

## 深空星间光通信 PDM 系统链路设计研究

王小瑞,徐宏,陈冬冬

(郑州轻工业大学 计算机与通信工程学院,郑州 450002)

**摘要:**为了提高深空星间光通信信道容量、数据传输速率和频谱利用率,对深空星间光通信链路进行了设计,搭建了深空星间光偏振复用(PDM)系统。结合激光通信的链路特性,对不同通信波长、不同传输速率下的 PDM 系统链路性能进行了仿真,结果表明:PDM 技术可有效提高数据传输速率,并且有利于深空光通信系统性能的改善。

**关键词:**深空通信;激光通信;链路设计

**中图分类号:**TN929.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)06-0035-04

**DOI:**10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.06.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on link design of deep space inter satellite optical communication PDM system

WANG Xiaorui, XU Hong, CHEN Dongdong

(School of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In order to improve the channel capacity, data transmission rate and spectrum efficiency of deep space inter satellite optical communication, this paper designs the deep space inter satellite optical communication link, builds the deep space inter satellite optical polarization multiplexing(PDM) system. Combined with the link characteristics of laser communication, the performance of PDM system link at different communication wavelengths and different transmission speed are simulated. The results show that the PDM technology can effectively improve the data transmission rate, and also helpful to improve the performance of deep space optical communication system.

**Key words:** deep space communication, laser communication, link design

## 0 引言

21 世纪是一个信息的时代,人类对信息容量的需求越来越高。但是,由于频段低和调制速率受限等问题,卫星微波通信不能满足现代社会的需求<sup>[1-4]</sup>。为了缓解这种情况,世界各国的人造卫星数量日益增加,卫星微波链路之间的串扰势必增加。另外,随着人类对太空的探索向纵深发展,建立适应深空环境的通信

链路来进行空间探测非常必要。基于此,深空光通信技术作为新一代的通信技术应运而生。

深空星间光通信是深空光通信中的一种,它是以激光为信息载体在深空信道中传输的点对点无线传输技术。与传统的卫星微波通信相比,激光的频率高且光束发散角小,具有传输速率高、通信容量大、抗干扰能力强和保密性好等优势。作为深空与地面通信链路的桥梁,深空星间光通信链路研究至关重要。另外,高码率的调制技术<sup>[5-7]</sup>作为实现深空光通信的关键技术之一,它能够对深空光通信系统的性能产生重要的影响;复用技术能够成倍地增加系统的容量,成为提高传输速率的有效途径。因此,本文基于 Optisystem 仿真软件,搭建了深空星间光通信偏振复用(PDM)系统。

## 1 深空星间光通信 PDM 系统

PDM 技术可在同一束激光上实现 2 路光的通信,

收稿日期:2021-12-14。

**基金项目:**河南省自然科学基金(批准号 212300410302)资助;郑州市重大科技创新专项(No.2019CXZX0042)资助;博士启动基金(0131/13501050033)资助;河南省科技攻关(批准号 202102210350)资助。

**作者简介:**王小瑞(1984—),女,博士,郑州泰恩科技有限公司特聘教授,现任教于郑州轻工业大学计算机与通信工程学院,主要从事无线紫外光通信、空间光通信关键技术研究工作。2020 年,参与了河南省科技攻关项目(批准号 202102210350)和河南省自然科学基金项目“基于角度感知的空间光通信网中信号传输机制研究”。



不仅使数据传输速率提升 2 倍,而且系统易于实现。本文基于 Optisystem 仿真软件搭建的深空星间光通信 PDM 系统原理框图如图 1 所示,该系统主要由数据源、激光器、脉冲发生器、调制器、偏振控制器、分束/合成器、光无线信道、偏振片、光电探测器、低通滤波器以及 3R 再生器组成。在发送端,首先分别对 2 路信号进行调制,通过偏振控制器使 2 路信号保持正交性,然后经过光束合成器将 2 路信号合并,通过光无线信道传输到接收端。在接收端,首先将接收到的光束进行分束,然后分别通过偏振片检测出原始光信号。偏振片的作用是检测不同偏振态的光信号,检测出来的 2 路信号(下文称其为上支路信号和下支路信号)分别经过光电探测器的光/电转换、低通滤波器的噪声滤除,最后再由 3R 再生器再生放大,即可得到原始数据信息。

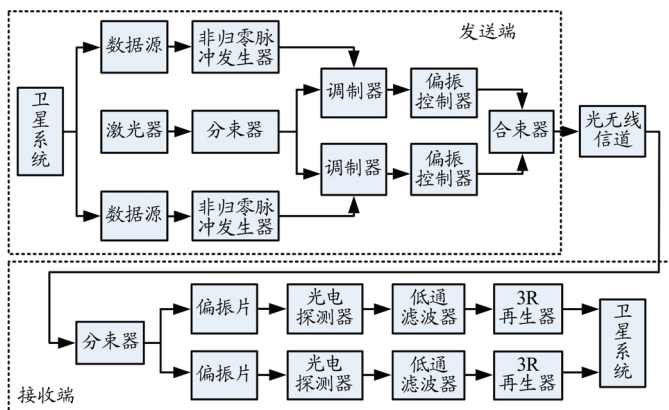


图 1 深空星间光通信 PDM 系统原理框图

## 2 仿真结果与分析

本文就搭建的深空星间光通信 PDM 系统进行了仿真,系统仿真参数如表 1 所示,仿真得到的接收端上、下支路信号的眼图如图 2 所示。可以看出,眼图的上迹线均清晰端正,且眼图张开较大,说明该系统通信性能良好,能够正确接收信号。

传输速率  $v$  为 1 Gb/s,通信波长  $\lambda$  分别为 850 nm、1064 nm 和 1550 nm 时的眼图高度与通信距离之间的关系如图 3 所示。眼图高度越高说明眼图张开得越大、

表 1 深空星间光网络仿真参数

| 参数          | 取值   |
|-------------|------|
| 光无线信道类型     | 直视通信 |
| 发射天线孔径/cm   | 15   |
| 接收天线孔径/cm   | 15   |
| 发射效率        | 0.8  |
| 接收效率        | 0.8  |
| 发射器瞄准误差/rad | 1.1  |
| 接收机瞄准误差/rad | 1.1  |

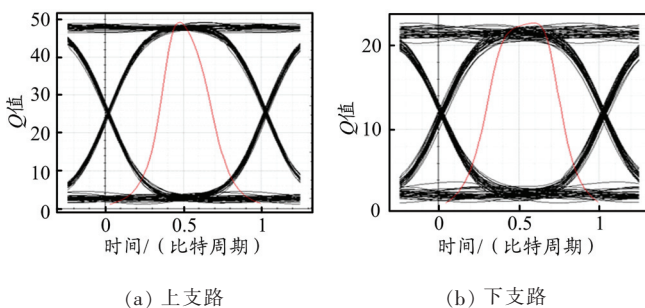


图 2 接收端系统眼图

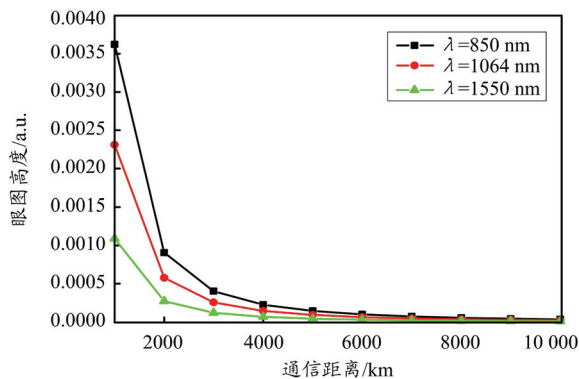


图 3 不同通信波长下眼图高度与通信距离之间的关系

信号越好。可以看出,当通信波长一定时,随着通信距离的增加,眼图高度逐渐减小,直到眼图高度为零。这是因为随着通信距离的增加,系统接收端接收到的信号强度越来越小,且噪声越来越大,接收端无法从较强的噪声中将信号判决出来,故接收端信号的眼图高度越来越小。当通信距离一定时,随着通信波长的增加,眼图高度也呈现减小趋势,这是因为通信波长小的信号衰减相应较小。

当通信波长  $\lambda$  为 850 nm,传输速率  $v$  分别为 1 Gb/s、2.5 Gb/s、5 Gb/s 和 10 Gb/s 时的眼图高度与通信距离之间的关系如图 4 所示。可以看出,当传输速率一定时,随着通信距离的增加,眼图高度逐渐减小。当通信

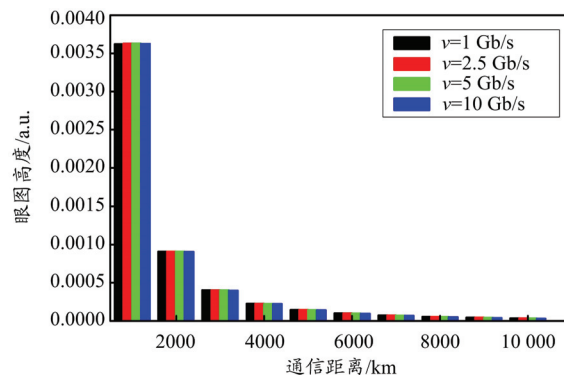


图 4 不同传输速率下眼图高度与通信距离之间的关系

距离一定时,不同速率下的眼图高度几乎相等,这说明本文设计的系统在传输速率  $v$  为 10 Gb/s 时也可以实现良好的通信性能。

当传输速率  $v$  为 1 Gb/s,通信波长  $\lambda$  分别为 850 nm、1064 nm 和 1550 nm 时,系统的总接收功率与通信距离之间的关系如图 5 所示。可以看出,当通信波长一定时,随着通信距离的增加,系统总接收功率逐渐减小;当通信距离一定时,通信波长越大,总接收功率越小。这主要是因为通信距离或通信波长增大都会增加信号衰减,导致系统接收端接收功率减小。

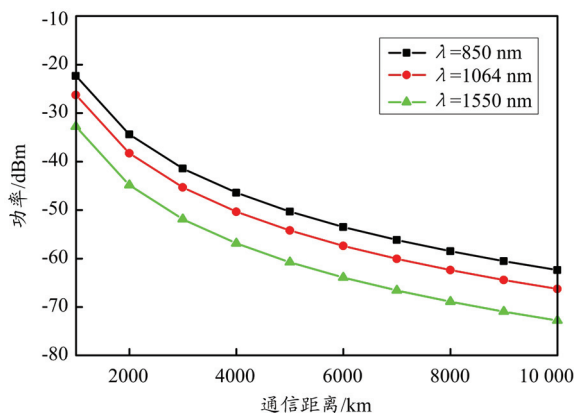


图 5 不同通信波长下总接收功率与通信距离之间的关系

当通信波长  $\lambda$  为 850 nm,传输速率  $v$  分别为 1 Gb/s、2.5 Gb/s、5 Gb/s 和 10 Gb/s 时,系统的总接收功率与通信距离之间的关系如图 6 所示。可以看出,当传输速率一定时,随着通信距离的增加,系统总接收功率逐渐地减小;当通信距离一定时,不同速率下的总接收功率几乎相等。这同样说明了本文设计的系统在传输速率  $v$  为 10 Gb/s 下可以实现良好的通信效果。相比文献 [11] 中深空光通信系统采用的脉冲编码调制

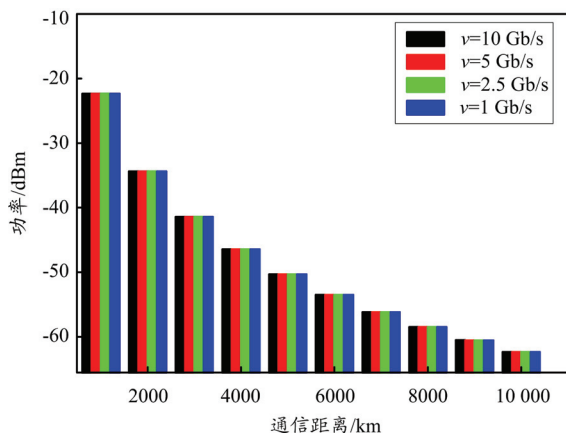


图 6 不同传输速率下总接收功率与通信距离之间的关系

(PPM)方法,本文采用 PDM 方法时系统的信息传输速率提高了几十倍。

$Q$  因子作为一个品质因数,不仅可以衡量系统的信号传输质量,也可以表征系统的误码率情况,即  $Q$  值越大,对应的误码率就越小。当传输速率  $v$  为 1 Gb/s,通信波长  $\lambda$  分别为 850 nm、1064 nm 和 1550 nm 时不同通信距离下的  $Q$  值与通信距离之间的关系如图 7 所示。可以看出,当通信波长一定时,随着通信距离的增加,系统  $Q$  值逐渐减小;当通信距离一定时,随着通信波长的增加, $Q$  值呈现减小趋势。这是因为随着通信距离或波长的增加,信号的衰减逐渐增大,噪声也逐渐增加,导致系统接收端接收到的信号的误码率增加,所以  $Q$  值越来越小。

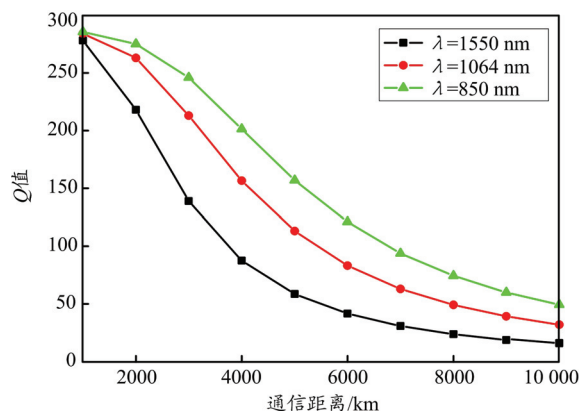


图 7 不同通信波长下  $Q$  值与通信距离之间的关系

当通信波长  $\lambda$  为 850 nm,传输速率  $v$  分别为 1 Gb/s、2.5 Gb/s、5 Gb/s 和 10 Gb/s 时系统  $Q$  值与通信距离之间的关系如图 8 所示。可以看出,当通信距离一定时,随着传输速率的增加, $Q$  值逐渐减小。从光的粒子性方面解释,这是因为传输速率越大,单位时间内通信光子携带的能量减少,则通信距离将减小,误码率增大,导

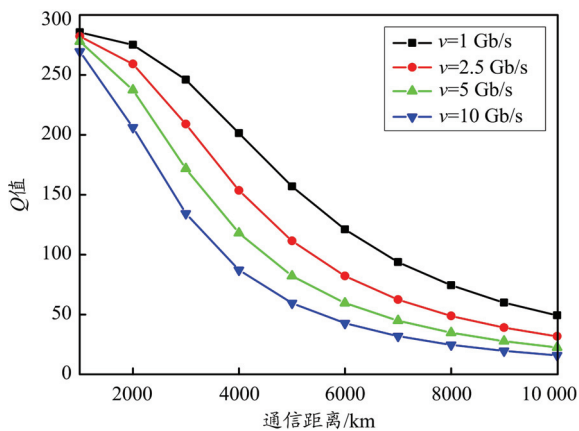


图 8 不同传输速率下  $Q$  值与通信距离之间的关系

致  $Q$  值降低。当传输速率一定时,  $Q$  值将随着通信距离的增加而逐渐地减小,这是因为通信距离增加,信号的衰减和噪声会相应增大,从而导致误码率的增加,  $Q$  值降低。

### 3 结束语

本文基于 Optisystem 仿真软件,搭建了深空星间光通信 PDM 系统链路,并进行了仿真分析。仿真结果表明:该系统可实现数据 Gb/s 级的高速率传输,并且系统性能稳定;相比 PPM 方法,PDM 方法可有效提高数据传输速率,有利于深空光通信系统性能的改善。本文的设计为今后深空光通信系统的相关研究奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] HUEDA M R, CRIVELLI D E, CARRER H S, et al. Parametric estimation of IM/DD optical channels using new closed-form approximations of the signal PDF [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2007, 25 (3): 957–975.
- [2] CHEN C, CHO J, CHEN X. Does probabilistic constellation shaping benefit IM-DD systems without optical amplifiers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2021, 39 (15): 4997–5007.
- [3] AL-EBRAHEEMY O M S, SALHAB A M, CHAABAN A, et al. Precise performance analysis of dual-hop mixed RF/Unified-FSO DF relaying with heterodyne detection and two IM-DD channel models [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11 (1): 1–23.
- [4] SONG T, WU M W, KAM P Y. Mitigation of the background radiation for free-space optical IM/DD systems [J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22 (2): 292–295.
- [5] HUEDA M R, CRIVELLI D E, CARRER H S, et al. Parametric estimation of IM/DD optical channels using new closed-form approximations of the signal PDF [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2007, 25 (3): 957–975.
- [6] WANG Z, WANG J Y, XU Z Y, et al. Long wavelength infrared free space optical communication technology[J]. Journal of Military Communications Technology, 2014, 35 (4): 37–42.
- [7] MAHMOUD A H, HOSSAM A I S, MOAWAD I D. Joint optimal transceiver placement and resource allocation schemes for redirected cooperative hybrid FSO/mmW 5G fronthaul networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10 (12): 975–990.
- [8] LEHMANN F, RAMANTANIS P, FRIGNAC Y. Joint channel estimation, interference mitigation, and decoding for WDM coherent optical communications [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2014, 6 (3): 315–325.
- [9] DJORDJEVIC I. Multidimensional pulse-position coded-modulation for deep-space optical communication [J]. IEEE Photonics Technology Letter, 2011, 23 (18): 1041–1043.
- [10] PATNAIK B, SAHU P K. Inter-satellite optical wireless communication system design and simulation [J]. IET Communication, 2012, 6 (16): 2561–2567.
- [11] WANG X R, GUO L, LIU Y J, et al. Link design of moon-to-earth optical communication based on telescope array receivers[J]. Optics Communications, 2014, 310: 12–18.