

Gb/s 车地全光通信技术

夏浔,胡宗福

(同济大学 电子与信息工程学院,上海 201804)

摘要:针对现有车地通信技术传输速率低、无线覆盖差和切换困难的缺点,提出了 Gb/s 车地全光通信技术方案。该方案主要由轨道沿线光纤链路、光分配网和车地无线光通信 3 个部分组成。光纤链路采用双线光纤热备份技术,交替布置通信区间,实现区间快速无缝切换;光分配网利用列控信息选择光信号的传输支路,实现天线伴随覆盖;车地无线光通信采用自由空间光通信(FSO)技术,大大提高了无线传输速率。仿真结果表明:数据传输速率为 2.5Gb/s 时,车地全光通信链路接收光功率在 10~60 μ W 之间。

关键词:车地全光通信;热备份技术;天线伴随覆盖;区间无缝切换

中图分类号:TN915.02 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)01-0015-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.01.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Gb/s optical communication technology for train-to-ground

XIA Xun, HU Zongfu

(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: With respect to prevalent drawbacks in the current train-to-ground communication technologies, such as low transmission rate, poor wireless coverage and difficult handover, this paper proposes a Gb/s all-optical communication technology for train-to-ground. The solution is mainly composed of three parts: the optical fiber link along the track, the optical delivery network and the train-to-ground wireless optical communication. The optical fiber link adopts the double-line optical fiber warm backup technology, alternately arranges the communication section, realizes the fast and seamlessly handover of section. The optical delivery network uses the train information to select the transmission branch of the signal, and achieves accompanying coverage of antenna. The train-to-ground wireless optical communication adopts free-space optical communication (FSO) technology, which greatly improves the wireless transmission rate. Simulation results show that when the transmission rate is 2.5Gb/s, and the received power of the all-optical communication link is between 10~60 μ W.

Key words: all-optical communication for train-to-ground; warm backup technology; accompanying coverage of antenna; seamless handover of section

0 引言

近年来,轨道交通行业迅速发展,为了满足用户对高传输速率的需求,高速移动车地通信技术的发展迫在眉睫。相比于铁路综合数字移动通信系统(GSM-R)存在带宽小、传输速率低、无线覆盖差和高速行驶下频繁越区切换等缺点^[1-3],近年来提出的铁路专用宽带移动通信(LTE-R)系统,不仅在理论上能够提供下

行 100Mb/s、上行 50Mb/s 的峰值速率,还优化了基站切换算法,已经被应用到了地铁通信系统的非安全相关的业务中,但该系统没有从实质上解决车地通信技术中存在的问题^[4,5]。

为了实现更高的传输速率,提高通信性能,可将全光通信网络应用到车地通信中。全光通信网络与光纤网络的主要区别在于信号传输无电中继,通信中信号传输格式是透明的。另外,全光通信可以通过动态波长配置器件实现波长的选择和路由^[6]。相较于现有的 GSM-R 技术及其下一代 LTE-R 技术,车地全光通信技术系统拥有更广阔的发展前景。因此,本文提出 Gb/s 车地全光通信技术方案。

收稿日期:2018-08-11。

作者简介:夏浔(1994-),女,汉族,安徽六安人,硕士研究生,就读于同济大学电子与信息工程学院,主要从事无线通信、光学通信方面的研究工作。本科就读于中南大学,曾多次获得中南大学校级奖学金三等奖。2018年9月参加“华为杯”数学建模比赛,获得数学建模比赛三等奖。



1 车地全光通信技术设计

车地全光通信技术方案为每辆在线列车指配唯一信道波长与其对应, 并采用动态波长配置技术, 实现在光分配网中传输列车对应的信道波长。光纤链路使用波分复用(WDM)光纤, 传输多辆在线列车对应的多个信道波长。光节点(ON)实现波长选择, 主要器件为可重构光分插复用器(ROADM)^[7,8], 在光分配网中传输ON区间内在线列车对应的信道波长。光分配网主要包含的光学器件为光分路器(OBD)和掺铒光纤放大器(EDFA), 利用列控信息选择分路中需要打开的EDFA, 通过对EDFA的开/关状态控制, 达到对天线开/关状态控制的目的, 实现天线伴随列车覆盖和信号的无缝连接。

1.1 光纤链路

轨道沿线光纤链路示意图如图1所示。下行信号从光网络中心节点发出, 光网络中心节点为列车分配波长 λ_i , 在ON进行上/下行波长的合并/分离, ON通过ROADM获得列车对应信道波长 λ_i , 并在光分配网中传输该列车对应的信道波长 λ_i 。相邻ON位于同一条轨道线路的不同光纤, 两条光纤传输光信号完全相同, 并且相邻ON的通信区间之间有很小的区域重叠, 通过双线光纤热备份技术, 利用列控信息实时切换ON, 保证列车在ON区间切换时的通信不中断。

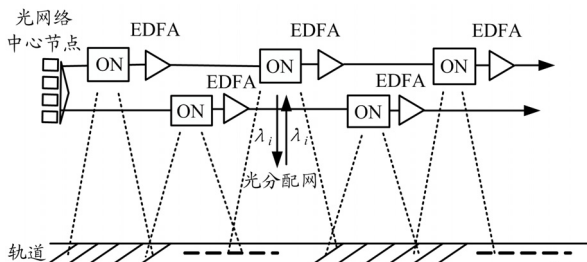


图1 轨道沿线光纤链路示意图

光纤链路通过ROADM进行动态波长配置, 图1中光纤链路上传输的WDM信号从光网络中心节点发出, 经过ROADM分离后下行传输到光分配网, 再传输到列车; 列车信号波长上行传输到光分配网, 经过ROADM合并到WDM信号中, 随之传输到下一个光网络中心节点, 光网络中心节点利用地下光纤网络保持相互之间的直接通信。

1.2 光分配网

光分配网示意图如图2所示。光分配网主要由OBD和多个EDFA组成, 利用列车行驶信息, 控制轨道天线前置EDFA开/关, 进而选择信号的传输支路。波长为 λ_i 的光信号通过光分配网传输至与车载天线

相连的轨道天线, 经过空间信道传输至车载天线, 上行传输为下行传输逆过程。相邻轨道天线采用单网交织的冗余覆盖方案, 其通信区间有二分之一的区域重叠, 通过冗余方式保证通信安全。

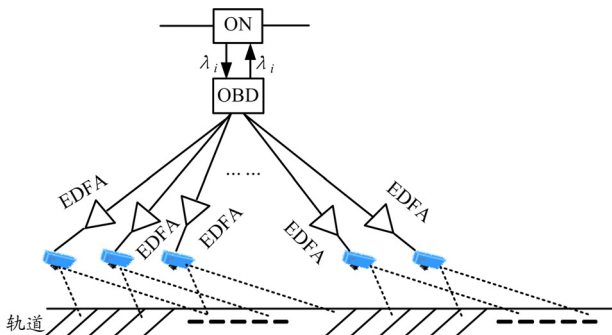


图2 光分配网示意图

当列车不在轨道天线的通信区间时, 为了节约能源, 天线前置EDFA关闭, 轨道天线接收到的下行光信号没有达到工作阈值, 天线关闭。当列车到达天线正下方时, 天线前置EDFA打开, 与车载天线建立通信连接; 当列车运动时, 轨道天线随之转动, 保持天线间对准。通过列控信息, 实现天线伴随覆盖。

1.3 车地无线光通信

车地全光通信链路的车地无线光通信示意图如图3所示。轨道天线与车载天线一对一连接, 多组收发天线同时传输光信号, 车载天线接收到光信号后, 对其进行光电转化处理, 通过列车车内通信网络传输给用户。从车载天线进入轨道天线通信区间开始连接成功, 直到车载天线离开其通信区间, 与该轨道天线的状态转换过程为休眠→工作→休眠。当车载天线与当前连接的轨道天线断开连接时, 该轨道天线间隔相邻的轨道天线与该车载天线建立连接。综上所述, 车载天线交替连接轨道天线, 当列车快速行驶时, 能够保持连续通信。为了保证多组收发天线之间的信号传输不会同时断开, 导致通信中断, 本文减小车载天线间的距离, 使车载天线间距离略小于轨道天线间重叠通信区间的长度。

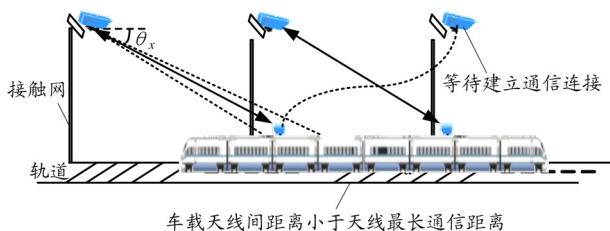


图3 车地无线光通信示意图

无论是 ON 区间的切换, 还是天线区间的切换, 车地无线光通信系统都能够实现无缝切换, 通信区间实时覆盖列车。轨道沿线光纤链路和光分配网主要实现了天线伴随覆盖和区间切换, 避免了由于频繁切换导致的传输中断问题。

2 车地全光通信链路参数

2.1 轨道天线转动角速度

在接收天线参数固定的情况下, 为了减小发射天线的发射功率, 提高系统的通信能力, 天线发射光束采用椭圆光束, 一个轨道天线对准一个车载天线, 随着车载天线的移动, 轨道天线也会随之转动, 达到对准和跟踪的要求。

图 3 中, 当车载天线进入轨道天线通信区间, 轨道天线对准车载天线, 并通过列控信息控制轨道天线, 使其跟随车载天线的运动而转动。假设转动的轨道天线与初始位置的夹角为 θ , 若列车在弯道处行驶, 会导致车载天线垂直轨道方向移动。为了保证车载天线不会偏离出轨道天线的对准范围, 轨道天线同时沿轨道方向和垂直轨道方向转动, 与初始位置的夹角分别为 θ_x 、 θ_y 。通过计算可以得到 θ_x 和 θ_y 为:

$$\theta_x = \arctan \left[\frac{2R \sin \frac{L}{2R} [\sin(\Lambda) + 25]}{2 + \left[2R \sin \frac{L}{2R} \times \sin(\Lambda) \right] + 50 \times P} \right] - \arctan \frac{50}{2 + 50 \times P} \quad (1)$$

$$\theta_y = \arctan \left[\frac{2R \sin \frac{L}{2R} \cos(\Lambda)}{\sqrt{\left(2R \sin \frac{L}{2R} \sin(\Lambda) + 50 \right)^2 + 4}} \right] \quad (2)$$

其中, $\Lambda = \frac{180 - \arctan \frac{L}{R}}{2} - \arctan \frac{100}{R} + \arctan \frac{L}{R}$, L 为收发天线建立连接后列车行驶距离, 单位为 m; R 为轨道的半径, 单位为 m; P 为坡度, 单位为千分比。

式(1)和式(2)中 L 和 R 都可以通过列车行车信息获得, 根据 L 和 R 计算出轨道天线与其初始位置的夹角分别为 θ_x 、 θ_y , 从而控制轨道天线转动, 实现对准和跟踪。

2.2 天线参数

自由空间光通信(FSO)的通信能力很大程度受到能见度的影响, 在可见度差的环境下, 通信距离会大大缩短, 甚至最长只能达到 50m。为了保证通信距离,

适当提高天线发射功率, 本文采用光束整形, 利用椭圆光斑减小光斑覆盖范围, 从而降低对发射功率的要求。当前天线发射功率的取值主要取决于当前收发天线间距离、大气衰减和接收天线的灵敏度。假设接收天线使用 PIN 二极管作为光检测器, 通过文献[9]中的公式计算得到接收天线灵敏度为 -26.7dBm, 即 $P_{\min} = 2.13 \mu W$ 。设轨道天线悬挂高度为 2m, 收发天线间最短距离为 50m, 最长距离为 250m, 且在轨道列车定位系统中, 允许存在 $\pm 10m$ 的定位误差, 可以得到天线参数如表 1 所示。

表 1 天线参数

参数	值	参数	值
DB	21dB	D_T	0.02m
$P_{\min}$	-26.7Bm	β_x	0.0167rad
D_R	0.2m	β_y	0.0044rad

表 1 中, DB 为接收天线动态范围, $P_{\min}$ 为接收天线灵敏度, D_R 为接收天线口径, D_T 为发射天线口径, β_x 为椭圆长轴光束发散角, β_y 为椭圆短轴光束发散角。

根据文献[10, 11]中空间光通信的功率计算公式, 可以得到天线发射功率为:

$$\frac{P_T}{P_R} = k_0^2 \exp \left(-l \times \frac{\alpha_p}{1000} \right) \times \int_{S_R} \exp \left(-\frac{2x^2}{w(x)^2} - \frac{2y^2}{w(y)^2} \right) dx dy \quad (3)$$

其中, P_R 是接收功率, P_T 是输出功率, α_p 为空间光通信的大气衰减系数, l 为收发天线间的距离, $l^2 = x^2 + y^2$, A_0 为 $z=0$ 时的中心光振幅, $k_0 = A_0 / w(z)$, $w(x)$ 、 $w(y)$ 是与传播轴线相交于 z 点的椭圆高斯光束等相位面上的椭圆光斑半长轴和半短轴。

3 仿真模型建立与结果

本文建立系统仿真模型, 分析误差来源和误差范围。轨道沿线光纤链路中主要使用的光学器件有 ROADM、OBD、EDFA 和光纤, 其参数如表 2 所示。

表 2 中, P_i 为光纤插入功率, α_L 为光纤传输损耗, α_{F128} 为 1×128 OBD 插入损耗, α_{F2} 为 1×2 OBD 插入损耗, α_{R1} 为 ROADM 直通损耗, α_{R2} 为 ROADM 上/下行损耗, G 为 EDFA 增益, F 为 EDFA 噪声系数。

3.1 仿真建模与误差分析

已知接收天线动态范围, 为了提高系统稳定性, 限

表2 光学器件参数

参数	值	参数	值
P_i	3dBm	α_{R1}	12dB
α_{R128}	23.7dB	α_{R2}	6dB
α_{R2}	3.5dB	G	11.7~36.9dB
α_L	0.22dB/km	F	5.5dB

制接收天线的最佳动态范围在理论动态范围的1/3~2/3之间;为了使天线接收功率在最佳动态范围内,天线前置可变增益 EDFA,增益系数随着大气衰减和收发天线间距离改变而变化。

天线前置放大器的增益系数为不变增益系数和可变增益系数之和,即 $G=G_0+G_N$, G_0 为不变增益系数, G_N 为可变增益系数。在站间距离与 ON 区间已知的情下,总衰减和总增益抵消后的等效增益为固定值 $G_S=2\text{dB}$,从而确定车地全光通信链路中 EDFA 的增益系数,并计算出 G_0 和 G_N ,得到发射天线功率 $P_T(\text{dBm})$:

$$G_N = \frac{7}{10000} l \times \alpha_p \quad (4)$$

$$P_T = P_i + 2 + G_N = 5 + G_N \quad (5)$$

系统主要误差来源于列车的位置误差,可以表示为 $\varepsilon=10 \times r$, r 为 $(-1,1)$ 随机数。误差 ε 会导致车载天线圆心偏离光斑中心,通过计算可以得到车载天线圆心与光斑中心的距离(m):

$$X = \frac{2}{l_e} \times \varepsilon = \frac{20 \times r}{l_e} \quad (6)$$

其中, l_e 为车载天线定位点 E 距离轨道天线间的距离。

轨道非直线时,会产生垂直轨道方向的位置误差,中国高铁正线最小曲率半径为 5500m,通过计算可以得到误差 S 所能导致的垂直轨道误差为 $\pm 3\text{mm}$ 。假设列车高度为 3.65m,震动频率要求在 10Hz 以上,通过计算可以得到垂直轨道方向的车载天线位置误差为 $Y=0.008 \times r$ 。

除位置误差外,步进电机引入跟踪误差,轨道天线的角度变化曲线实际上是梯形的。假设步进电机每步转动角度为 0.5mrad,精度为 3%~5%,通过计算可以得到轨道天线的对准角误差,为 0~0.525mrad,角度误差(rad)可以表示为 $\theta_e=0.000525 \times r$ 。将随机误差代入接收功率计算式,可得到天线接收功率(mW)为:

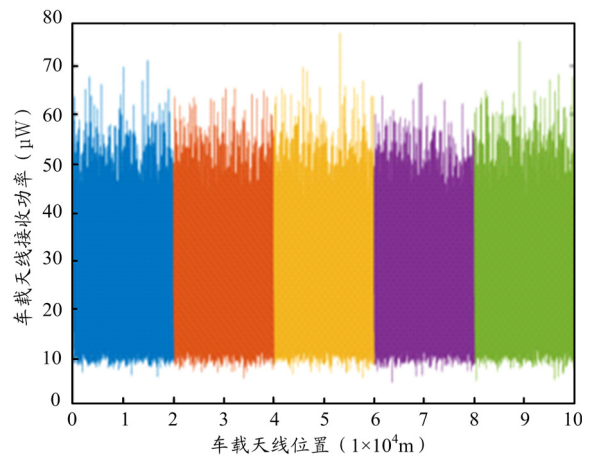
$$P_R = P_T k_0^2 \exp\left(-l \times \frac{\alpha_p}{1000}\right) \times \iint_{S_R} \exp\left(-\frac{2x^2}{w(x)^2} - \frac{2y^2}{w(y)^2}\right) dx dy \quad (7)$$

其中, k 为光学天线透过率, P_T 是天线发射功率(单位为 mW)。 S_R 为积分曲面,以车载天线理论位置的圆心点为原点,积分曲面的坐标值受到车载天线位置误差的影响,垂直轨道方向的积分范围 y 为 $(Y+l_e \theta_e - D_R/2, Y+l_e \theta_e + D_R/2)$,沿轨道方向的积分范围 x 为 $(X+l_e \theta_e - \sqrt{D_R^2 - y^2}, X+l_e \theta_e + \sqrt{D_R^2 - y^2})$ 。

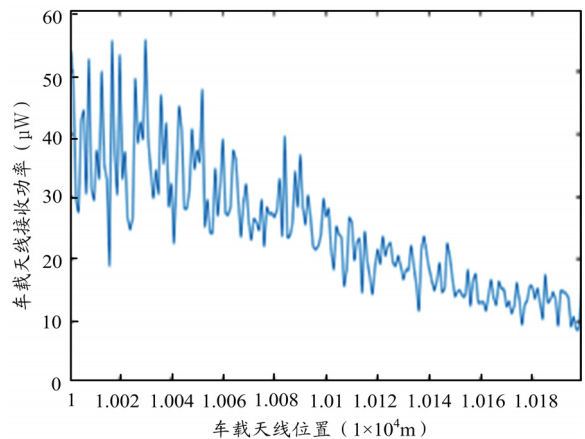
3.2 仿真结果

当两个火车站距离为 100km,考虑到系统的可靠性,假设通信环境恶劣,大气衰减系数取值为 100dB/km,车尾车载天线接收功率 P_R 随其位置的变化曲线如图 4 所示。暂取每个 ROADM 节点的覆盖长度为 20km,则在 100km 通信距离的系统中共有 5 个 ROADM 节点。

列车整个行驶过程中某一车载天线接收功率随位置变化曲线如图 4(a)所示。5 个不同颜色的区域分别



(a) 列车整个行驶过程中某一车载天线接收功率变化曲线



(b) 一个轨道天线覆盖区域中某一车载天线接收功率变化曲线

图4 车载天线接收功率随其位置变化曲线

代表不同 ROADM 的覆盖区域,每个ROADM 节点内的车载天线接收功率曲线基本相同,都在 $10\sim 60\mu\text{W}$ 之间。虽然受到误差影响,接收功率存在波动,但依然大大超过了光接收天线的灵敏度,同时远低于光接收天线的饱和功率。不考虑误差影响的情况下,图 4(a)中功率随位置的变化曲线可以看做是以 $0.02\times 10^4\text{m}$ 为周期的周期曲线,截取其中一段周期,如图 4(b)所示。可以看出车地无线光通信中车载天线接收功率主要受到收发天线距离的影响,距离越小,车载天线接收功率越大。另外当收发天线间距离较小时,车载天线接收功率受到位置误差的影响大,接收功率不稳定。

4 结束语

针对现有车地通信技术存在的缺点,本文提出了车地全光通信技术方案。利用全光通信带宽大、传输速率高的优点,实现吉比特数量级的传输速率,且不会与无线电信号相互干扰;在线列车与信道波长唯一对应的关系,也避免了其它列车信号的干扰。利用双线光纤热备份技术,实现区间快速无缝切换,通过列控信息选择列车对应信道波长的传输支路中 EDFA 的开/关状态,实现信号伴随列车覆盖。天线控制单元利用列控信息控制轨道天线随列车移动而转动,实时对准车载天线,通过减小天线光斑覆盖面积,降低通信链路功率要求,节约能源。仿真结果表明:在不考虑空间光噪声的情况下,通过调节 EDFA 增益,能够使接收功率处于天线最佳动态范围,保证通信链路的稳定性。车地全光通

信技术为高速列车的车地通信提供了吉比特每秒的传输速率和新的切换方案,是未来车地通信技术的主要研究方向。

参考文献:

- [1] TANG X, LONG C, YANG B, et al. A Seamless Fast Handover Scheme Based on Dual-Antenna in GSM-R Systems[J]. Energy Procedia, 2011(13): 4638–4644.
- [2] 张友兵,张波,唐涛. 列控数据传输与 GSM-R 越区切换发生碰撞的建模与分析[J]. 铁道学报, 2013, 35(5): 47–53.
- [3] 张霞,马连川,曹源,等. CTCS-3 级 GSM-R 车地通信数据丢失概率及其影响的研究[J]. 通信学报, 2014, 35(12): 203–209.
- [4] KIM J H, KIM S H, CHOI K H. A New RBC handover scheme for LTE-R system [J]. Journal of International Council on Electrical Engineering, 2014, 4(3): 245–250.
- [5] SUBHARTHI B, MICHAEL H, HAMID S. A Survey of Wireless Communication Technologies & Their Performance for High Speed Railways[J]. Journal of Transportation Technologies, 2016, 6(1): 15–29.
- [6] XU Shizhong, WANG S, LI Lemin. Routing and assignment of wavelength in DWDM optical transport networks[J]. Journal of China Institute of Communications, 2001, 22(4): 51–57.
- [7] 黄海清,李维民,杨种山,等. 下一代 ROADM 的结构与技术[J]. 光通信技术, 2013, 37(5): 41–43.
- [8] 陈勇. 全光通信网关键技术与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- [9] 邱昆. 光纤通信导论[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1995.
- [10] 胡森,刘晨曦,李齐良,等. 大功率空间椭圆光束整形和传输研究[J]. 光子学报, 2013, 42(10): 1163–1168.
- [11] 王佳. 光纤通信与空间光通信技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.

《光通信技术》加入“中国知网”网络首发

为融合互联网发展,促进作者与读者间的互动,进一步提升《光通信技术》的整体质量,从 2019 年第 1 期开始,本刊与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司(简称电子杂志社)签署《CAJ-N 网络首发学术期刊合作出版协议》,通过《中国学术期刊(网络版)》(CAJ-N)正式出版我刊网络版。凡经我刊审定录用的稿件(录用定稿)均将在我刊网络版上首发,论文作者可以从“中国知网”下载或打印论文和证书,作为正式发表的论文提交人事、科研管理等有关部门。

因此,后续的排版定稿、整期定稿网络版和印刷版中,不得修改论文题目、作者署名、作者单位以及学术内容,只允许修改少量文字或少量不影响研究结果和结论的数据。由于网络首发周期短,因此凡被录用的稿件不得撤稿。

《光通信技术》编辑部