双工的光载无线试验平台, 实现了用光学的方法产生和传输载频为 24 GHz 的 16/64QAM 矢量信号, 并且通过测量上下行链路的 EVM 值验证了方案的可行性。

**关键词:** 光通信; 隧道通信; 光载无线; 波分复用无源光网络; 分布式天线系统

**中图分类号:** TP929.11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0422001

## Full-duplex radio over fiber system for tunnel communication

Wang Houjun, Yan Lianshan, Ye Jia, Pan Wei, Zou Xihua, Luo Bin, Li Peixuan

(Center for Information Photonics and Communications, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** Due to the poor wireless transmission in the long tunnels, conventional communication technique cannot meet the high-quality communication demands of the passengers. A ROF (Radio over Fiber) distributed tunnel communication system employing WDM-PON (Wavelength Division Multiplex-Passive Optical Network) was proposed. By combining the WDM and DAS (Distributed Antenna System) techniques, a wireless access network can be achieved to provide different wireless services through optical channels. Moreover, the transmission bandwidth can be increased by using this proposed scheme which can also suppress the signal degradation under the scenario of tunnel transmission. A full-duplex ROF platform was experimentally demonstrated. The optical generation and transmission of electrical 16/64QAM vector signals at 24 GHz were achieved. And the feasibility of the scheme was verified by measuring the EVM value of the uplink and downlink.

**Key words:** optical communication; tunnel communication; radio over fiber; WDM-PON; DAS

收稿日期: 2017-11-05; 修订日期: 2017-12-03

基金项目: 国家 863 计划(2015AA016903); 国家自然科学基金(61405165, 61335005, 61325023)

作者简介: 王侯军(1991-), 男, 硕士生, 主要从事微波光子和光载无线方面的研究。Email: 891841598@qq.com

导师简介: 闫连山(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事微波光子学、高速光通信、光纤传感与检测等方面的研究。

Email: lsyan@home.swjtu.edu.cn

## 0 引言

随着我国铁路建设里程的日益增加,长距离隧道日益增多。据不完全统计,现有隧道里程已超过 10 000 km,并且由于国内地理环境的限制,其中不乏很多超过千米以上的长距离隧道。然而由于隧道内部恶劣的无线传输环境,无线电波在隧道中传播时具有隧道效应,信号传播是墙壁反射与直射的结果,其中直射为主要分量<sup>[1]</sup>。此外,铁路隧道中火车经过时,由于车身的填充,隧道中剩余的空间非常狭小,会对信号的传播产生较大的影响,因此传统的无线通信技术不能满足旅客高质量地通信需求。同时由于众多诸如在线游戏、在线高清视频、在线办公和视频通信等新兴高带宽业务的兴起,对现有的通信技术提出了极大的挑战。这些新兴业务在当前长距离隧道中均无法实现,严重影响了乘客的旅途体验。因此在长距离隧道中稳定低延时高带宽的通信需求显得尤为迫切。

参考文献[2]采用多种方法研究了矿井隧道中中频电缆通信的衰减特性。参考文献[3]研究了一种实用于隧道通信的高增益天线。参考文献[4]通过仿真研究了地铁无线通信系统中,编码技术的去噪性能等。基于上述研究,隧道通信系统均是建立在传统的无线通信基础上,已不能满足现有长距离铁路隧道中高带宽、低延时的通信需求。和传统通信技术相比,光载无线技术将光纤通信技术和无线通信技术的优势结合起来,兼具大容量、高带宽和高速移动性等性能<sup>[5-10]</sup>。参考文献[11-14]中提出了多种 RoF

传输结构,实现了高速率,大带宽的全双工光载无线传输。但是由于隧道内信号衰减较大,即使采用高增益的天线,也无法在长距离隧道中实现单天线覆盖,需要多天线的协同作用,来实现隧道内信号的全覆盖。因此将 RoF 技术与分布式天线系统相结合应用于隧道通信系统中,是一种潜在的解决方案。

此方案中充分利用了光载无线技术的优势,同时考虑到隧道中特殊的地理环境,提出了基于波分复用无源光网络的分布式光载无线隧道通信系统,并且采用光学的方法产生了高频电矢量信号,在电域和光域同时提升信号的带宽,从而实现隧道内信号的高质量覆盖。

## 1 基本原理

文中提出隧道通信系统的结构示意图如图 1 所示。该分布式系统充分利用了光载无线(RoF)技术大容量、高带宽和高速移动性等优势,同时结合了波分复用技术。全网核心的交换路由等设备均放置于中心站(CU)共享,极大地简化了系统结构,降低了系统成本。通过各路不同的业务分别调制到光纤上,进行光域承载。利用光频分复用技术,不同的无线业务在光域进行物理隔离,即通过光调制器调到不同的光波长( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ )上。然后通过波分复用技术合成一路光信号,经光纤传输之后,在接收端通过解复用设备实现光信号的分离,进而传输到远端天线单元(RAU)。基于隧道的长度及隧道内信号的衰减决定 RAU 部署的位置及数量。在 RAU,通过光电探测器实现信号的光电转换,产生高频的电矢量信号,之

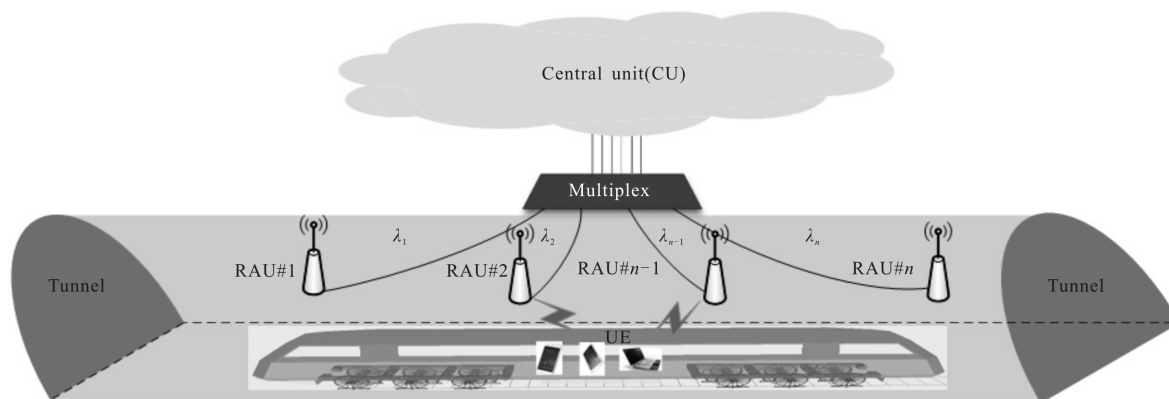


图 1 波分复用光载无线分布式隧道通信系统

Fig.1 WDM-RoF distributed system for tunnel communication

后通过电域放大来维持系统的功率均衡。放大后的信号经天线发射到隧道中，从而实现隧道内高频无线信号的覆盖。

用户端(UE)接收到信号之后首先对信号进行下变频之后处理。对于上行链路,由用户端发射的射频信号,经过无线链路传输过后,由隧道内部署的相应双工 RAU 天线接收,接收后的信号,同理通过不同的光调制模块,调制到不同波长的光信号上,通过波分复用器合成一路后经过光纤传送到达 CU,在 CU 解复用实现信号分离后,分别通过光电探测器实现光电转换,在电域实现信号的解调。

此方案中,在 CU 中采用载波抑制调制方案,使用 FBG 实现两个边带之间的分离。透射光载波作为下行链路的光源承载信号,反射的光信号和调制之后的透射信号合路传输到 RAU。经过光分路器后,其中一路信号经由光滤波器分离出未调制的光边带

信号,将其当作上行链路的光源承载上行信号,从而实现了光载波的再利用,降低了系统成本。经光电转换后的上行信号经由波分复用技术合路之后,通过光纤传输到达 CU。在 CU 中通过光解复用技术实现信号的分离之后,进行信号的解调。从而实现信号的全双工传输,通过测量上下行矢量信号传输前后的 EVM 来验证系统传输性能。进而实现了提升隧道内通信带宽,减少覆盖盲区,提升旅途体验的目的。

## 2 实验方案及结果分析

该分布式光载无线系统的实验原理图如图 2 所示。利用波分复用技术构建无源光网络,在 CU 有多个发送端,多路不同发送端的信号通过波分复用合为一路线传输。传输之后由解复用技术实现信号的分离。其中单路的试验方案,如下所述。发送端的激光器发出的光载波波长为 1 553.82 nm,通过调节马赫

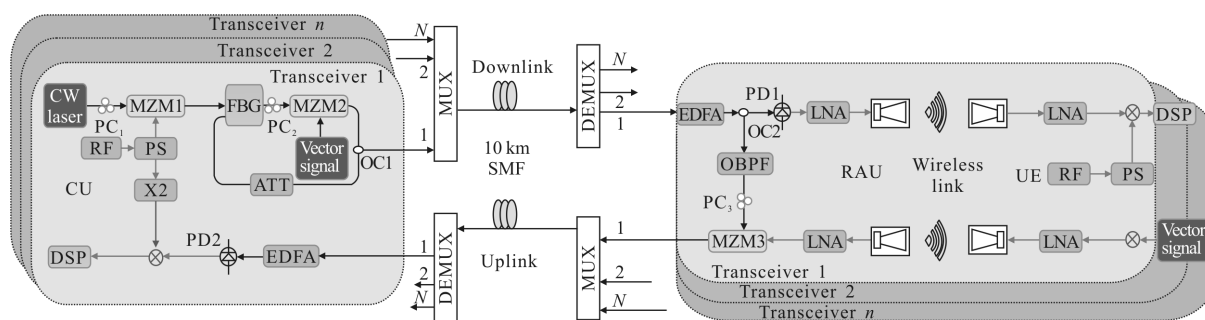


图 2 光载无线隧道通信系统实验结构图

Fig.2 Experiment setup for RoF tunnel communication

曾德尔调制器(MZM)的偏压,加载 12 GHz 的射频信号,实现载波抑制双边带调制,光谱图如图 3(a)所示。调制之后产生的上下边带,通过光纤光栅(FBG)分离,+1 阶边带透射,-1 阶边带反射。透射过的边带经过功率放大之后,作为下行链路的光载波通过马赫曾德尔调制器调制速率为 50 MBaud/s 的 16QAM/64QAM 下行矢量信号,之后通过光合路器与-1 阶边带合路传输。然后经由 10 km 的光纤传输后经由 EDFA 放大,其中一路传输后的光谱如图 3(b)所示。传输后的光信号通过光分路器分为两路,其中一路经过光带通滤波器滤出未调制的-1 阶边带信号,用作上行链路的光载波。另外一路信号通过两个边带在光电探测器处拍频产生了高频矢量信号,实现了信号的光电转换,之后通过电放大器,再经由喇

叭天线传送到自由空间。图 4(a)所示为产生的发送到自由空间的射频信号的频谱,在无线链路的接收端,通过对应的喇叭天线接收到下行信号后,首先用混频的方式下变频,下变频 DSP 处理之后的中频信号的频谱如图 4(b)所示。

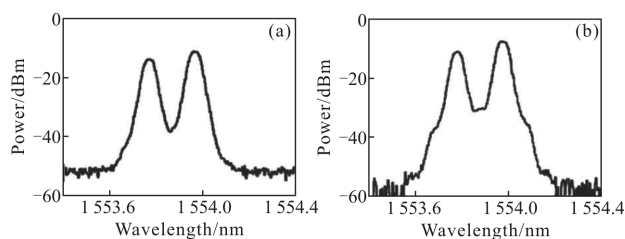


图 3 下行链路(a)MZM1 之后的光谱图和(b)光纤传输后的光谱  
Fig.3 Optical spectra of downlink (a) after MZM1 and (b) after fiber transmission

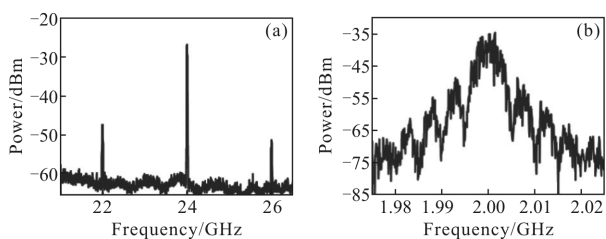


图 4 (a)下行 PD1 拍频产生的射频信号频谱和(b)接收到的下变频后的矢量信号频谱

Fig.4 (a) Spectrum of RF signal after PD1 frequency beating and (b) spectrum of received vector signal after down-conversion

上行链路与之类似,用户端发送的上行信号,在电域通过宽带低噪声放大器实现功率放大后,通过无线链路传输到系统中。试验中通过两组极化方式不同的喇叭天线,来模拟实际系统中的全双工天线。 $-1$  阶边带作为上行链路的光载波,通过 MZM 调制上行的 16QAM 和 64QAM 矢量信号,之后经过光纤传输到 CU,通过 PD 进行了光电转换,混频下变频处理。24 G 的本振信号由下行链路 12 G 的本振信号倍频得到。从而实现了信号的全双工传输。

在实验中,通过测量矢量信号的误差向量幅度值(Error Vector Magnitude, EVM)来验证方案的准确性。通过调节入射到 RAU 端 PD 的光功率,来测量传输系统的 EVM 值进而反应出系统的灵敏度。图 5(a)、

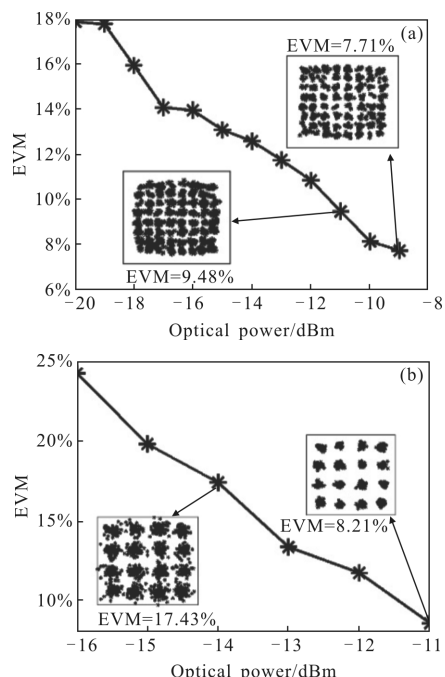


图 5 下行链路的传输性能值随入射 PD 的功率的变化

Fig.5 Downlink transmission performance versus the variation of incident optical power of PD

(b)分别为下行链路经 10 km 光纤传输 64QAM 与 16QAM 信号时,EVM 值相对于入射 PD 光功率的变化。图 6(a)、(b)分别为上行链路经 10 km 光纤传输 64QAM 与 16QAM 信号时,EVM 值相对于入射 PD 光功率的变化。图 5(a)、(b) 和图 6(a)、(b)中的插图分别为上下行传输 16/64QAM 矢量信号时,在不同 EVM 值时所对应的星座图。

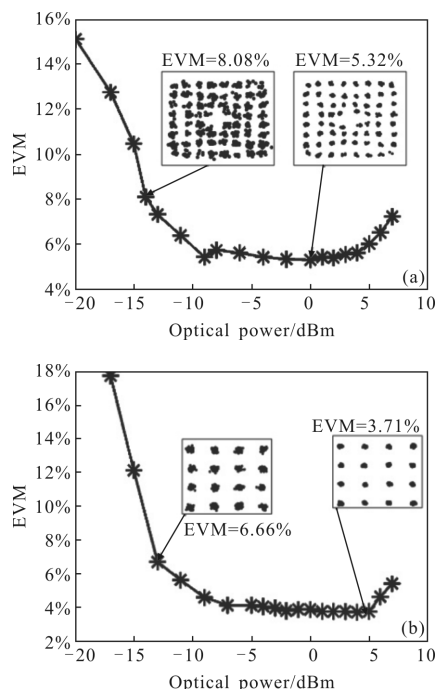


图 6 上行链路的传输性能值随入射 PD 的功率的变化

Fig.6 Uplink transmission performance versus the variation of incident optical power of PD

上述的上下行链路的 EVM 测试结果图给出了不同接收功率下所对应的 EVM 值,以及在对应 EVM 值处的星座图。可以看出,功率控制对系统传输性能的影响,当控制好系统的功率均衡时,可以得到很好的传输结果。上行链路性能相对于下行链路较好的原因,是由于下行 FBG 和上行的光滤波器的滤波性能的差异引起的。

### 3 结论

文中提出了一种基于光载无线的分布式天线系统,结合波分复用技术来提升隧道内的通信质量。通过光学的方法产生了高频的矢量信号,采用分布式的方案,合理地部署远端天线单元,来实现隧道内信号的高质量覆盖。通过在实验室中搭建全双工的光

载无线实验平台,测量所得上下行链路的 EVM 值均较小,从而模拟验证了方案的准确性,实现了信号的全双工传输。受限于实验中所用光电器件的带宽影响,该方案中的无线接入频段仅为 24 GHz,在实验条件许可的情况下,很容易拓展到 60 GHz 乃至更高的频段。同时,在后续的研究中可以采用更高阶的矢量 QAM 调制,结合多载波的 OFDM 信号,作为上下行链路传输的无线业务,可以更加切实地模拟 LTE 信号在铁路隧道中的传输。

#### 参考文献:

- [1] Rizzo C, Sicignano D, Riazuelo L, et al. Guaranteeing Communication for Robotic Intervention in Long Tunnel Scenarios[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2016: 691-703.
- [2] Brandão Faria J A. A multimodal approach to the analysis of the attenuation properties of MF communication systems in mine tunnels [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2014, 28(13): 1581-1595.
- [3] Liu W, Zhang Z, Feng Z. Bidirectional rectangular ring antenna for coal mine/tunnel communication [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2013, 55(6): 1412-1416.
- [4] Kwadjane J M, Vrigneau B, Langlais C, et al. Performance evaluation of max-dmin precoding in impulsive noise for train-to-wayside communications in subway tunnels [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2014, 2014(1): 1-12.
- [5] Zhang Jianming, Lou Shuqin, Zeng Lulu. A scheme of full duplex radio over fiber link model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1599-1604. (in Chinese)
- [6] Zhang Chan, Ning Tigang, Li Jing, et al. Single-sideband modulated radio-over-fiber system based on phase-shifted superstructure fiber Bragg grating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0222001. (in Chinese)
- [7] Li X, Yu J, Xiao J, et al. Fiber-wireless-fiber link for 128-Gb/s PDM-16QAM signal transmission W-band [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(19): 1948-1951.
- [8] Gowda A S, Dhaini A R, Kazovsky L G, et al. Towards green optical/wireless in-building networks: Radio-over-fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3545-3556.
- [9] Zhu M, Zhang L, Wang J, et al. Radio-over-fiber access architecture for integrated broadband wireless services [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(23): 3614-3620.
- [10] Morant M, Prat J, Llorente R. Radio-over-fiber optical polarization-multiplexed networks for 3GPP wireless carrier-aggregated MIMO provision [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3721-3727.
- [11] Novak D, Waterhouse R B, Nirmalathas A, et al. Radio-over-fiber technologies for emerging wireless systems [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2016, 52(1): 1-11.
- [12] Pang X, Caballero A, Dogadaev A, et al. 100 Gbit/s hybrid optical fiber-wireless link in the W-band (75-110 GHz)[J]. *Optics Express*, 2011, 19(25): 24944-24949.
- [13] Dat P T, Kanno A, Yamamoto N, et al. High-capacity and high-spectral-efficiency seamless fiber-wireless system for high-speed trains [C]//Optical Fiber Communication Conference, 2016: Tu3B. 5.
- [14] Dat P T, Kanno A, Yamamoto N, et al. Low-latency fiber-millimeter-wave system for future mobile fronthauling [C]// SPIE, 2016: 97720D.