

文章编号:1004-4213(2010)01-0089-6

空地激光通信跟踪精度主要外界影响因素研究*

韩成^{1,2}, 白宝兴¹, 杨华民^{1,2}, 佟首峰², 范静涛^{1,2}, 于林韬², 朱一峰²

(1 长春理工大学 计算机科学技术学院 计算机科学与技术, 长春 130022)

(2 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要:为了分析空地激光通信外界因素对跟踪精度的影响情况,将平台振动、大气湍流和背景光三个主要影响因素归结到对跟踪精度影响的统一框架下进行了研究.使用实际测量得到的平台振动数据,建立空地激光通信跟踪仿真系统,分析了不同条件下,三种外界因素对跟踪精度的综合影响情况.在文中假设基础上,分析可知:粗跟踪单元可以较好的抑制地面运动平台的振动,保证激光能够进入精跟踪视场;中强度的湍流使精跟踪残差标准差增大 4 倍左右,如果试验地点选择在高海拔地区,大气湍流使精跟踪残差标准差增大 2 倍左右.

关键词:空地激光通信;跟踪精度;振动功率谱;大气湍流;背景光

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103901.0089

0 引言

自由空间激光通信具有抗干扰性强、传输距离远、传输速率高、保密性好等优点,因此受到各国的高度重视.捕获对准跟踪(Acquisition Pointing Tracking, APT)是自由空间激光通信的技术难点之一,APT系统的性能决定着是否能够建立稳定可靠的激光通信链路,进而影响整个激光通信的成败.跟踪精度是 APT 系统非常重要的技术指标,它反映了 APT 系统的跟踪性能,所以对跟踪精度影响因素的研究是非常有意义的.

APT 系统由捕获、对准、跟踪子系统组成,其中跟踪子系统通常由粗、精二级跟踪单元组成,因此跟踪精度也分为粗跟踪精度和精跟踪精度两部分.跟踪精度受平台振动、大气湍流、背景光等外部因素和跟踪系统的内部因素的影响,本文主要研究外部因素的影响.已有研究包括平台振动对 APT 系统的影响及抑制措施^[1-2],大气信道的仿真研究^[3-6],背景光对探测器和通信系统的影响研究^[7-8],但研究内容大多围绕误码率或针对卫星平台,所使用的功率谱主要是国外卫星的振动资料或随机模型,目前还没有关于地面运动平台的振动、大气湍流和天空背景光对跟踪精度影响的研究.

1 主要外界影响因素理论分析

1.1 平台振动

根据应用背景的不同,空间激光通信可以分为

星间光通信、星地光通信、空地光通信、空空光通信等,其中大多数激光通信系统搭载在运动平台上,如卫星,飞机等.运动平台的振动特性和跟踪系统对振动的抑制能力是影响空间激光通信跟踪精度的主要因素之一.平台的振动数据在设计之初,作为空间激光通信跟踪系统设计的依据,在设计后期,作为检验并优化跟踪系统的基础.

对于卫星、飞机等运动平台在设计研制的初期,很难给出其振动数据.因此对于这种平台振动曲线一般采用经验验证或参考数据,这在一定程度上降低了数据的可信度.在空地激光通信系统中,对于地面运动平台振动数据的获取相对来说比较容易,可以通过实际测量得到具有较高可信度的数据.本文使用在某地测量的一段地面运动平台的振动数据,使用经典功率谱估计中周期图法得到其振动功率谱,如图 1.从图 1 可以看出,地面运动平台的振动频谱从低频到 60 Hz 左右.

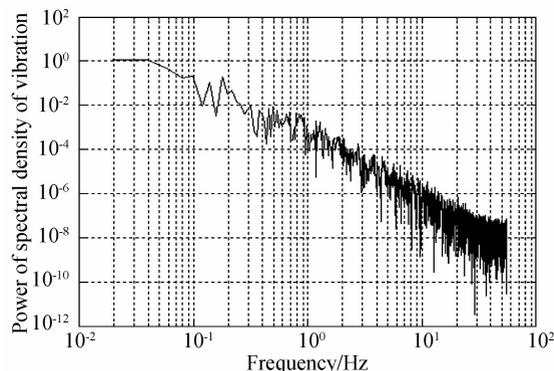


图 1 地面运动平台振动曲线

Fig. 1 Vibration curve of mobile platform on ground

1.2 大气湍流

在空地激光通信系统中,光波不可避免的要经

* 国家高技术研究发展计划资助

Tel:13756181966

Email:hancheng@cust.edu.cn

收稿日期:2008-12-19

修回日期:2009-03-14

过大气信道,大气信道存在许多温度和密度具有微小差异而折射率不同的涡旋元,当光束通过这些折射率不同的涡旋元时,产生光束的闪烁、散斑和扩展畸变等大气湍流效应,其中散斑效应和闪烁效应是影响空地激光通信跟踪精度的主要因素之一。

大气湍流散斑效应导致接收探测器上的光斑相位发生畸变,低频变化产生光斑漂移现象,高频变化产生光斑扩散现象,对于强湍流条件,甚至产生光斑破碎和光斑空洞现象。大气湍流散斑效应破坏了激光光斑的功率分布,影响光斑质心判读精度,进而降低跟踪精度。由此引起的跟踪误差可用光斑中心偏差的统计方差来表示,对于准直激光束,方差与链路距离 L 、接收口径 D 、大气折射率结构常数 C_n^2 的对应关系^[9]如式(1)。

$$\langle \rho_c^2 \rangle \approx 6.08 L^2 D^{-1/3} \int_0^L C_n^2(\eta) d\eta \quad (1)$$

大气湍流闪烁效应使远场光斑的功率在时域上和空域上产生比较强烈的波动,导致汇聚到探测器上光功率呈现较强烈波动,大大增加了光功率偏离平均功率的程度,从而影响粗、精跟踪探测器的信噪比,最终影响跟踪精度。在中、弱湍流条件下,对于平面波和球面波的空地激光传输的对数振幅起伏方差可分别由式(2)和式(3)表示。式中 λ 为波长, φ 为天顶角, L 为通信距离, z 为垂直坐标。在此基础上,由式(4)可得探测器接收到的光功率的变化量^[10],式中 p_r 为未受到湍流影响时的接收光功率。

$$\sigma_x^2 = 0.56 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} [\sec(\varphi)]^{11/6} \int_0^L C_n^2(L-z)^{5/6} dz \quad (2)$$

$$\sigma_x^2 = 0.56 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} [\sec(\varphi)]^{11/6} \int_0^L C_n^2(L-z)^{5/6} \cdot [z(L-z)/L]^{5/6} dz \quad (3)$$

$$\Delta p_r = p_r (e^{4\sigma_x^2} - 1) \quad (4)$$

1.3 背景光

空间激光通信系统可以由单片 CCD 作为粗精两级跟踪探测器,或采用两个 CCD 分别作为粗精跟踪探测器,也可采用粗跟踪用 CCD,精跟踪用四象限探测器(Quar Detector, QD)的形式。探测器的等效噪音角可以由式(5)得到^[11],式中 SNR 为探测器的信噪比, SF 为探测器斜率系数,对于 Airy 型光斑强度分布, SF 由式(6)给出,对于高斯型光斑强度分布, SF 由式(7)给出,式中 θ_{beam} 为光斑直径。

$$\text{NEA} = (\text{SF} \sqrt{\text{SNR}})^{-1} \quad (5)$$

$$\text{SF} = 4.14 / \theta_{\text{beam}} \quad (6)$$

$$\text{SF} = 1.27 / \theta_{\text{beam}} \quad (7)$$

在本系统中,粗跟踪采用 CCD 探测器,精跟踪采用四象限探测器,其中 CCD 信噪比可由式(8)表

示^[12],式中 N_s 为信号等效电荷数, N_B 为背景光信号等效电荷数, $N_{N\text{-RMS}}$ 为暗电流等效电荷数, $N_{N\text{-AD}}$ 为量化误差等效电荷数。QD 信噪比表达式如式(9)^[13],式中 P_r 为接收光功率, I_{BL} 为背景光电流, e 为电子电荷, B 为单侧接收机带宽, M 为被探测光子产生的载波数的平均值, x 为附加噪音指数, η 为量子效率, h 为普朗克常数, λ 为激光波长。

$$\text{SNR}_{\text{CCD}} = \frac{N_s}{\sqrt{N_s + N_B + N_{N\text{-RMS}}^2 + N_{N\text{-AD}}^2}} \quad (8)$$

$$\text{SNR}_{\text{OD}} = \frac{P_r \eta \lambda}{2hB(M^x + I_{\text{BL}})} \quad (9)$$

通过本文的分析可知,在空地激光通信中,天空背景光会引起粗、精跟踪单元所使用探测器的信噪比下降,进而导致跟踪精度降低。探测器接收到的天空背景光功率与天空背景光亮度谱密度 $\varphi(\lambda)$, 系统的接收口径 d 、接收视场角 θ 、窄带滤光片的带宽 $\Delta\lambda$ 有关,其表达式如式(10)^[12]

$$P_B = \varphi(\lambda) \cdot \frac{\pi}{4} \theta^2 \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \Delta\lambda \quad (10)$$

2 仿真系统组成和功能

根据前面理论分析的结果,建立空地激光通信跟踪仿真子系统,如图 2。从图 2 中可知,跟踪仿真系统由以下几部分组成:

1) 平台振动模型,如图 1,时间约为 1 分钟,用来模拟地面运动平台的振动情况,由于以实测数据为基础,所以模型有较高的可信度。

2) 粗跟踪单元模型主要由粗跟踪补偿函数模型、粗跟踪执行机构模型、CCD 模型组成,用来模拟粗跟踪单元以检验粗跟踪单元对于平台振动的抑制能力,以及大气湍流和背景光对 CCD 探测器的影响情况。粗跟踪补偿函数如式(11),传递函数如式(12)

$$D(s) = \frac{0.0056s^2 + 0.005s + 1}{0.02s^2 + 2.01s + 1} \quad (11)$$

$$G_C(s) = 800 / (2.5 \times 10^{-7}s^4 + 0.000305s^3 + 0.056s^2 + s) \quad (12)$$

3) 精跟踪单元模型主要由精跟踪补偿函数模型、精跟踪执行机构模型、QD 模型组成,用来模拟精跟踪单元以检验精跟踪单元对粗跟踪残差的抑制能力,以及大气湍流和背景光对 QD 探测器的影响情况。精跟踪单元的传递函数可等效成振荡环节,如式(13),补偿传递函数如式(14)。

$$G_F(s) = \frac{4710^2}{s^2 + 4710s + 4710^2} \quad (13)$$

$$D(s) = \frac{1.8 \times 10^4 \left(1 + \frac{1}{60}s\right) \left(1 + \frac{1}{750}s\right)}{s \left(1 + \frac{1}{5}s\right) \left(1 + \frac{1}{1000}s\right)} \quad (14)$$

4)背景光模型,用来模拟天空背景光,根据前面的分析可知,背景光会引起探测器信噪比的变化,从而影响跟踪精度.背景光模型可以作为分析背景光对跟踪精度影响情况的依据.

5)大气湍流模型,包括大气湍流散斑效应模型和大气湍流闪烁效应模型,此模型可以作为分析大气湍流对跟踪精度影响情况的依据.在此模型中使用 HV 型^[14]大气折射率结构常数,设海平面地区的

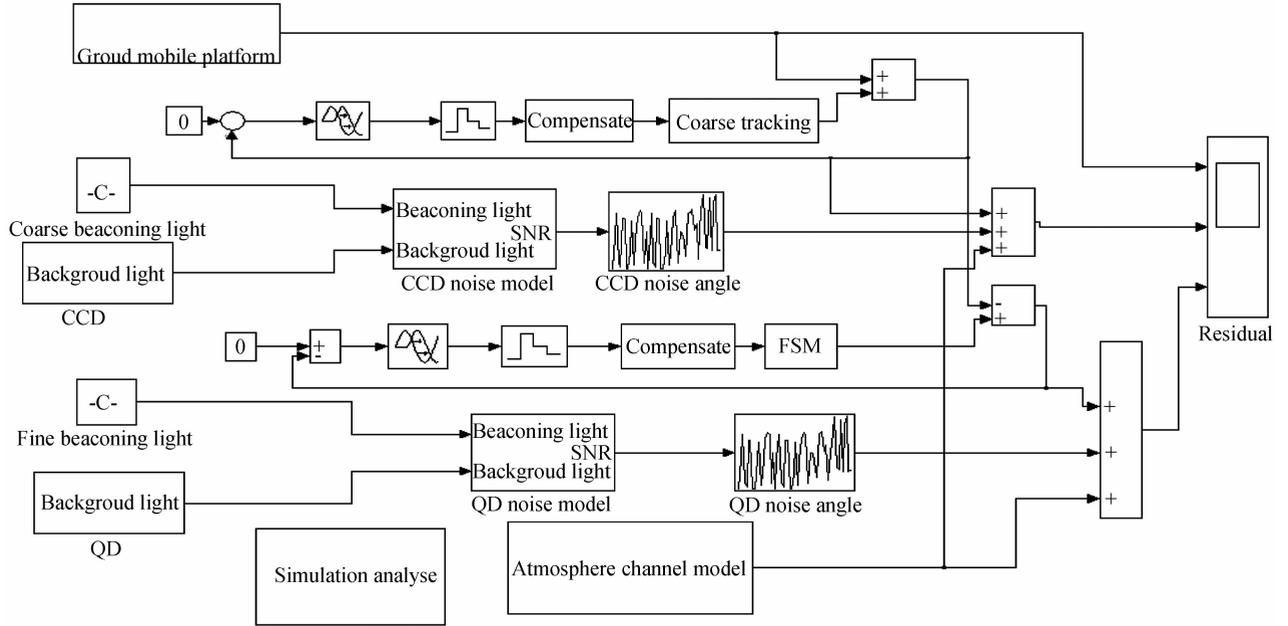


图2 空地激光通信跟踪仿真系统

Fig.2 Tracking simulation system of in space-ground laser communication

大气折射率结构常数为 $1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$,风速为 5 m/s ,折射率结构常数与海拔高度的关系如图 3 所示.

踪单元抑制后,得到的精跟踪残差的峰峰值在 $\pm 2 \mu\text{rad}$ 以内,精跟踪残差的标准差约为 $0.49 \mu\text{rad}$.

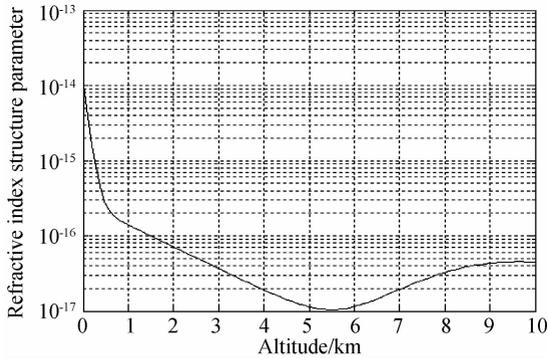


图3 HV 模型

Fig.3 HV model

6)仿真结果分析模型,用来对粗、精跟踪单元的残差进行统计,以检测粗、精跟踪单元的跟踪精度,通常跟踪精度由跟踪残差的标准差来表示.

3 仿真分析

跟踪仿真系统主要参数设置如表 1,在不考虑大气影响的情况下,运行跟踪仿真系统程序可以分别得到粗、精跟踪残差,残差的统计情况如图 4 和图 5,从图中可知,粗、精跟踪残差统计近似服从高斯分布,地面运动平台振动残差经过粗跟踪单元抑制后,得到的粗跟踪残差的峰峰值在 $\pm 300 \mu\text{rad}$ 以内,粗跟踪残差的标准方差约为 $85.40 \mu\text{rad}$;再经过精跟

表 1 仿真系统主要参数表

Table1 Main parameters of simulation system

Wavelength	1 550 nm
Altitude at ground	100 m
Propagation distance	20 km
Level inclination of link	10°
Field of Receive view	2 mrad
Receive aperture	120 mm
Field of coarse tracking view	2 mrad
Field of fine tracking view	0.3 mrad
Spectral density of brightness	$0.05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$
Elongation	20°
Bandwidth of narrow band filter	2 nm
Pixel numbers of CCD	256×256
Quantum efficiency	0.3
Equivalent output voltage of quantization noise	$141 \mu\text{V}$
Equivalent output voltage of each charge number	$3.45 \mu\text{V}$
Integration time of CCD	8 ms
Response sensitivity of CCD	7
Additional noise index of QAPD	0.4
Quantum efficiency of QAPD	0.8
Responsivity of QAPD	0.5 A/W

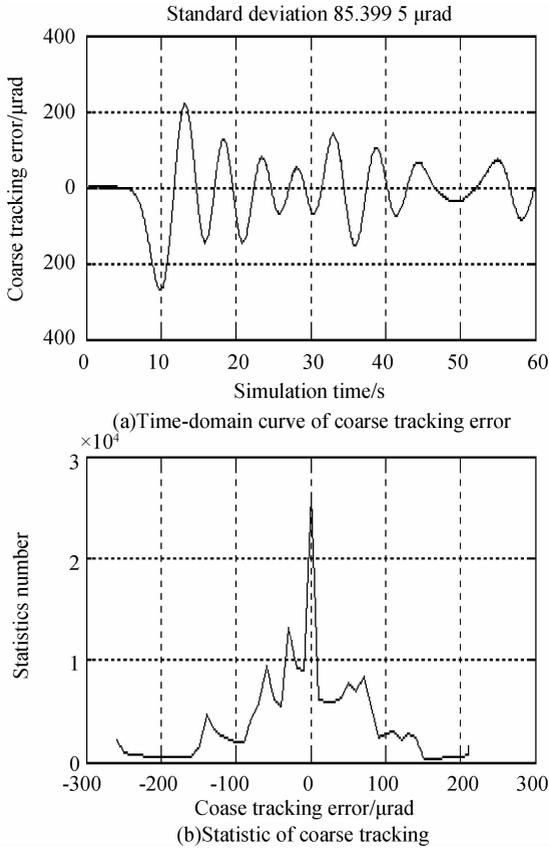


图 4 未受大气影响粗跟踪残差统计
Fig. 4 Statistic of coarse tracking error without atmospheric turbulence

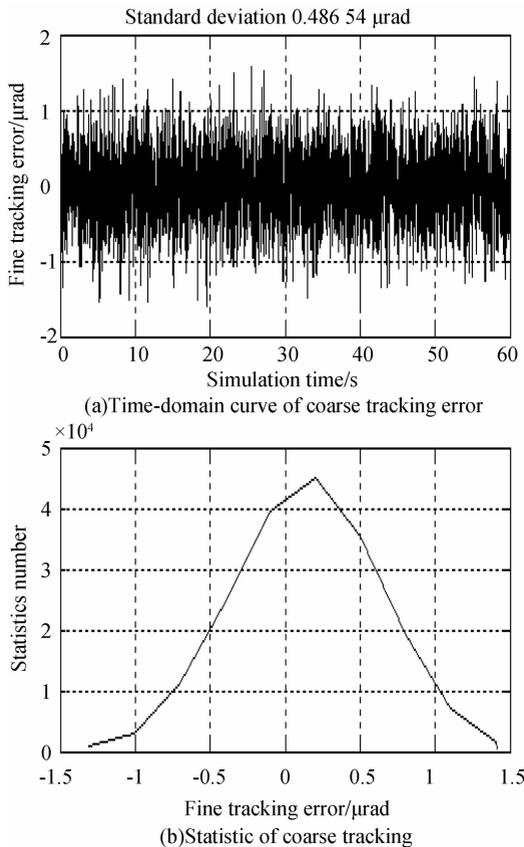


图 5 未受大气影响精跟踪残差统计
Fig. 5 Statistic of fine tracking error without atmospheric turbulence

考虑大气湍流的影响,设地面光端机所在地海拔高度为 100 m,其他条件不变,运行跟踪仿真系统程序可知粗跟踪残差变化不大;从图 6 可知,精跟踪残差的峰峰值在 $\pm 15 \mu\text{rad}$ 以内,精跟踪残差的标准差约为 $2.45 \mu\text{rad}$. 由此可知,在中、低强度湍流使得精跟踪残差增大 4 倍左右.

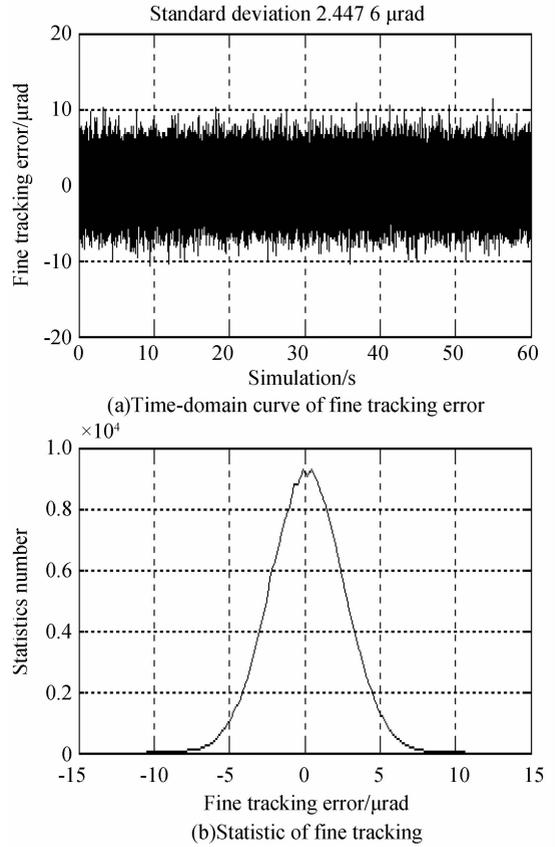
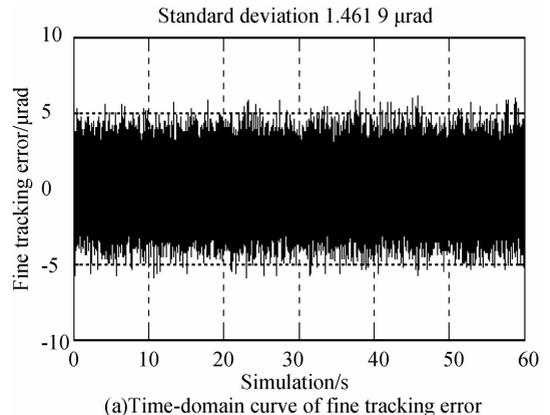


图 6 在 100 m 海拔高度地区试验精跟踪残差统计
Fig. 6 Statistic of fine tracking error at the region of altitude of 100 meters

考虑不同试验地点,设地面光端机所在地海拔高度为 3 km,其他条件不变,得到精跟踪残差统计情况如图 7,从图中可知,精跟踪残差的峰峰值在 $\pm 10 \mu\text{rad}$ 以内,精跟踪残差的标准差约为 $1.46 \mu\text{rad}$. 由此可知,试验地点的选取对空地激光通信跟踪精度的影响很大,应尽量选择高海拔高度地区作试验.



(a) Time-domain curve of fine tracking error

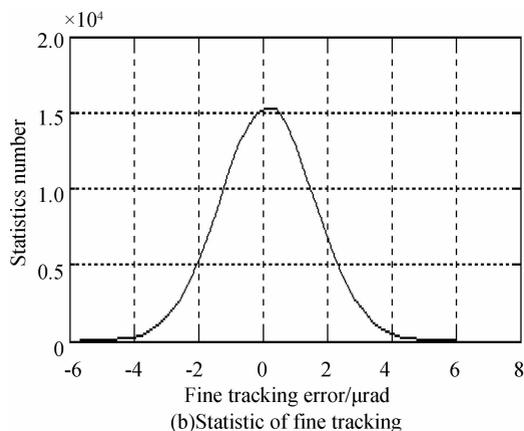


图7 在3 km海拔高度地区试验精跟踪残差统计图
Fig.7 Statistic of fine tracking error
at the region of altitude of 3 kilometers

4 结论

通过对空地激光通信跟踪精度主要影响因素的仿真分析可知,粗跟踪单元可以较好地抑制地面运动平台的振动,粗跟踪残差峰峰值在 $\pm 300 \mu\text{rad}$ 以内,不存在粗精耦合问题.在中强度湍流条件下,精跟踪残差的标准差是没有大气湍流情况的5倍左右,地面光端机所处的海拔高度对跟踪精度有很大影响,所以,在进行空地激光通信试验时,地面光端机应尽量放在高海拔的地区.

参考文献

- [1] LUO Tong, LI Xian, HU Yu. Vibration suppression in optical inter-satellite communications [J]. *Journal of Astronautic*, 2002, **23**(3): 77-80.
罗彤,李贤,胡渝.星间光通信中振动抑制的研究[J].*宇航学报*, 2002, **23**(3): 77-80.
- [2] TANZILLO J N, DUNBAR C B, LEE S. Development of a lasercom testbed for the pointing, acquisition, and tracking subsystem of satellite-to-satellite laser communications link [J]. *SPIE*, 2008, **6877**: 04-1-12.
- [3] LIU Yong-jun, HU Li-fa, CAO Zhao-liang, et al. Liquid crystal atmosphere turbulence simulator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1960-1963.
刘永军,胡立发,曹召良,等.液晶大气湍流模拟器[J].*光子学报*, 2006, **35**(12): 1960-1963.
- [4] XING Jian-bin, XU Guo-liang, ZHANG Xu-ping, et al. Effect of the atmospheric turbulence on laser communication system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1850-1852.
邢建斌,许国良,张旭苹,等.大气湍流对激光通信系统的影响[J].*光子学报*, 2005, **34**(12): 1850-1852.

- [5] JIA Hong-hui, CHANG Sheng-li, YANG Jian-kun, et al. Monte Carlo simulation of atmospheric transmission characteristics in non-Line-of-sight ultraviolet communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 955-959.
贾红辉,常胜利,杨建坤,等.非视线紫外通信大气传输特性的蒙特卡罗模拟[J].*光子学报*, 2007, **36**(5): 955-959.
- [6] LIANG Bo, ZHU Hai, CHEN Wei-biao. Equalization and Denoise Techniques for Optical Communication in Time-varied Band-limited Channel [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1195-1199.
梁波,朱海,陈卫标.时变带限信道中光通信的均衡与去噪技术[J].*光子学报*, 2008, **37**(6): 1195-1199.
- [7] KUANG Cui-fang, FENG Qi-bo, LIU Bin. Study on Background Light Influences on Four-quadrant Detector [J]. *Laser & Infrared*, 2004, **34**(6): 493-495.
匡萃方,冯其波,刘斌.背景光对四象限探测器干扰的研究[J].*激光与红外*, 2004, **34**(6): 493-495.
- [8] HEMMATI H, BISWAS A, DOROSON D M. 30-dB Data Rate Improvement for Interplanetary Laser Communication [J]. *SPIE*, 2008, **6877**: 07-1-8.
- [9] RAO Rui-zhong. Light propagation in the turbulent atmosphere [M]. Anhui: Anhui Science & Technology Publishing House, 2005: 261-269.
饶瑞中.光在湍流大气中的传播[M].安徽:安徽科学技术出版社, 2005: 261-269.
- [10] RONG Jian, CHEN Yan, HU Yu. Simulation Study of Optical Propagation in Turbulent Atmosphere [J]. *Wireless Optical Communications*, 2003, **11**: 44-46.
荣健,陈彦,胡渝.激光在湍流大气中的传输特性和仿真研究[J].*无线光通信*, 2003, **11**: 44-46.
- [11] ZHANG Bing-hua, ZHANG Shou-hui. Optical-electricity Imaging Tracking System [M]. ChengDu: Publishing House of University of Electronic Science and Technology of China, 2003: 157-158.
张秉华,张守辉.光电成像跟踪系统.成都:电子科技大学出版社, 2003: 157-158.
- [12] TONG Shou-feng, LIU Yun-qing, JIANG Hui-lin. Power analysis of APT coarse tracking link of free space laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(3): 322-325.
佟首峰,刘云清,姜会林.自由空间激光通信系统 APT 粗跟踪链路功率分析[J].*红外与激光工程*. 2006, **35**(3): 322-325.
- [13] FRANZ J H, JAIN V K. Optical Communications Components and Systems [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 153-170.
- [14] ANDREWS L, PHILLIPS R, HOPEN C. Laser beam scintillation with applications [C]. *SPIE*, 2001.

Primary Environment Influence Factors to Tracking Precision in Space-ground Laser Communication

HAN Cheng^{1,2}, BAI Bao-xing¹, YANG Hua-min^{1,2}, TONG Shou-feng²,
FAN Jing-tao^{1,2}, YU Lin-tao², ZHU Yi-feng²

(1 *Department of School of Computer Science and Technology, School of Computer Science Technology,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

(2 *Key Laboratory of Technology of Photo-electronic Measure-control and Laser transfers,
Ministry of Education, Changchun 130022, China*)

Abstract: In order to analyze influence of the external factors to the tracking precision of space-ground optical communication, the platform vibration, atmospheric turbulence, and background light are studied, and can be attributed to the influence of tracking precision. Tracking simulation system is founded on the basis of measured platform vibration data. The composite influence of various factors to tracking precision is analyzed under different conditions. Based on the assumptions, coarse tracking can well suppress the vibration of mobile platform on ground and ensure that laser beam can enter fine tracking field; the middle atmospheric turbulence increases the standard deviation of fine tracking error to about four times; if low altitude area is selected as examination spot, atmospheric turbulence will increase standard deviation of fine tracking error to about two times.

Key words: Space-ground laser communication; Tracking precision; Power of spectral density of vibration; Atmospheric turbulence; Background light



HAN Cheng was born in 1978. He is a Ph. D. degree candidate, and his research interests focus on the simulation of free-space laser communication system and design of total control system in free-space laser communication system.



BAI Bao-xing was born in 1953. He is a professor, Ph. D. supervisor. His main interest is the computer simulation.