

## 全双工逆向调制回复空间光通信系统性能评价

张 鹏<sup>1,2</sup>, 王天枢<sup>1,2</sup>, 杨国伟<sup>3</sup>, 贾青松<sup>2</sup>, 马万卓<sup>2</sup>, 张立中<sup>1,2</sup>, 佟首峰<sup>1,2</sup>, 姜会林<sup>1,2</sup>

- (1. 长春理工大学 空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022;
3. 杭州电子科技大学 通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘 要:** 基于逆向调制反射器(MRR)的空间光通信系统因其结构紧凑、可免去链路一端的捕获(APT)系统、功耗低等优点,是空间光通信系统研究热点之一。提出采用双波长激光发射实现全双工逆向调制回复空间光通信结构,并基于该结构对强度调制解调模式,通信距离为 300 km,通信速率为 1 GHz 下的地面站对近地小卫星全双工通信链路进行了链路计算及通信误码率的分析。当 MRR 端口径为 0.1 m 时,通信链路余量大于 5 dB,通信误码率优于  $10^{-15}$ ,满足通信链路的要求。并进一步分析了仿真结果存在的缺陷。结果表明所提出的空间光通信结构在小卫星对地面站全双工激光通信是可行的,是未来空间光通信系统发展趋势之一。

**关键词:** 空间光通信; 逆向调制回复器; 全双工

**中图分类号:** TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2506-05

## Performance evaluation of full-duplex free space laser communication system based on modulating retro-reflector

Zhang Peng<sup>1,2</sup>, Wang Tianshu<sup>1,2</sup>, Yang Guowei<sup>3</sup>, Jia Qingsong<sup>2</sup>, Ma Wanzhuo<sup>2</sup>, Zhang Lizhong<sup>1,2</sup>,  
Tong Shoufeng<sup>1,2</sup>, Jiang Huilin<sup>1,2</sup>

- (1. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Institute of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
3. College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Free space optical communication based on modulating retro-reflector (MRR) is research hotspots of future wireless optical communication because of less power, compact structure and without Acquisition, Pointing and Tracking (APT) requirement at system based on MRR. Full-duplex free space laser communication system based on MRR and double-wavelength laser is proposed. The link budget between small satellite under low orbit and ground station and bit error rate (BER) of optical communication are calculated when Communication distance and rate are 300 km and 1 GHz. It can be found that the link budge is more than 5 dB, and BER is less than  $10^{-15}$ . The results show that the budge and BER meet the communication requirement. Then limitation of the emulation is also analyzed. In

收稿日期: 2014-12-10; 修订日期: 2015-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(91438204)

作者简介: 张鹏(1985-), 男, 讲师, 主要从事激光通信及激光器方面的研究。Email: zhangpeng@cust.edu.cn

conclusion, the proposed system can be used between light-weight full-duplex laser communication of small satellite under low orbit and ground station. It may be one of the future development trends of space optical communication system.

**Key words:** free space laser communication; modulating retro-reflector; full-duplex

## 0 引言

自由空间光通信既具有信道容量大、抗干扰能力强、保密性好及无需频谱许可证等的优点,又无需铺设通信线缆且安装维护便捷。所以自由空间光通信是未来信息领域的发展趋势<sup>[1-3]</sup>。

传统空间激光通信链路需要两端都装载激光发射/接收系统以及复杂的捕跟系统<sup>[4]</sup>,导致端机质量、体积、功耗等增加,成为一定程度上制约激光通信的应用。基于逆向调制器(MRR)的空间激光通信系统可以免去链路中的一个终端的激光发射器和捕跟系统<sup>[5-6]</sup>,从而减轻链路一端的质量、体积和功耗,同时方便快速捕获对准,对于无人机、小卫星、浮标等对体积、载重和功耗有严格限制的小平台应用具有重要意义。

自20世纪90年代中期星火计划开始,美国先后进行了以调制器、通信结构及通信体制为研究内容的基于MRR空间激光通信系统相关研究。欧洲相关国家也紧随其后开展了MRR关键技术的研究,并取得了一定进展<sup>[7-9]</sup>。为解决MRR端通信速率有限等难点,各国进行了MRR调制器的研究,包括铁电液晶(FLC)、多量子阱(MQW)以及微机电系统(MEMS)。而为了解决MRR端入射角小及能量衰减大等问题,各国进行了逆向光学系统的研究,例如角反射器、猫眼光学系统及带放大功能MRR等的结构等。

另外如何解决系统单工应用限制是研究重点之一。美国T.M.Shay等人研制了液晶与角反射器耦合组成全双工激光通信系统<sup>[10]</sup>,该系统逆向链路采用频移键控子载波(FSK)调制,而正向链路则使用圆偏振键控(CPK)调制。而加州理工学院喷气推进实验室J.L.Gao提出了正向和逆向链路都使用开关键控(OOK)调制<sup>[11]</sup>,但是正向链路只能对逆向链路中为‘1’的比特进行再调制。也就是说,逆向链路中的‘0’比特需要被过滤掉。这样必然导致正向链路传输

速率很低,约等于逆向链路速度的一半。而且还需要先对逆向链路数据做检测并判断是否为比特‘1’,再实施对正向链路的调制。2010年N.Chand报导了子载波调制逆向链路和OOK调制正向链路的全双工MRR FSO系统<sup>[12]</sup>。相较Shay的方案,用OOK替代CPK调制使得系统结构得到了简化,但是仍然采用了相对复杂的子载波调制技术。综上可知传统的方法中一束激光需要经过两次调制才能完成双工通信,为了保证逆向调制回来的信号质量,往往第二次调制格式和第一次调制格式不一样,而且调制速率也最好有差别,增加系统复杂程度。因此,为了尽可能使MRR端结构紧凑和系统简单,全双工通信系统方案还有待进一步探索。

文中提出采用双波长发射方式改进现有基于MRR的全双工通信系统,并针对近地小卫星对地通信全双工通信链路的链路余量及误码率性能进行分析,验证其可行性及应用性,为系统应用提供技术参考。

## 1 系统结构及工作原理

如图1所示,整个通信系统由左侧主激光通信端机与右侧基于MRR的激光通信端机组成。主激光通信端机由发射部分、接收部分、光学天线组成,发射部分包括激光器2、调制器、数据源、光纤放大器

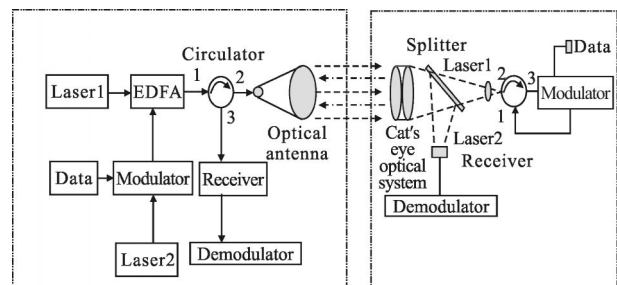


图1 基于双波长激光的全双工逆向调制回复空间光通信系统示意图

Fig.1 Full-duplex modulating retro-reflector for free-space optical communication based on double wavelength

和激光器 1,接收部分包括接收器、解调器、逆向调制器,主激光通信端机的发射部分与接收部分分别连接到光纤环行器端口 1 和端口 3。光纤环行器端口 2 与光学天线连接。另外激光器 1 和激光器 2 可处于同一波段,不过间隔最好大于 20 nm。基于 MRR 的激光通信端机由会聚透镜、光纤环行器、调制器、接收部分、猫眼光学系统组成,其中光纤环行器和调制器组合使得入射光经过环行器后将按原光路返回<sup>1</sup>。接收部分包括接收器、解调器。接收部分通过滤波器与 MRR、猫眼光学系统隔离。具体工作过程如下:正向链路为经过调制后激光 2 和激光 1 进入光纤放大器放大,而后光依次经过环行器端口 1、端口 2 和光学天线发射到基于 MRR 激光通信端机,中途经过大气等自由空间信道。通信光由 MRR 激光通信端机中猫眼光学系统进入,经过滤波器后激光器 2 发出的光由接收器接收后转换为电信号,由解调器解出数据。

上述为前向链路的光路走向。而逆向链路的光路走向如下:激光器 1 发出的光进入 MRR 调制后反射返回经过猫眼光学系统发射返回主激光通信端机。逆向调制回复的光经光纤环行器端口 2 和端口 3 后进入接收器,并转换为电信号后由解调器解出数据。从而完成了双工激光通信。相比于以往系统结构而言,所提的全双工通信系统简化系统,不需要如传统双工系统采用上逆向的不同调制格式。

## 2 链路仿真计算

假定所计算的链路为地面站与低轨小卫星的全双工激光通信链路。地面站光学天线口径为 1 m,通信距离为 300 km,通信方式为强度调制/直接探测,通信速率为 1 GHz,通信波段为 1 550 nm 波段(正向 1 530 nm,逆向 1 550 nm)。根据链路的参数分析计算链路接收功率。由于激光器 1 需要逆向调制回复,其功率值的大小决定了链路距离,而激光器 2 的功率取值可为激光器 1 的一半。分析仅考虑激光器 1 的情况。具体传输方程见公式(1),相关的具体参数见表 1<sup>[5]</sup>。

$$P_r = P_t \cdot \eta_{or} \cdot L_r \cdot \eta_b \cdot \eta_{or} \cdot \eta_{ATP} \quad (1)$$

表 1 中空间传输损耗已经考虑了往返距离及相对应的束散角,束散角估算为两倍衍射极限角。图 2 为猫眼光学系统口径为(0.01 m、0.02 m、0.05 m、0.1 m)时通信距离与接收功率的关系。

表 1 链路计算参数表

Tab.1 Parameters in link budget simulation

	Caption	Unit	Value
$P_t$	Power of transmitter	dBm	Power from EDFA is about 5W (37dBm)
$\eta_{or}$	Coefficient of optical antenna	dB	Coefficient of antenna is less than 0.7 $L_r = \frac{D^2}{(\theta \cdot L)^2}$ , where $L$ is
$L_r$	Space loss	dB	communication distance, the distance in MRR communication system is $2L$ , $\theta$ is divergence angle(the angle of upperlink is different from the angle of downlink), $D$ is transmitting diameter and is 1 m
$\eta_b$	Power loss by channel	dB	Power loss is comprised of transmission loss and the loss by atmospheric turbulence, it is estimated at 10 dB
$\eta_{ATP}$	Loss of APT	dB	It can be estimated at 0.5 dB because of tracking accuracy
$\eta_{or}$	Coefficient of optical antenna	dB	It can be estimated at 0.7
$P_r$	Received optical power	dBm	-

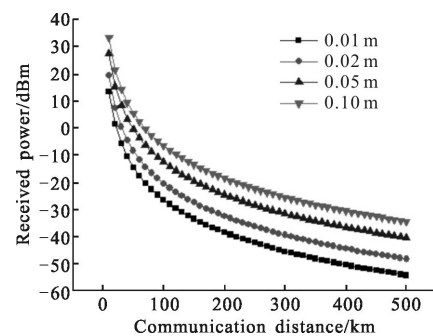


图 2 不同光学口径下接收光功率与通信距离的关系

Fig.2 Received signal power as a function of communication distance under different apertures

如图 2 所示,猫眼光学系统口径为 0.1 m,通信距离为 300 km 时,接收光功率为 -25 dBm。而 1 Gbps 通信速率下 APD 接收灵敏度约为 -30 dBm。可知链路功率余量约为 5 dB,完全满足通信链路的要求,为此可实现通信速率为 1 GHz,通信距离为 300 km,地面站与低轨小卫星的全双工激光通信链路。如图 2 所示,随着口径减小,接收光功率也随之减小,其中通信距离为 300 km 时,0.01 m、0.02 m、0.05 m 口径下

接收光功率分别为-45 dBm, -39 dBm, -31 dBm。由此可知为了减小小卫星激光端机的质量和体积可降低猫眼光学系统的口径, 同时采用降低通信速率增加通信接收灵敏度方式来实现 300 km 的地面站与低轨小卫星的全双工激光通信链路。

为了进一步分析通信系统的性能, 对通信误码率与发射功率及通信距离进行仿真计算。

易知信号光通过光电探测器可转换为电信号, 如公式(2)所示:

$$I = R_D P_r \tag{2}$$

式中:  $R_D$  为探测器的响应效率, A/W, 与光探测器的量子效率及波长有关。此处认为信号“1”的光电噪声为  $\sigma_1$ , 信号“0”的光电噪声为  $\sigma_0$ , 并认为两噪声值相等, 没有信号时表示为“0”, 则表达式为:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{I_1 - I_0}{\sqrt{2} (\sigma_1 - \sigma_0)} \right) \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{I_1}{\sqrt{2} \sigma_1} \right) \tag{3}$$

信号“1”的主要噪声以散弹噪声为主, 表达式为:

$$\sigma_1 = \sqrt{2eR_D B P_r} \tag{4}$$

式中:  $e$  为电荷常数;  $B$  为接收带宽。通过将公式(2)、(3)、(4)整合可得:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_D P_r}{eB}} \right) \tag{5}$$

取  $R_D = 0.7$  A/W,  $B = 1$  GHz,  $e = 1.6 \times 10^{-19}$ 。

可知通信距离为 300 km, 根据公式(1)及(5)计算误码率与通信距离的曲线。如图 3 所示, 在所假设

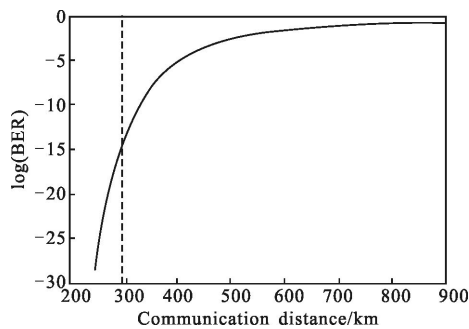


图 3 误码率与通信距离的关系

Fig.3 BER as a function of communication distance

的通信链路下, 通信误码率优于  $10^{-15}$ , 完全满足通信的要求。另外也可通过公式(1)及(5)计算误码率与发射功率的曲线。如图 4 所示, 按照传统通信误码率为  $10^{-9}$  可满足要求, 从激光器硬件方面降低发射功率

至 35 dBm 即可。所以假设地面站与低轨小卫星的全双工激光通信链路满足误码率要求。所提全双工激光通信链路方案理论上是可行的。不过上述链路计算和误码率仿真并未考虑大气湍流对光斑质量和交叉耦合的具体影响, 也未考虑进入 MRR 端的激光是否满足调制的要求, 如考虑这两方面影响, 通信距离及性能将会受到一定影响。

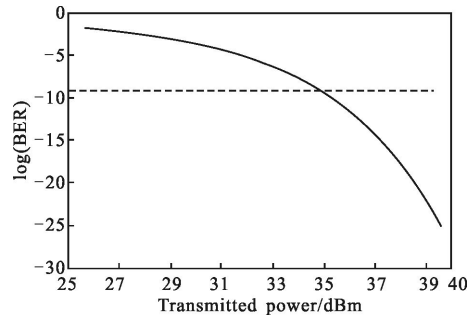


图 4 误码率与发射功率的关系

Fig.4 BER as a function of transmitted power

### 3 结 论

提出了双波长激光发射实现全双工逆向调制回复空间光通信结构, 相比于现有报道的结构而言, 简化了全双工 MRR 通信系统的复杂程度。基于所提的全双工 MRR 通信结构, 分析了在强度调制解调下, 通信速率为 1 GHz、通信距离为 300 km 的地面站与近地小卫星全双工通信链路的性能。结果表明: 该链路通信余量大于 5 dB, 误码率优于  $10^{-15}$ , 满足通信要求。另外仿真中未考虑到达 MRR 端激光质量是否满足调制要求, 所以通信距离及误码率将受到一定影响。需要进一步分析大气湍流影响和跟踪误差条件下全双工逆向调制回复空间激光通信系统的性能。为此可知所提的全双工逆向调制回复空间光通信结构可实现短距离的激光通信, 并适合无人机、小卫星等小平台使用。为该结构实用化和工程化提供一定参考。

### 参 考 文 献:

[1] Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of space laser communications [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 670-680. (in Chinese)  
吴从均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 670-680.

- [2] Liu Dan, Liu Yan, Liu Zhi, et al. Performance analysis on atmosphere laser communication system based on circular polarization shift keying[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3111–3115. (in Chinese)  
刘丹, 刘艳, 刘智, 等. 基于圆偏振移位键控的大气激光通信性能分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 3111–3115.
- [3] Han Qiqi, Wang Qiang, Ma Jing, et al. Experimental research on vibration influence and compensation of space light to fiber coupling efficiency [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3):933–939. (in Chinese)  
韩琦琦, 王强, 马晶, 等. 振动对空间光-光纤耦合效率影响及补偿实验研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 933–939.
- [4] Meng Lixin, Liu Kunming, Zhang Lizhong, et al. Multi-caliber-launching and large-caliber-receiving techniques for field atmospheric laser communication[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(6): 909–913. (in Chinese)  
孟立新, 刘坤明, 张立中, 等. 野战激光通信中多口径发射与大口径接收试验研究 [J]. 应用光学, 2013, 34(6): 909–913.
- [5] Sun Huayan, Zhang Laixian, Zhao Yanzhong, et al. Progress of free-space optical communication technology based on modulating retro-reflector [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 1–9. (in Chinese)  
孙华燕, 张来线, 赵延伸, 等. 逆向调制自由空间激光通信技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 1–9.
- [6] Zhang Laixian, Sun Huayan, Fan Guihua, et al. Progress in free space optical communication technology based on cat-eye modulating retro-reflector [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 681–691. (in Chinese)  
张来线, 孙华燕, 樊桂花, 等. 猫眼逆向调制自由空间激光通信技术的研究进展[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 681–691.
- [7] Mikaelian T, Weel M, Kumarakrishnan A, et al. A high-speed retro-reflector for free-space communication based on electro-optic phase modulation [J]. *Canadian Journal of Physics*, 2013, 81(4): 639–650.
- [8] Gagnon S, Sylvestre B, Gagnon L, et al. Recent developments in satellite laser communications: Canadian context [C]// Proceedings of 2012 International Conference on Space Optical Systems and Applications, 2012: 9–12.
- [9] Goetz P G, Rabinovich W S, Mahon R, et al. Modulating retro-reflector lasercom systems for small unmanned vehicles [C]//IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(50): 986–992.
- [10] Shay T M, Hazzard D A, MacCannell J A, et al. First experimental demonstration of full-duplex optical communications on a single laser beam [C]//15th Annual/USU Conference on Small Satellites, 2001: 1–7.
- [11] Gao J L. Optical retro-reflector-based sensor networks for in-situ science applications [C]//Proceedings of 2003 IEEE Aerospace Conference, 2003, V3:3\_1295–3\_1302.
- [12] Chand N, DeLuck T, Hunton A J, et al. Compact low-cost non-RF communication solutions for unmanned ground vehicles [C]//IEEE Military Communications Conference, 2010: 1577–1582.