

湍流环境下组阵收发的深空激光通信系统性能

李晓龙¹, 蔡岳丰¹, 闫宝罗¹, 李昌瑾¹, 刘海锋^{1,2}, 林 炜^{1,2}, 刘 波^{1,2*}, 吴继旋³

(1. 南开大学 现代光学研究所, 天津 300350; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519000;

3. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387)

摘要: 为了探究大气湍流对深空激光通信的影响, 从理论上讨论了 Gamma-Gamma 分布的大气信道模型和抑制大气湍流的手段。建立了基于组阵收发的深空激光通信系统模型, 对不同湍流条件下的系统误码率进行仿真。仿真结果表明: 在信噪比为 20 dB 时, 弱湍流环境的下行链路通信误码率比强湍流低 4 个数量级; 大气湍流强度增强时, 系统的通信误码率增大; 在同等湍流强度下, 大气湍流对于上行链路通信性能的影响比下行链路更大。

关键词: 深空环境; 空间激光通信; 大气湍流; 组阵收发; 误码率

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)10-0020-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.10.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Performance of deep space laser communication system with array transceiver in turbulent environment

LI Xiaolong¹, CAI Yuefeng¹, YAN Baoluo¹, LI Changjin¹, LIU Haifeng^{1,2}, LIN Wei^{1,2}, LIU Bo^{1,2*}, WU Jixuan³

(1. Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhuhai Guangdong 519000, China; 3. College of Electronic and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to explore the effect of atmospheric turbulence on deep-space laser communication, the Gamma-Gamma distributed atmospheric channel model and means to suppress atmospheric turbulence are theoretically discussed. A deep space laser system model based on array transceiver is introduced, and the system's bit error rate under different turbulence conditions is simulated. The results show that when the signal-to-noise ratio is 20 dB, the downlink communication bit error rate under weak turbulence is 4 orders of magnitude lower than that under strong turbulence. When the intensity of atmospheric turbulence increases, the bit error rate of the system increases. At the same turbulence intensity, the influence of atmospheric turbulence on uplink communication performance is greater than that on downlink.

Key words: deep space environment; space laser communication; atmospheric turbulence; array transceiver; bit error rate

0 引言

目前, 空间激光通信技术已经成功应用在星地、星际等多种激光链路中。为了开发宇宙资源、探索未知空间, 把空间激光通信技术应用到深空探测领域是

必然趋势^[1-4]。深空激光通信的信号光穿过大气层, 必然受到大气环境的影响, 大气吸收、散射和湍流效应会衰减光强和扰乱相位, 严重影响通信质量^[5-6]。

近年来, 许多研究机构围绕大气湍流对激光通信的影响开展了研究。文献[6]分别利用对数正态分布和 Gamma-Gamma 分布对信道进行建模, 研究相位噪声对系统接收信噪比和误码率的影响。文献[7-8]分析了在不同大气湍流强度、脉冲幅度调制 (PPM) 阶数、抖动标准差和波束宽度条件下, 误码率随发射功率变化的关系。文献[9]推导了单模激光通信系统在负指数分布的大气湍流下通信中断概率和误码率的表达式。文献[10-11]介绍了克服大气湍流效应对高速率星地相干通信影响的方法及其原理; 采用实验室内半实物模

收稿日期: 2020-02-05。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB1802302) 资助; 国家自然科学基金 (NSFC 11904180) 资助; 天津市高层次创新创业团队项目资助; 南开大学自制实验教学仪器设备项目资助。

作者简介: 李晓龙 (1995—), 男, 硕士研究生, 2017 年于大连理工大学获得理学学士学位, 现就读于南开大学电子信息与光学工程学院光学工程专业, 主要从事自由光通信系统设计及关键技术方面的研究工作。

*** 通信作者:** 刘波 (E-mail: liubo@nankai.edu.cn)。



拟的方法,进行了光强闪烁方差及频谱、到达角起伏方差及频谱等测试。但是,目前涉及组阵收发模式下的深空激光通信系统的研究较少,对上、下行通信链路差异的分析以及大气湍流抑制手段的讨论更少。

为了进一步探究大气湍流对于深空激光通信的影响,本文从理论上讨论大气信道特性,仿真不同湍流条件下通信系统误码率的变化情况。

1 理论分析

1.1 大气湍流闪烁对深空激光通信的影响

深空激光通信的信道复杂,大气湍流现象严重。由大气湍流效应引起的折射率改变会影响光的相干性,产生相位畸变,进而导致光斑的漂移,出现散斑、相位起伏和能量的非高斯分布,在接收时表现出信号光的强度起伏和光功率闪烁,直接影响信号的解调和数据恢复,导致信噪比和误码率等不达标。

大气湍流的强弱,通常用接收光强的波动方差表示。根据 Rytov 近似理论,平面波的光强波动方差表达式为:

$$\sigma_R^2 = 1.23 \cdot C_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} L^{11/6} \quad (1)$$

其中, L 是大气信道中的通信距离, λ 是通信波长, C_n^2 是大气折射率结构参数。

1.2 Gamma-Gamma 信道模型

大气湍流闪烁使信号光在接收平面上的光功率不再服从正态分布。为研究大气湍流闪烁对激光通信系统的影响,本文选择 Gamma-Gamma 光强起伏概率分布表征大气信道。该模型使用范围较广,可以准确描述弱、中及强湍流下光强的起伏。该模型下,接收光强的分布函数为:

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}), I > 0 \quad (2)$$

其中, I 是光强, $K_a(\cdot)$ 是修正 a 阶贝塞尔方程, $\Gamma(\cdot)$ 表示 Gamma-Gamma 公式,参数 α 和 β 与大气湍流强弱 σ_R^2 有关。

1.3 抑制大气湍流的技术途径

为抑制大气湍流,可采用多口径发射和大口径接收技术^[12-13]。在发射时,多口径发射天线利用光束之间的相互补偿,降低大气湍流对平均光强和光强起伏的影响,有效抑制大气湍流对光束的扰动。为简化模型,设光传输处在平稳的大气湍流中,且各项同性,其相干长度为:

$$\rho_0 = \left(1.46 \frac{2\pi}{\lambda} C_n^2 L \right)^{-3/5} \quad (3)$$

设发射天线口径数目为 z , 相邻发射天线之间的距离为 l 。接收天线口径为 D_r , 其中包含 m 个散斑元。在大气信道中,多光束发射的传输模型为:

$$P_r(I) \approx \left(\frac{zm}{\langle I \rangle} \right)^{nm} \frac{I^{(nm-1)} \exp(-zmI/\langle I \rangle)}{\Gamma(zm)}, I > 0, I \geq \sqrt{\lambda L}$$

$$m \approx \begin{cases} (D_r/\rho_0)^2, D_r \geq \rho_0 \\ 1, \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

图 1 是令 $m=1$ 、发射天线口径数 z 为 1、2、4 和 8 时的接收光强分布。可以看出,发射天线口径数量较小时接收光强接近负指数分布。随着发射天线口径数量的增加,接收光强接近正态分布,并且最大光强概率密度逐渐增大。

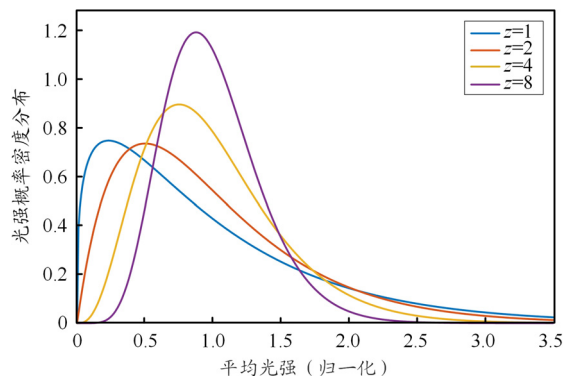


图 1 不同数量发射天线对应的接收光强分布

在接收时,大口径接收天线利用功率平滑效应减小光功率的闪烁方差,减弱光强起伏。功率平滑效应一般用孔径平滑因子 A 评价。对于大尺度湍流 l_0 情况时的平面波,采用 Tatarskill 谱代替 Kolmogorov 谱,孔径平滑因子近似为:

$$A = \left[1 + 2.21 \left(\frac{D_r}{l_0} \right)^{7/3} \right]^{-1} \quad (5)$$

不同接收天线口径对应的接收光强分布如图 2 所示,可以明显看出口径平滑效应。随着接收天线的口径增加,功率起伏减小,接收光强增加,链路性能将明显提高。

2 基于组阵收发深空激光通信系统模型

由于通信链路距离极大,深空激光通信面临光信号经过大气信道和真空衰减严重、空间环境恶劣和跟踪困难等诸多挑战。为解决上述问题,深空激光通信系统通常采用 PPM 方式以提升能量的利用率,同时采用

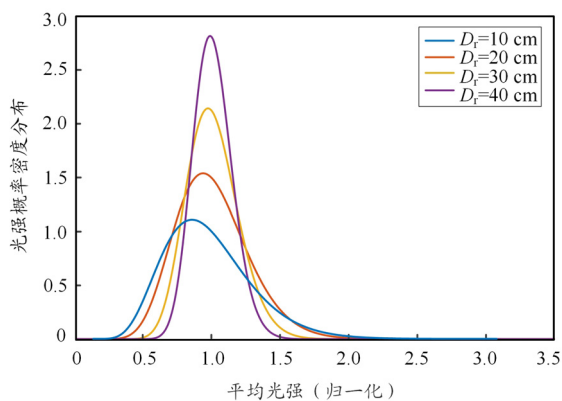


图2 不同接收天线口径对应的接收光强分布

组阵接收和发射信号以提升通信质量。

系统模型的通信距离为 400000 km,大部分为真空环境,大气信道约为 30 km。由于其通信距离较远,激光在真空环境中传输时会有巨大的能量损耗。大气环境复杂多变,大气湍流效应导致光斑的漂移和能量的非高斯分布,在接收时表现出信号光的强度起伏和光功率闪烁,影响上、下行链路信号的信噪比和误码率。

针对深空-地激光链路的特点,本文选择的系统模型如图3所示。系统可实现波长为 1550 nm 时最高速率为 611 Mb/s 的深空-地 400000 km 链路通信。系统设计 3 个终端,地面收、发终端各 1 个,载荷终端 1 个。地面发射终端具有四口径为 15 cm 的发射天线,发射天线衍射角为 $13.2 \mu\text{rad}$,单路发射功率最高可达 10 W。上行链路信号光地面接收终端具有两口径为 60 cm 接收天线。载荷终端由于受到环境限制,收发口径均为 12 cm,发射天线衍射角为 $16.5 \mu\text{rad}$,发射功率为 1 W。上行信号采用强激光四天线组阵发射,通过“多发单收”模式,可实现 4PPM 的 311 Mb/s 速率通信。激光发射后进入大气层,可以对比分析组阵发射对大气湍流的抑制效果。下行高速率激光信号采用双天线组阵

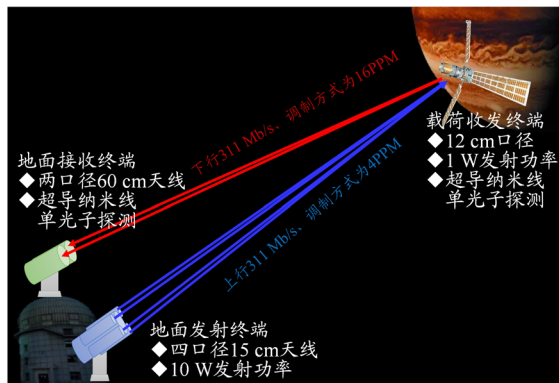


图3 系统模型示意图

接收,通过“单发多收”模式,可实现 16PPM 的 622 Mb/s 速率通信。

3 系统性能模拟仿真

基于上文提及的系统模型,本文利用 OptiSystem 软件模拟不同大气湍流强度对深空激光通信系统误码率的影响。在仿真中,信息源为伪随机码序列,码型为非归零码(NRZ)。本文将针对大气湍流闪烁的影响进行重点研究。软件根据 Kolmogorov 湍流理论,将大气信道模型进行适当简化统一,忽略结构常数随海拔高度的变化。大气信道采用 Gamma-Gamma 信道模型,强、较强和弱湍流条件对应的大气折射率常数分别为 10^{-12} 、 10^{-14} 和 10^{-16} 。

在强、较强和弱湍流条件下,深空激光通信系统上行链路的误码率随信号信噪比的变化关系如图4所示。上行链路采用 4PPM,通信速率为 311 Mb/s。图中给出了在较强湍流条件下信噪比分别为 5 dB 和 20 dB 对应的眼图。右侧眼图张开程度明显大于左侧,对应误码率更低、通信质量更好。图5为在不同强弱湍流条件下深空激光通信系统下行链路的误码率随信号信噪比的变化关系。下行链路采用 16PPM,通信速率为 622 Mb/s。在信噪比为 20 dB 时,弱湍流下的下行链路通信误码率比强湍流低 4 个数量级。仿真结果表明:在大气湍流环境中,提升系统信噪比,可以降低误码率,改善通信质量。

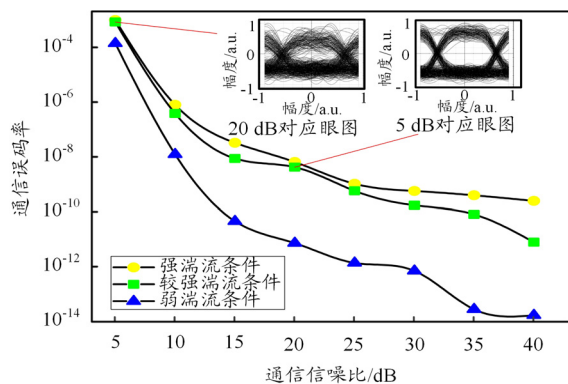


图4 不同湍流强度下上行链路的通信性能

在信噪比为 20 dB 时,深空激光通信系统上、下行链路的误码率随大气折射率结构参数的变化关系如图6所示。大气湍流越强,光强起伏方差越强,通信误码率越大,通信质量越差。在深空激光通信系统中,在同等湍流强度下,大气湍流对于上行链路通信性能的影响比下行链路明显更大。对于下行信号光,经过长

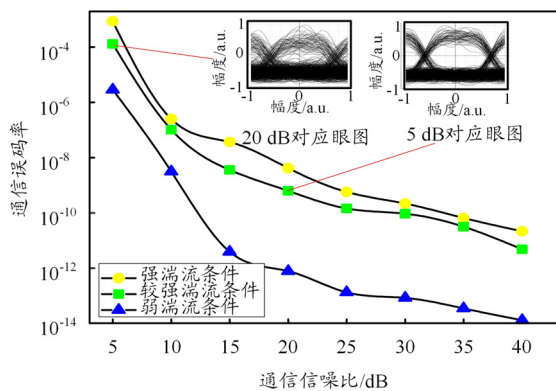


图5 不同湍流强度下行链路的通信性能

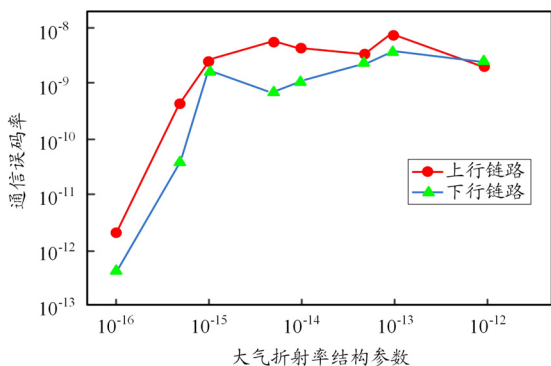


图6 误码率随大气折射率结构参数的变化曲线

距离真空损耗后,由稀薄空气进入大气层,受到对流层湍流的影响。由于光斑扩散严重,会产生较强的光强闪烁。而对于上行信号光,以天线发散角发射后直接进入对流层。除了产生较强的光强闪烁外,尺度较大的湍流会造成一定程度的光束漂移,加剧光强闪烁,在经过长距离真空损耗后,接收性能会降低。因此,大气湍流对于上行链路通信性能的影响比下行链路更大。

同时,本文对大口径发射抑制大气湍流的技术进行了验证。通信误码率随接收口径变化曲线如图7所示。可以看出,在上行链路其它条件不变的情况下,增

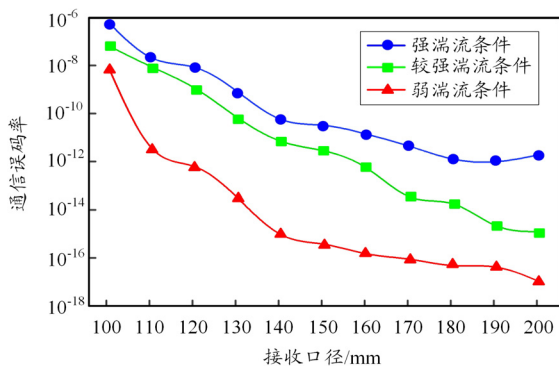


图7 通信误码率随接收口径变化曲线

大接收天线的口径可以降低误码率。仿真结果表明:大口径发射技术可以有效抑制大气湍流,提升通信质量。但在实际应用中,由于空间载荷终端的体积、重量和功耗等限制,接收光学天线口径需要进一步优化设计。

4 结束语

在深空激光通信中,大气湍流是引起接收光强起伏的主要因素。本文分析了 Gamma-Gamma 分布的大气湍流对于深空激光通信系统误码率的影响,分析结果表明:对于组网收发的深空激光通信系统,在同等湍流强度下,大气湍流对于上行链路通信性能的影响比下行链路明显更大;大口径发射技术可以有效抑制大气湍流,提升通信质量。本文对于设计基于组网收发的深空激光通信系统和提升通信质量具有一定的价值,为其应用于月地及深空测控奠定了基础。

参考文献:

- [1] 马晶,谭立英,于思源. 卫星光通信[M]. 北京:国防工业出版社,2015.
- [2] 向劲松,查高孟,卢小辉,等. 深空光通信中抗时延抖动的 MPPM 星座映射方案[J]. 光通信技术,2020,44(6):51-57.
- [3] CHENG M K, NAKASHIMA M A, MOISION B E, et al. Optimizations of a Hardware Decoder for Deep-Space Optical Communications [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Regular Papers, 55(2): 644-658.
- [4] HEMMATI H, BISWAS A, DJORDJEVIC I B. Deep-Space Optical Communications: Future Perspectives and Applications [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 2020-2039.
- [5] ANTONIO G Z, BEATRIZ C V, CARMEN C V. Asymptotic error-rate analysis of FSO links using transmit laser selection over gamma-gamma atmospheric turbulence channels with pointing errors [J]. Optics Express, 2012, 20(3): 2096-2109.
- [6] 陈牧,柯熙政. 大气湍流对激光通信系统性能的影响研究[J]. 红外与激光工程,2016(8):108-114.
- [7] 张韵,赵尚弘,王翔,等. 基于 Exponentiated Weibull 模型的 M-PPM 调制空间光链路误码性能[J]. 激光与红外,2018(1):30-34.
- [8] 鞠茂光,岳鹏,刘增基,等. 双伽马湍流信道下多阶脉冲位置调制误码率性能分析[J]. 光电子·激光,2013(9):1702-1707.
- [9] POPOOLA W O, GHASSEMLOOY Z, AHMADI V. Performance of sub-carrier modulated Free-Space Optical communication link in negative exponential atmospheric turbulence environment[J]. International Journal of Autonomous & Adaptive Communications Systems, 2017, 1(1): 342-355.
- [10] 马小平,孙建峰,侯培培,等. 星地激光通信中克服大气湍流效应研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2014(12):28-37.
- [11] 付强,姜会林,曾宗泳,等. 大气湍流对高速激光通信影响的模拟实验研究[C]. 北京:中国光学学会 2011 年学术大会摘要集,2011:617-618.
- [12] 刘坤明. 大气对激光通信影响及抑制技术研究[D]. 长春:长春理工大学,2014.
- [13] 张慧颖,李洪祚,肖冬亚,等. 大气湍流综合效应下空间分集接收性能研究[J]. 中国激光,2016,43(4):136-144.