

文章编号: 1001-3806(2012)03-0346-03

跟踪误差补偿下星地光通信地面模拟实验分析

叶德茂¹, 谢利民¹, 陈晶²

(1. 中国船舶重工集团公司第七一三研究所, 郑州 450015; 2. 武汉大学电子信息学院, 武汉 430079)

摘要: 为了分析跟踪误差对星地光通信链路的影响, 采用 LabVIEW 对接收光信号进行了采集, 通过理论分析和实验验证, 取得了不同动态误差补偿下接收光终端的信号时域特征。结果表明, 出射功率为 23dBm、跟踪误差为 10 μ rad 情况下, 通信系统可以稳定工作; 当跟踪误差为 80 μ rad 或伺服系统出现震荡时, 通信系统性能急剧下降。

关键词: 光通信; 星地光通信; 跟踪误差; 高斯光束

中图分类号: TN929.12 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.015

Ground simulation analysis of satellite-ground optical communication based on tracking error compensation

YE De-mao¹, XIE Li-min¹, CHEN Jin²

(1. The 713th Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Zhengzhou 450015, China; 2. College of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In order to analyze the impact of tracking error on the satellite-ground optical communication link, the received optical signal was collected with the LabVIEW. The time-domain characteristics of optical signals at the receiving end were obtained under different tracking conditions according to theoretical analysis and experiment. The experiment results show that the system can be stable when the tracking error is 10 μ rad and the output power is 23dBm. By contrast, the system becomes unstable when the tracking error is up to 80 μ rad or servo system starts to shake.

Key words: optical communication; satellite-ground optical communication; tracking error; Gaussian beam

引言

近几年,自由空间光通信(free space communication, FSO)成为国内外研究的热点^[1-40],其中星地光通信链路由于其容量大、保密性好等特点决定了其将成为建立全球天基综合信息网和区域天基综合信息主干线的必要通信手段,为此,各国投入了大量的人力物力进行星地光通信的研发,并取得较大进展^[2-5]。但是,星地链路的建立需要经过捕获、跟踪、瞄准(acquisition, tracking, pointing, ATP)来实现,而在实际应用中,由于ATP机构存在动态光轴对准误差,造成目标端接收信号不稳定,从而影响以误比特率为表征的链路性能。目前,已有关于跟踪误差对FSO系统性能影响的研究报道,但针对星地光通信开展专项模拟实验分析的报道较少。因此,本文中结合星地光通信链路特点,通过理论和模拟实验分析跟踪误差对星地光通

信链路性能影响。

1 星地光通信链路特性

如图1所示,星地光通信链路分为上行链路与下行链路,激光传输需经过大气层与自由空间。上行链路先进入大气层,光束质量受严重影响,光斑图像蜕化,对实现微弧度量级的光束瞄准和捕获,跟踪造成困难。在下行链路,光束先经自由空间传输,到达大气层界面时光束质量仍保持良好,此后进入大气层,会受到大气的影响,但相对上行链路影响较弱。

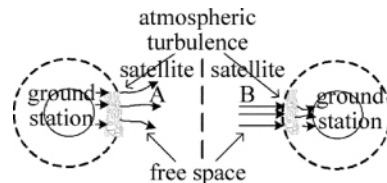


Fig. 1 Uplink/downlink schematic diagram of satellite-ground optical communication

从目前的激光通信应用需求来看,上行链路主要用于信令的发射,传输率要求不高,同时陆基发射端对能源、重量和体积没有过高的要求,可以采用大发散角的办法解决,因此,对ATP系统跟踪精度要求较低。

作者简介: 叶德茂(1982-),男,博士,主要从事目标识别与跟踪技术方面的研究。

E-mail: yedemao@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-08-11; 收到修改稿日期: 2011-09-22

下行链路主要用于空间大容量信息的传输或转发,信号传输率要求较高,同时星载发射端对能耗、重量和体积有严格的要求,不能采用地面站相同的解决办法,因此作者对下行链路进行分析。假定激光通信信号光为高斯光束,则远场光斑分布示意图如图 2 所示,接收端光学系统接收功率 P_r 满足如下关系^[4]:

$$P_r = P_t \eta_t \eta_r \eta_s \psi \quad (1)$$

式中 P_t 为发射端信号光出射功率, η_t 为发射光学系统发射效率, η_r 为接收光学系统增益, η_s 为接收光学系统接收效率, ψ 为传输衰减。

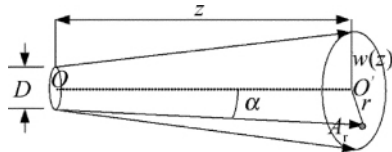


Fig. 2 Far-field intensity distribution of Gaussian beam

如图 2 所示,在跟瞄误差为“0”的理想状态下,设远场 z 处激光光强为 $I_0(\alpha, z)$, 则增加跟瞄误差后远场 z 处光强可表示^[5-7]:

$$I(\varphi) = I_0(\alpha, z) \exp[-2(x^2 + y^2)/w(z)^2] \quad (2)$$

式中 α 是光束发散角(半角), $w(z)$ 为远场 z 处高斯光束半径。实际 ATP 跟瞄偏差角 $\varphi_x \ll 5^\circ$, $\varphi_y \ll 5^\circ$; 因此,对于 t 时刻远场高斯光束光斑分布满足:

$$\begin{cases} x(t) \approx z(t) \cdot [\bar{\omega}_h(t) + \varphi_h(t)] \\ y(t) \approx z(t) \cdot [\bar{\omega}_v(t) + \varphi_v(t)] \\ w(z) \approx z(t) \cdot \alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\bar{\omega}_h(t)$, $\varphi_h(t)$ 和 $\bar{\omega}_v(t)$, $\varphi_v(t)$ 分别表示水平方向和高低方向静态、动态跟踪误差。因此,光强分布可表示为: $I(\varphi) = I_0(\alpha, z) \exp[-2(\bar{\omega} + \varphi)^2/\alpha^2]$ (4) 式中 $\bar{\omega}$ 为静态跟瞄偏差角, φ 为动态跟瞄偏差角。由(4)式可以看出,由于跟瞄过程中存在瞄准误差,即瞄准偏差角在一定范围内随机变化,使得接收光强的随机起伏,进而导致平均接收光强衰落。由于在轨卫星运行满足 $z \gg D_s$ (D_s 为激光通信发射端口径),因此,由(4)式可得:

$$I(\varphi) = \frac{C_0^2}{(\alpha z + D_s/2)^2} \exp\left[-2 \frac{(\bar{\omega} + \varphi)^2}{\alpha^2}\right] \quad (5)$$

式中 C_0^2 只与 D_s 和出射光强有关,因此当光学发射系统确定后, C_0^2 为常数因子。所以在远场 z 处的 A_r 面积内总光功率 P_r 可表示为:

$$P_r = \iint_{A_r} \frac{C_0^2}{(\alpha z + D_s/2)^2} \cdot \exp\left[-2 \frac{(\bar{\omega} + \varphi)^2}{\alpha^2}\right] r dr d\theta \quad (6)$$

式中 $r \in (0, w(z))$, $\theta \in (0, 2\pi)$; 实际工况中,由光学系统校正产生的静态跟瞄偏差角 $\bar{\omega}$ 为固有误差,本文中假定 $\bar{\omega} = 0$, 结合(1)式可得接收端总光功率为^[7-10]:

$$P_r \approx \eta_t \eta_r \eta_s C_0^2 / (\alpha z + D_s/2)^2 \cdot$$

$$\exp[-2\varphi^2/\alpha^2] \pi [(D_r/2)^2/z^2] \quad (7)$$

式中 η_t , η_r 和 η_s 为常数, D_r 为激光通信接收端口径。

假定 $D_r = 200\text{mm}$, $D_s = 200\text{mm}$, 波长为 1550nm , $z = 400000\text{m}$ 。令 $f(\alpha, \varphi) = P_r$, 则(7)式可简化为:

$$f(\alpha, \varphi) = \frac{A_0}{(\alpha z + D_s/2)^2} \exp\left[-2 \frac{\varphi^2}{\alpha^2}\right] \quad (8)$$

式中 A_0 为常数。则令 $\begin{cases} \partial f(\alpha, \varphi) / \partial \alpha = 0 \\ \partial f(\alpha, \varphi) / \partial \varphi = 0 \end{cases}$; 由于 $\alpha \neq 0$, 因此方程要获得极值应满足如下关系:

$$\varphi = \alpha \cdot \sqrt{(2 + 5 \times 10^{-7}/\alpha)^{-1}} \quad (9)$$

由于终端的瞄准偏差角的概率密度满足瑞利分布,因此跟瞄误差引起的接收光强起伏的概率密度可表示为:

$$P(0 \leq \tilde{I} \leq 1) = \frac{\alpha^2}{4\sigma_\varphi^2} \times I_0 \left[2 \sqrt{-\frac{(\alpha\omega)^2}{8\sigma_\varphi^4} \ln \tilde{I}} \right] \exp\left(\frac{\alpha^2}{4\sigma_\varphi^2} \ln \tilde{I} - \frac{\bar{\omega}^2}{2\sigma_\varphi^2}\right) \quad (10)$$

式中 σ_φ^2 为动态跟瞄状态下光轴偏差角的方差; $\tilde{I} = \exp[-2(\bar{\omega} + \varphi)^2/\alpha^2]$ 。

根据上述分析得出接收端归一化光功率与跟瞄误差和发散角关系曲面,如图 3 所示。从图中可以看出,降低跟瞄误差 φ 能较大提高激光通信终端探测器的接收光功率 P_r ; 在激光通信系统 ATP 跟瞄精度确定的情况下,合理的激光发散角设计亦能较大提升激光通信效能。

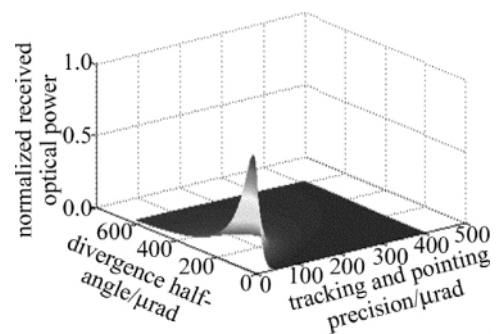


Fig. 3 Relationship among the normalized received optical power, tracking error and divergence angle

2 实验结果与分析

实验中选取了北京郊区相距 16km 的两个站点作为星地 ATP 关键技术的地面演示场地。光通信系统的发射端距地面约 15m,而接收端位于山坡的 3 层楼房内,距水平地面约 20m。链路靠近接收端有一段约 2000m 宽的湖面,其余地段地势平坦,光通信系统采用二进制开关键控(on-off keying, OOK)调制方式。如图 4 所示,实验系统主要组成部分为:光通信收/发射模块、信标光源、ATP 系统、光学发射接收天线、光电探

测器、信号放大器、LabVIEW 信号采集模块和工控机等。在实验中光发射机的平均出射光功率为 26dBm (每个波长为 23dBm), 波长为 1550nm, 发射口径 200mm, 发射系统和接收系统的系统损耗共为 6dB。激光通信发射机放置在移动仿真台上, 通过仿真台模拟不同速度、加速度下的目标运动状态。当通信系统开始工作后, 发射端发送同步信号, 并实时记录跟瞄误差; 通过时统信号, 接收端通过光纤耦合器将光信号耦合到光纤, 采用光电 PIN 二极管将光信号转换为电信号, 通过信号放大器放大后送至 LabVIEW 信号采集模块, 最后通过 PC 上位机编程实现对接收端光信号的实时分析, 从而测量跟瞄误差对接收通信机的通信性能影响。

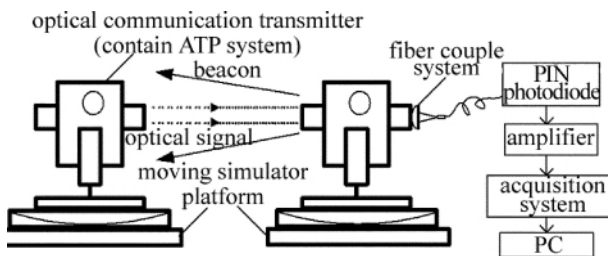


Fig. 4 Schematic diagram of the simulation experiment

图 5a 说明当通信链路未建立时, 探测信号为 0, 图中出现毛刺的现象是背景噪声干扰; 图 5b 为 ATP 系统对误差信号进行有效抑制, 进入稳定跟踪时段的时域信号分布, 可以看出, 系统虽然进入稳定跟踪, 由于跟踪误差 σ (均方根) = 80 μ rad, 因此光强起伏较大, 此时通信出现时断时续现象; 图 5c 说明震荡会严重影响系统的性能, 因此在进行伺服系统设计时, 应尽量进行各种传递函数的测试, 并进行大量物理实验, 尽量提高系统稳定裕度; 图 5d 中的 ATP 系统对误差信号进行有效抑制后实现 10 μ rad 跟踪精度, 实验测得接收端光强起伏明显减小, 此时通信链路建立。因此, 在激光

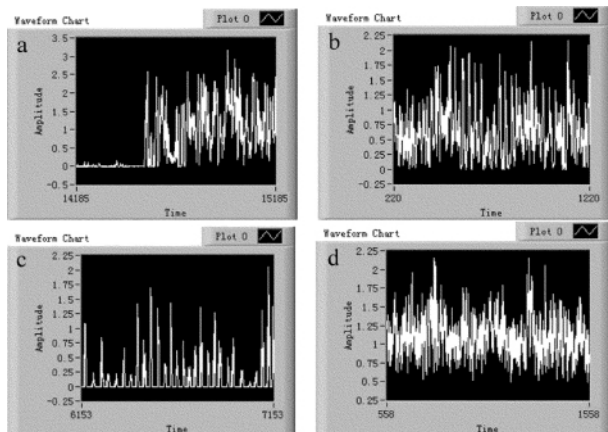


Fig. 5 Time-domain signal distribution before and after tracking error compensation
a—scanning-acquisition stage b—stable tracking stage ($\sigma = 80\mu\text{rad}$) c—shaking stage d—stable tracking stage ($\sigma = 10\mu\text{rad}$)

通信系统指标不变的前提下, 通过提高跟瞄误差可以较大提升光通信系统性能。

3 小结

结合目前国内外星地光通信已有的工程经验, 针对发射/接收口径 200mm、波长 1550nm 和通信距离 400km 的典型激光通信链路, 分析了跟瞄状态下的接收光强分布特性, 建立了相应的数学模型; 给出接收终端光功率极值状态下, 信号光束散半角与跟瞄误差的函数关系; 针对典型链路, 当束散半角大于 5 μ rad 时, 跟瞄误差与束散半角之比近似为 0.7。实验中采用 LabVIEW 技术对跟瞄误差补偿下接收光信号进行实时采集, 并通过上位机对采集信号进行实时分析, 给出相应的信号时序曲线。理论和实验结果表明: 星地光通信系统受到瞄准误差影响较大, 跟瞄误差过大将直接导致系统性能恶化, 严重时可能会造成通信链路中断。因此, 跟瞄误差的有效补偿和信号光束散角的合理设计对星地光通信链路保持起到较为重要的作用。

参考文献

- [1] SANDUSKY J V, JEGANATHAN M, ORTIZ G, *et al.* Overview of the preliminary design of the optical communication demonstration and high-rate link facility[J]. SPIE 3615, 1999: 185-191.
- [2] ARNON S, KOPEIKA N S, KEDAR D, *et al.* Performance limitation of laser satellite communication due to vibrations and atmospheric turbulence: down-link scenario [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2003, 21(6): 561-573.
- [3] AI Y, CHEN J, YE D M, *et al.* 2.3km 1.25Gb/s free space optical communication experiment [J]. Optical Communication Technology, 2007, 31(9): 55-57 (in Chinese).
- [4] LI X F. The principle and technology of the satellite-to-ground laser communication links[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 1-325 (in Chinese).
- [5] MA J, GAO Ch, TAN L Y, *et al.* Fade budgets of PAT link in satellite-to-ground optical communications [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(3): 309-313 (in Chinese).
- [6] RONG J, HU Y, ZHONG X Ch. Study of ATP accuracy and the optimum optical signal transmitting angle [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(2): 221-223 (in Chinese).
- [7] LIU J F, YU S Y, HAN Q Q, *et al.* Experimental research of time-averaging effect in space optical communication [J]. Laser Technology 2008, 32(1): 11-14 (in Chinese).
- [8] CHEN Ch Y, YANG H M, TONG Sh F, *et al.* Modeling and simulation of space link in space-to-land optical communication system [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(12): 2706-2719 (in Chinese).
- [9] LIU L R, WANG L J, LUAN Zh, *et al.* Mathematical and physical basis for pointing, acquisition and tracking testing of inter-satellite laser communication terminals [J]. Acta Optica Sinica 2006, 26(9): 1330-1334 (in Chinese).
- [10] LIU H Zh, LIU L R. Research of the optical coupling unit for the transmitting terminal of intersatellite optical communication system [J]. Laser Technology 2007, 31(4): 416-418 (in Chinese).