

大气湍流对高速激光通信影响模拟实验研究

付 强¹ 姜会林¹ 曾宗泳² 王晓曼¹ 刘 智¹

(¹长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022)
(²中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要 分析了大气湍流对高速激光通信影响的研究方法、现状及必要性,建立了高速激光通信用大气湍流模拟装置,提出了大气湍流对高速激光通信影响的模拟实验方案,采用实验室内半实物模拟的方法,利用大气湍流模拟装置模拟中弱强度的湍流,搭建激光传输实验系统,并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,结果表明,该大气湍流模拟装置的光强闪烁、到达角起伏符合 $-5/3$ 理论,光强闪烁、到达角起伏是影响激光通信性能的主要因素,为深入研究大气湍流对高速激光通信影响提供了有效手段和方法,最后对大气高速激光通信未来的发展方向进行了展望。

关键词 大气湍流;高速激光通信;误码率;光强闪烁

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s105007

Research on Influence of Atmospheric Turbulence for Laser Communication at High Data Rate by Simulation Experiments

Fu Qiang¹ Jiang Huilin¹ Zeng Zongyong² Wan Xiaoman¹ Liu Zhi¹

¹*Institute of Space Photoelectric Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

²*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China*

Abstract Research methods, the present situation and the necessity for the influence of high data rate laser communication in atmospheric turbulence are analyzed, a simulation device of high data rate laser communication in atmospheric turbulence is established, the simulation experiments programme for the impact of laser communication in the atmospheric turbulence, tested scintillation and the arrival angle fluctuation are put forward. The results show that the atmosphere turbulence simulator irradiance scintillation, the arrival angle fluctuation theory consistent with the $-5/3$. Scintillation and the arrival angle fluctuation are the main factor to the performance of laser communication. Provided the effective means and method for the further studying effect of high data rate laser communication in the atmospheric turbulence. At the end, development direction in the future is prospected.

Key words atmosphere turbulence; laser communication at high data rate; bit error rate; scintillation

OCIS codes 010.1300; 010.1330; 010.1320

1 引 言

随着光学仪器的高分辨率、宽幅盖、高实时性和多传感器复合等方向发展,其原始数据的传输速率高达几十吉比特每秒量级。而当前射频通信的通信

速率已经接近理论极限,不能直接满足传输速率的要求。海量数据不能快速传递与应用,进而阻碍了现代信息化的发展。因此,迫切需求超大容量、超带宽信息传输。由于空间激光通信具有高速、宽带、抗

收稿日期: 2011-08-14; **收到修改稿日期**: 2011-10-24

基金项目: 国防科技工业局基础预研项目(A3620080230)资助课题。

作者简介: 付 强(1984—),男,博士研究生,主要从事激光大气传输特性及激光通信等方面的研究。

E-mail: strich@sina.com

导师简介: 姜会林(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事激光通信、光学设计和仪器总体设计等方面的研究。

E-mail: HLJiang@cust.edu.cn

干扰、抗截获和轻小型等一系列优点,已成为解决微波通信瓶颈、构建天基宽带网、实现海量数据实时传输的有效手段,具有很大的民用和军事应用潜力。然而,大气湍流运动使大气折射率具有随机起伏性质,导致传输光波的强度和相位在时间和空间上都呈现随机起伏,造成光束在大气传输时产生光强闪烁、到达角起伏、光束漂移、光斑扩展、相位畸变和光能损失等现象,严重影响了激光通信系统的稳定性和可靠性,各种信道地面-GEO、地面-LEO、临近空间、飞行器之间都存在大气问题急待解决^[1,2]。本

文采用模拟实验的方法,建立高速激光通信用大气湍流模拟装置,利用模拟装置对高速激光通信中光强闪烁、到达角起伏等影响进行测试,最后对高速大气激光通信的发展方向进行展望。

2 国内外现状

通过近 30 年的理论研究、仿真模拟、关键技术攻关、原理样机研制、地面演示验证和多个链路的在轨试验,空间激光通信领域发展迅速,典型空间激光通信试验如表 1 所示。

表 1 典型的空激光通信试验

Table 1 Experiments of typical space laser communication

Link type	System	Terminal	Nation and Time		
1	LITE		USA 1994	220 Mb/s	
2	SILEX	SPOT4 artemis	ESA 2001	50 Mb/s	
3	LUCE	Artemis OICETS	Japan ESA 2005	Receive 2.048 Mb/s	
				Sent 50 Mb/s	
4		NFIRE TerraSAR-X	USA Germany 2008	5.65 Gb/s	
5	Satellite-plane	LOLA	Artemis Mystery 20 plane	France 2006	50 Mb/s
6		LCE	ETSVI	Japan 1995	1.024 Mb/s
7		LCT	STRV2	USA 2000	155 Mb/s 1.24 Gb/s
8	Satellite-ground	LUCE	Artemis	Japan ESA 2003	2.048 Mb/s
					Receive 2.048 Mb/s
9		LUCE	OICETS	Japan 2006	Sent 50 Mb/s
10	Plane-plane		T-plane	USA 1999	600 Mb/s
11	Plane-ground			USA 1996	1 Gb/s
12	Airship-ground			Germany 2005	Receive 270 Mb/s,
					Sent 1.25 Gb/s
13	Ground-ground	OCD		USA 1998	40~500 Mb/s
14	Satellite relay plan		Alphasat	ESA 2013	2 Gb/s
15	Space group plan	TSAT		USA 2016	10~40 Gb/s

激光在大气信道中进行传输时,与信道中的各种微粒发生相互作用,产生吸收和散射效应造成能量的衰减,同时大气湍流使得接收端产生光强闪烁、光束弯曲和漂移、扩展以及光斑畸变等现象,对空间激光通信系统的性能产生严重影响。对于能量衰减,通常选择发射波长在“大气窗口”范围内,这样可以减小由于大气造成的损耗。研究大气湍流对空间激光通信影响的主要方法有理论仿真、外场实测、模拟实验。

在理论仿真方面,美国、欧空局、日本等国家在大气折射率结构常数方面,1995 年以前广泛使用 HV、HV21 等模型进行数值仿真计算,在 1995 年以后广泛使用气象参数模型进行估算及研究^[3]。在大气相干长度方面,主要对部分相干光、偏振光、平顶光束、环形光束等进行理论仿真研究^[4]。

在外场实测方面,中国科学院安徽光学精密机械研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、长春理工大学等单位在合肥、云南、西安、长春等地进行了大气湍流参数、激光传输影响的实地测量,得到了一些有意义的结果,其中安徽光学精密机械研究所利用实际测量数据研制了针对我国的大气计算程序——光四维软件。

在模拟实验方面,美国、日本等国外激光通信发展国家研究全面而深入,如马里兰大学研制的充液式大气湍流模拟装置、科罗拉多大学研制的充气式大气湍流模拟装置、阿拉巴马大学研制的液晶湍流模拟装置、莫斯科大学研制的变形镜模拟装置等^[5~8]。国内刚刚开始研究,仅中国科学院安徽光学精密机械研究所、中国科学技术大学、中国科学院长春光学精密

机械与物理研究所、长春理工大学等单位进行了一些研究^[9,10]。模拟装置及实验具有重复性好、均匀性好、简单易控等优点,可以模拟不同区域、不同高度、不同时间、不同气象的湍流情况,因此研究高速激光通信用大气湍流模拟装置及其模拟实验具有需求牵引、技术支撑的重要研究意义。

3 大气湍流模拟装置原理及组成

大气湍流模拟装置具有可模拟大气湍流光学特性的性能特点,其基本原理为流动的相似性,即当流动具有相似的几何边界条件,且雷诺数相同,那么即使尺寸的大小或者速度不同,甚至流体本身不同,它们在动力上都是相似的。模拟装置如图 1 所示,主要由池体、加热系统、冷却系统、测温系统、自动控制系统等五部分组成。池体:由耐高温隔热板作为保温材料,减少系统侧面与外界的热交换。池底平板为加热面板,池顶平板为水冷箱,池体两端为直径 200 mm 的通光孔径;窗口:平面透镜,光学玻璃材质,厚度 10 mm,直径 210 mm。加热面:通电使加热面温度均匀分布,并有足够高的温度,以产生足够强的湍流。冷却面:通过自来水双向流动,使冷却面温度分布均匀稳定温度保持在稳定水平来实现。测温系统:实时采集并记录装置各部分的温度;自动控

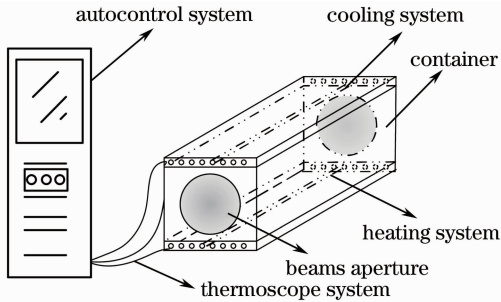


图 1 大气湍流模拟装置基本方案图

Fig. 1 Basic scheme of simulation device for the atmospheric turbulence

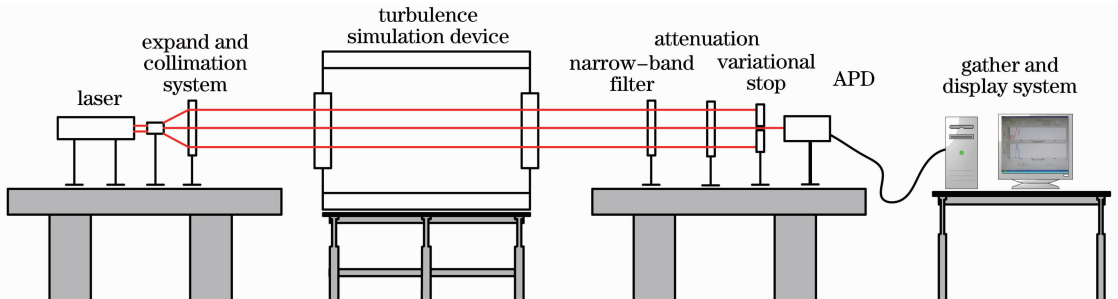


图 3 光强闪烁测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of scintillation measurement

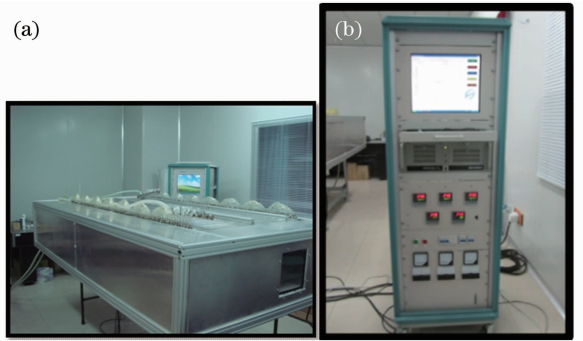


图 2 (a)大气湍流模拟装置;(b)自动控制系统实物图
Fig. 2 (a) Simulation device of atmospheric turbulence;

(b) physical map of automatic control system
制系统:适时调整加热系统形成闭环控制^[11]。大气湍流模拟装置及自动控制系统实物如图 2 所示。

系统工作时,首先通过自动控制系统计算机界面输入要模拟的大气湍流参数,如大气相干长度 r_0 ,总控软件计算所需温差及所需加热功率,然后加热面开始工作,测温系统适时采集装置各部分实际温差,并进行适时调整直至形成稳定的模拟湍流,整套系统形成闭环系统。

4 实验方案

4.1 光强闪烁频谱及均匀区域测量

1) 光强闪烁频谱

湍流对光传输最重要的影响之一就是造成光强起伏,即光闪烁,可以用光强起伏方差来表示^[12]

$$\sigma_I^2 = \left(\frac{I - \bar{I}}{\bar{I}} \right)^2, \quad (1)$$

式中 I 为瞬时光强, \bar{I} 为平均光强。考虑接收透镜的孔径平滑。接收光阑的直径必须远远小于光路的菲涅耳长度,才能避免孔径平滑作用。将光强起伏的时间相关函数做傅里叶变换即可得到光强闪烁功率谱。光强闪烁测量示意图如图 3 所示,APD 为角位置数字转换器。

2) 均匀区域

湍流池在垂直方向上的尺度较小,对流边界层的厚度、外界干扰决定了均匀区域的大小,消除外界干扰才能得到最大的均匀区域。所谓均匀,指的是在湍流池中心区域表征湍流特征参数大致不变,有利于现有光传输理论直接应用。因此,最为方便的方法就是测量光束穿过通光孔不同位置的闪烁强度。

当使用小孔接收闪烁信号时,可能因为光斑光强分布不均匀,接收位置改变引起闪烁强度的变化很大,只有加大接收孔径到 1 mm 以上,记录的闪烁强度才不和接收位置有关。大接收孔径的平滑作用使得闪烁强度进一步减小。为了得到较高的信噪比,除了选用适当的孔径外,采用低噪声的激光器是需要的。

4.2 到达角起伏频谱及大气相干长度 r_0 测量

1) 到达角起伏频谱

到达角起伏的测量被广泛应用于湍流大气的光传输研究。湍流池湍流强度的指标 r_0 可以通过到达角起伏方差 $\overline{\alpha^2}$ 得到:

$$r_0 = 3.18D^{-1/5} k^{-6/5} (\overline{\alpha^2})^{-3/5}, \quad (2)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, D 为透镜直径。到达角起伏方差是通过成像系统在焦平面上像点质心运动计算得到的^[13]。同时也可以计算出相应的频谱。

2) 大气相干长度 r_0

系统由 He-Ne 激光器经过扩束准直系统后,进入湍流池,光束穿过池体内部湍流介质后,到达池体外部的接收望远镜,光束聚焦于四象限探测器探测面上,由模/数(A/D)采样光斑抖动方位值,经过计算得到光斑漂移方差,进而计算相干长度和到达角起伏。测量原理图和示意图如图 4,5 所示。

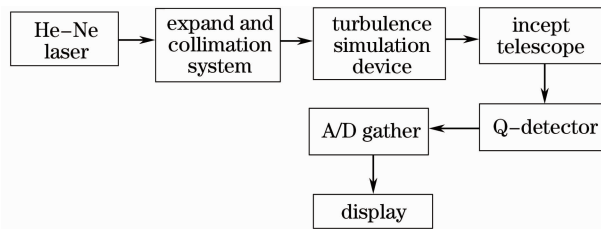


图 4 相干长度和到达角测量系统

Fig. 4 System of coherence length and angle of arrival measurement

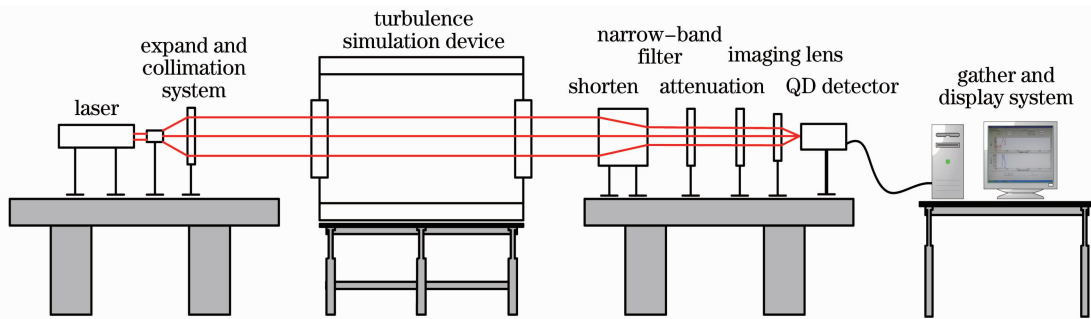


图 5 到达角起伏测量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the arrival angle fluctuation measurement

5 结果分析

5.1 光强闪烁

激光器使用 He-Ne 激光器,He-Ne 激光器产生的激光相干性较好,按图 3 所示搭建好光路,设定加热温差为 200°,启动系统进行加热直到上下平板实际温差稳定在 200°左右,启动光电倍增管对应的 A/D 采样程序进行测量,采样频率为 1 kHz,单次测量时间为 10 s,测量时间过长可能会引入更多的低频噪声,测量次数为 3~5 次,根据测量数据做出相应的闪烁频谱图,根据闪烁频谱图得到强度频率范围。

5.2 均匀性测试结果

不同位置点对应的闪烁强度方差如图 6 和表 2

所示,其中图 6 纵坐标表示归一化后功率。数据分

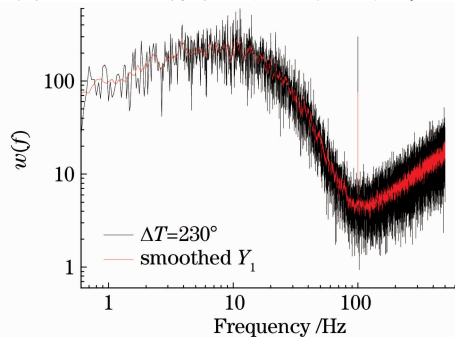


图 6 230°温差时闪烁频谱及 11 点平滑结果

Fig. 6 Scintillation spectrum and 11 point smoothing results at temperature of 230°

析结果表明,各个点的方差平均值的波动不超过15%,均匀性测试结果(见图7)显示,在16 cm边长的方形区域内,闪烁频谱方差小于15%(-11.64%~

10.13%),因此方形区域16 cm×16 cm中的湍流是均匀的。

表2 不同位置点对应的闪烁强度方差

Table 2 Intensity variances corresponding to different points

Distance	80	70	50	0	-50	-70	-80
North	0.032	0.030	0.030	0.029	0.031	0.031	0.032
Middle	0.029	0.033	0.028	0.029	0.032	0.031	0.034
South	0.027	0.031	0.030	0.033	0.031	0.034	0.033

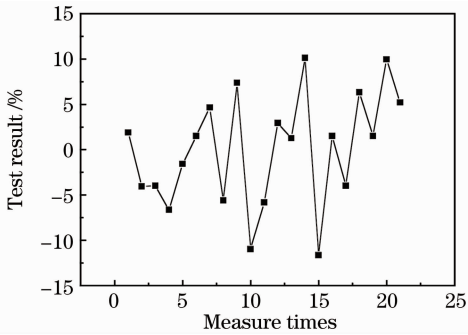


图7 均匀性测试结果

Fig. 7 Uniformity test results

5.3 到达角起伏频谱测量结果

当湍流模拟装置的池内温差为199.8°时,到达角起伏频谱的测量结果如图8所示。结果表明,当温差为199.8°时,湍流模拟装置可模拟的到达角起伏峰值频率可以达到100 Hz,平均频率为50~60 Hz,且模拟的到达角起伏频谱符合-5/3定律。

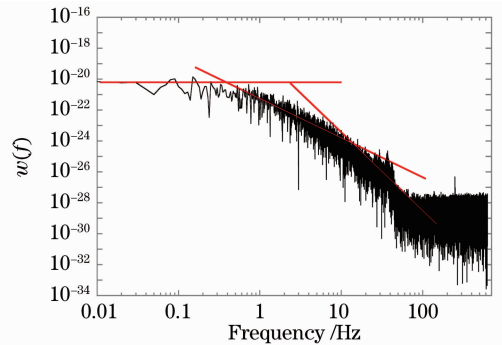


图8 温差199.8°到达角起伏频谱测量结果

Fig. 8 Arrival angle fluctuation spectrum measurements

at temperature of 199.8°

5.4 不同温差下的相干长度测量

每个温度差统计3个点,每个点取100 s平均,表3为3点平均结果。结果表明,该湍流装置可以模拟的大气相干长度有效范围取为8~20 mm。

表3 不同温差下测量相干长度

Table 3 Coherent length measurements of difference temperatures

$\Delta T / ^\circ\text{C}$	5.0	9.6	20.0	38.1	80.1	99.6	149.8	199.8
r_0 / mm	241.75	119.08	53.26	29.45	15.25	12.06	9.50	7.97

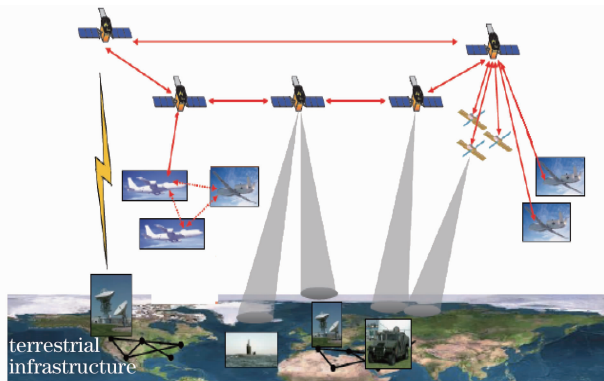


图9 美国“TSAT”全球通信组网计划的构想

Fig. 9 United States "TSAT" global communication network plan

6 结论与展望

大气高速激光通信领域呈现出2个技术发展趋势:

1) 通信速率越来越高。从表1可以看出,单传输链路带宽,实现海量数据的高保密、抗干扰大容量实时传输。2) 从点对点通信向光通信组网迈进。采用组网方式,实现陆海空天一体化信息网络,可提高信息的实时性和利用率。美国、日本、欧空局的未来空间激光通信规划中,已经将构建空天信息网确立为主要研究内容^[14,15](图9)。其中用于研究大气湍流影响的模拟装置也呈现出2个技术发展趋势: 1) 由湍流产生原理型装置向影响等效型装置过渡,如液晶、相位屏、变形镜等模拟装置。2) 由单参数模拟到多参数模拟,由静态模拟到动态模拟,建立多参数综合动态大气环境模拟设备。因此开展多参数综合动态大气环境模拟研究是非常必要的。

参考文献

1 V. I. Tatarski. Wave Propagation in a Turbulent Medium[M].

- Wen Jingson Transl. Beijing: Science Press, 1978. 148
塔塔尔斯基. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景嵩译. 北京: 科学出版社, 1978. 148
- 2 Zhou Xiuj. Advanced Atmospheric Physics[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991. 290
周秀骥. 高等大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1991. 290
- 3 Zhou Liwei. Adaptive Optics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996. 27~33
周立伟. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996. 27~33
- 4 Li Xiaofeng. Satellite to Ground Laser Communication [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. 15~45
李晓峰. 星地激光通信[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 15~45
- 5 T. S. Taylor. Turbulence simulation and optical processing through turbulence media[C]. *SPIE*, 1997, **3073**: 404~415
- 6 A. K. Majumdar, J. A. Diabaldo. Laboratory simulation of atmospheric turbulence for laser propagation; design and characterization[C]. *SPIE*, 1998, **3432**: 50~56
- 7 C. C. Davis. Characterization of a liquid-filled turbulence simulator[C]. *SPIE*, 1998, **3432**: 38~49
- 8 S. S. Chesnokov, I. V. Davletshina. Laboratory simulation of large-scale wavefront distortions in turbulent atmosphere[C]. *SPIE*, 1996, **2771**: 215~219
- 9 Xiao Liming, Ma Chengsheng. The design and properties of convective turbulence cell[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1996, **16**(1): 86~89
肖黎明, 马成胜. 对流湍流发生池的设计与性能[J]. 量子电子学报, 1999, **16**(1): 86~89
- 10 Lifa Hu, Li Xuan, Zhaoliang Cao *et al.*. A liquid crystal atmospheric turbulence simulator [J]. *Opt. Express* 2006, **14**(25): 11911~11918
- 11 Zhang Ju, Zeng Zongyong. Optical structure of Fried's coherence length in the convective turbulent tank[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(12): 1790~1795
张 骏, 曾宗泳. 对流湍流池 Fried 相干长度的光学结构[J]. 光学学报, 1996, **16**(12): 1790~1795
- 12 S. F. Clifford. Temporal-frequency spectra for a spherical wave propagating through atmospheric turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**(10): 1285~1292
- 13 Y. Cheon, U. Hoheriter, Behn Mario *et al.*. Angle-of-arrival anemometry by means of a large-aperture Schmidt-Cassegrain telescope equipped with a CCD camera[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(11): 3478~3492
- 14 Hemmati. Status of free-space optical communications at JPL [C]. California: Aerospace Conference Proceedings, 2000. 101~105
- 15 I. F. Akyildiz, O. B. Akan, C. Chen *et al.*. InterPlaNetary internet; state of the art and research challenges [J]. *IEEE Communication Magazine*, 2004, **42**(7): 108~118

栏目编辑: 李文喆