

基于差分像运动法的机载平台大气湍流参数测量

张雷^{1,3}, 赵馨^{2*}, 佟首峰^{1,3}, 李勃¹, 姜会林^{1,3}

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;

³ 长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

摘要 大气湍流参数是评价大气信道对空间激光通信系统性能影响的重要依据。根据机载平台的运动特点,采用差分像运动法并利用夏克-哈特曼传感器与指向、捕获、跟踪伺服单元等设备,在加格达奇地区开展了不同海拔高度下大气湍流参数的分层测量实验。结果表明,在Kolmogorov湍流条件下,该地区日间大气湍流强度随海拔高度的增加而减弱,并在该变化趋势上叠加了大气湍流强度的随机起伏;大气覆盖逆温层顶层海拔高度范围为2.2~2.8 km,海拔高度为3.5 km的大气相干长度的变化范围为10~26 cm。该研究为机载激光通信系统的性能分析提供了重要的参考。

关键词 大气光学; 空间激光通信; 大气湍流; 机载平台; 差分像运动法; 夏克-哈特曼传感器

中图分类号 P427.1; TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0304002

Measurement of Atmospheric Turbulence Parameters on Airborne Platform Based on Differential Image Motion Method

Zhang Lei^{1,3}, Zhao Xin², Tong Shoufeng^{1,3}, Li Bo¹, Jiang Huilin^{1,3}

¹ School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

³ Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aero and Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Atmospheric turbulence parameters are the important bases to evaluate the effect of atmospheric channel on space laser communication system performance. According to the motion characteristic of airborne platform, the atmospheric turbulence parameter stratified measurement experiments are carried out at different altitudes in Jagdaqí area with the differential image motion method, and these experiments are combined with Shack-Hartmann sensor and pointing, acquisition, tracking servo units. Results show that the daytime atmospheric turbulence intensity in this region reduces with the increase of altitude, and random fluctuation of atmospheric turbulence intensity is superimposed on the changing trend under the condition of Kolmogorov turbulence. The range of top layer altitude of atmospheric capping inversion layer is 2.2-2.8 km. At the altitude of 3.5 km, the atmospheric coherence length varies from 10 cm to 26 cm. The study provides an important reference for the performance analysis of airborne laser communication system.

Key words atmospheric optics; space laser communication; atmospheric turbulence; airborne platform; differential image motion method; Shack-Hartmann sensor

OCIS codes 010.1330; 060.2605; 010.1290

收稿日期: 2016-10-20; **收到修改稿日期:** 2016-11-27

基金项目: 教育部博士点基金(20132216110006)

作者简介: 张雷(1980—),男,博士研究生,讲师,主要从事空间激光通信、大气参数测量等方面的研究。

E-mail: zhanglei_cust@163.com

导师简介: 佟首峰(1972—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事空间激光通信、光电检测等方面的研究。

E-mail: tsf1998@sina.com

* **通信联系人.** E-mail: gps.ins@163.com

1 引 言

近年来,空间激光通信技术发展迅速。机载激光通信系统具有体积小、带宽大、保密性好、抗干扰能力强、系统组网方便等特点,在民用及军事领域具有广阔的应用前景^[1]。当激光通信链路经过大气信道时,激光信号因受到大气的散射与吸收而衰减,随机变化的大气湍流强度引起大气折射率的随机起伏,破坏了激光光波的相干性,造成接收系统的信噪比降低、误码率增大,甚至使通信中断^[2]。准确、有效地测量大气湍流参数,对空间激光通信系统在实际工程中的应用具有重要意义。

关于大气湍流参数的测量,尤其是针对近地大气信道参数的测量,迄今为止研究人员已经开展了大量的理论与实验研究,这些研究主要包括光波的强度起伏、相位起伏、到达角起伏及一定光程条件下的光束扩展、漂移与大气湍流参数之间的关系^[3-4]。王红星等^[5]利用大孔径闪烁仪开展了近海面大气湍流中准直高斯光束的光斑扩展实验;汪建业等^[6]在 1 km 水平路径上分别利用光强闪烁法与差分像运动法(DIMM)测量了大气相干长度,验证了 DIMM 测量水平大气湍流参数的可行性;孙刚等^[7]利用温度脉动探空仪对不同高度的大气折射率结构常数进行了测量,统计分析了大气湍流参数随高度分布的日变化特性;郭洁等^[8]利用差分像移激光雷达测量了随高度分布的大气湍流廓线,该测量方法具有较高的空间分辨力。

在近地面或水面等地表环境下通过固定测量点进行大气湍流参数测量的方案已经相对成熟^[9]。在机载激光通信实验过程中,飞行平台始终处于运动状态,加上平台自身的抖动,造成光束收发双端光轴不易对准,严重影响了测量结果。为解决这一问题,本文利用机载指向、捕获、跟踪(PAT)伺服单元与夏克-哈特曼(S-H)传感器等设备搭建了机载大气湍流测量系统^[10-11],基于 DIMM 测量原理开展了飞行平台间水平大气信道湍流参数测量实验,测试并分析了不同海拔高度、不同飞行时段的大气湍流数据。

2 DIMM 测量原理

1960 年,利用 DIMM 测量大气湍流参数的方法被提出^[12],通过测量同一波前上不同点的到达角相对起伏得到大气相干长度 r_0 。这种方法对光源能量起伏和测量设备自身的平台抖动都不敏感,可以较好地应用于动态测量系统。

利用带有微透镜阵列的 S-H 传感器并采用 DIMM 来测量 r_0 。非常方便,如图 1 所示,设微透镜阵列的子孔径直径为 D ,序号分别为 i 和 j 的 2 个子孔径中心距离为 d ,其中心连线横向 x 轴与径向 y 轴上的到达角方差 σ_x^2 、 σ_y^2 可分别表示为^[13]

$$\sigma_x^2 = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} (0.179D^{-1/3} - 0.0968d^{-1/3}), \tag{1}$$

$$\sigma_y^2 = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} (0.179D^{-1/3} - 0.145d^{-1/3}), \tag{2}$$

式中 λ 为光波波长。根据文献^[13]的实验结论,DIMM 测量装置两孔径的中心距 d 应大于 D 的 2 倍,针对 S-H 传感器的特点^[14],此处选择 $d = 7D$ 。

令 $\langle \sigma_{xy}^2 \rangle = \langle \sigma_x^2 \rangle + \langle \sigma_y^2 \rangle$,则大气相干长度 r_0 可以表示为^[15-16]

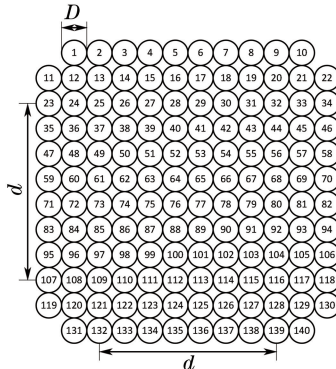


图 1 S-H 传感器微透镜阵列排列示意图

Fig. 1 Diagram of S-H sensor micro-lens array arrangement

$$r_0 = \left[\frac{2f^2 \lambda^2 (0.697D^{-1/3} - 0.484d^{-1/3})}{\langle \sigma_{xy}^2 \rangle} \right]^{3/5}, \quad (3)$$

式中 f 为接收系统的焦距, $\langle \sigma_{xy}^2 \rangle$ 为大气湍流引起的到达角起伏方差。

基于 Kolmogorov 湍流理论, 在弱起伏条件下, 传播路径均匀时水平链路的大气折射率结构常数可表示为^[17]

$$C_n^2 = (0.423k^2 r_0^{5/3} L)^{-1}, \quad (4)$$

式中 k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$; L 为总光程。

3 测量系统组成与实验方式

3.1 系统组成与参数选择

机载飞行与地面固定测试平台的测量环境有较大不同, 飞机高速飞行时空气与保护罩表面相互作用, 形成一个密度和温度分布不均且不断变化的大气附面层, 对光学系统造成像模糊、光偏移、像抖动等影响, 通过增加补偿透镜等方法可以有效抑制这些影响^[18]。同时, 平台自身低频扰动严重, 接收端光斑抖动剧烈, 造成 S-H 传感器子孔径阵列中无效测量单元增多, 降低了系统测试效率, 甚至造成测试中断。因此, 需要增加 PAT 伺服单元来抑制低频扰动, 保证激光发射端与接收端的光轴对准。

机载水平大气湍流参数测量系统示意图如图 2 所示, 系统发射端与接收端均由光学天线、信标光激光器、跟瞄转台、粗跟踪单元和精跟踪单元组成, 接收端的光学基台中增加了 S-H 传感器和用于数据处理的上位机。

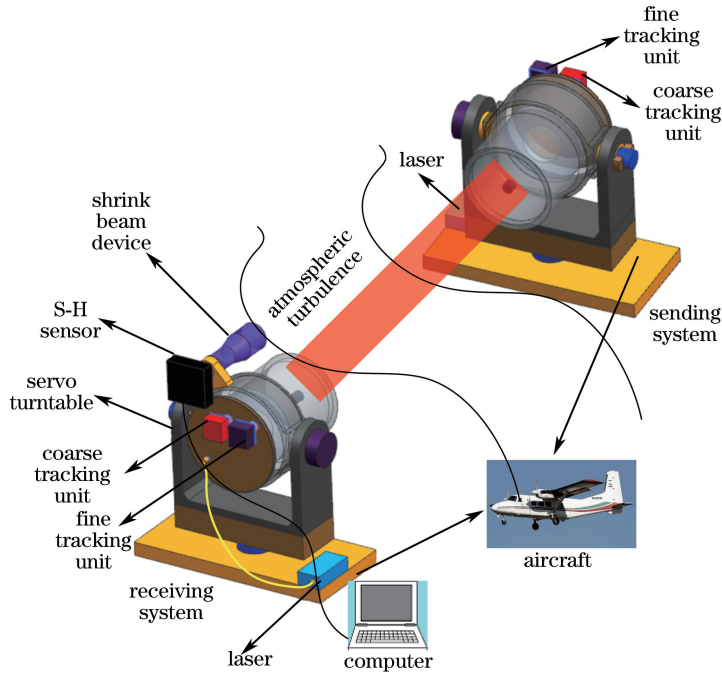


图 2 机载水平大气湍流参数测量系统示意图

Fig. 2 Diagram of airborne horizontal atmospheric turbulence parameter measurement system

机载大气湍流参数测量系统的主要参数选择与典型机载激光通信系统相类似。信标光源采用 808 nm 近红外半导体激光器, 其发射功率在 0~3 W 范围内可调。主光学天线采用卡塞格林系统, 主镜口径为 200 mm, 焦距为 1252 mm。粗-精复合跟踪单元可以抑制飞行平台间光轴对准误差及平台自身抖动误差等影响。测量系统粗、精跟踪精度分别如图 3、4 所示, 由图可知, 综合跟踪精度优于 30 μ rad, 保证了信标光光斑稳定覆盖 S-H 传感器的全部子孔。S-H 传感器微透镜阵列子孔径直径为 1.33 mm, 有效口径个数为 12 \times 12, 配有口径直径为 50 mm 的小型光学缩束系统, 其等效焦距为 300 mm; CCD 相机选用 Imperx 公司的 C2880, CCD 可探测到信号能量的动态范围为 74 dB, 像元尺寸为 4.7 μ m, 像元数为 2832 \times 2128, 利用感兴趣

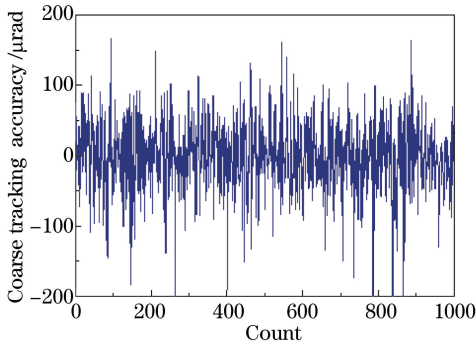


图 3 测量系统粗跟踪精度

Fig. 3 Coarse tracking accuracy of measurement system

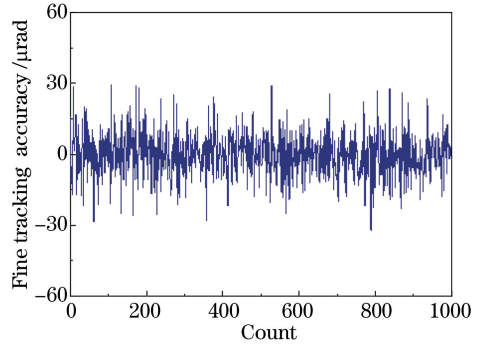


图 4 测量系统精跟踪精度

Fig. 4 Fine tracking accuracy of measurement system

区域(ROD)的开窗功能将光斑图像采集频率提高到 1 kHz,积分时间为 1 ms;上位机通过 USB3.0 接口每秒采集 100 帧 S-H 传感器传输的光斑图像,通过亚像素细分技术将光斑质心位置检测精度提高到 0.1 pixel (相对到达角测量误差约为 $1.5 \mu\text{rad}$),每 3000 帧图像统计一次抖动方差。

3.2 实验布局

空-空飞行测量实验地点选在大兴安岭加格达奇地区,选择无风少云的环境进行测试,测试时间选择 2013 年 8、9 月。图 5 为测试系统的光学窗口,将两架通用型固定翼 Y-12 飞机作为实验平台,测量系统经过适应性改造后安装在飞机窗口附近。实验布局与飞行路线如图 6 所示,飞机 1 与飞机 2 分别搭载测量系统的发射光端机与接收光端机先后起飞,两架飞机爬升到距离地面约海拔 1.0 km 的高度(距地面约 500 m)后水平拉开距离;根据机载全球定位系统提供的位置信息,在达到机载光通信安全距离(约 10 km)后启动 PAT 单元以实现信标光的捕获跟踪;待接收端光斑稳定充满 S-H 传感器视场时,开始进行 r_0 与 C_n^2 的测量。



图 5 测量系统光学窗口

Fig. 5 Optical windows of measurement system

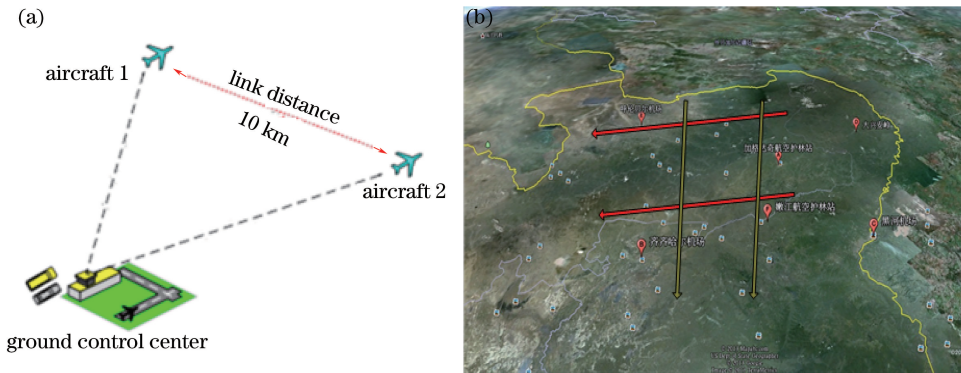


图 6 (a)实验布局;(b)飞行路线

Fig. 6 (a) Experimental layout; (b) flight route

4 实验结果与分析

4.1 白天不同海拔高度的大气湍流参数测量

于2013年8月22~24日8:00—11:00开展了大气湍流随测量高度变化的相关实验。考虑飞机平台的性能和飞机的飞行安全,测试高度范围选择1.0~6.0 km。近地面大气湍流影响因素相对复杂,为更加准确地描绘 C_n^2 的变化规律,在1.0~4.0 km的海拔高度范围内,每200 m视为一层,测试15层;在4.0~6.0 km的海拔高度范围内,每500 m视为一层,测试4层。每层持续测量10 min,飞机在层与层之间的爬升时间约为1~3 min,总测试时间约为3.5 h。将三天内同时段的实验结果进行统计,测量结果如图7~9所示。图7、8分别为测量系统在海拔高度为1.0,2.0,3.0,4.0 km处得到的时域数据与概率密度,从统计分布来看,DIMM测得的到达角相对起伏可近似为正态分布。图9为根据测量数据反演的 C_n^2 随海拔高度的变化曲线。

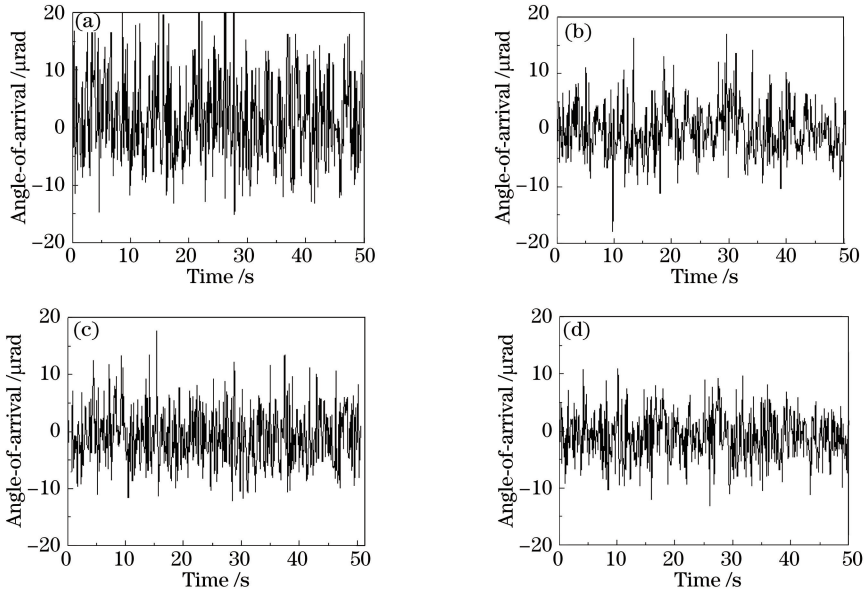


图7 不同海拔高度处到达角相对起伏的采样数据。(a) 1.0 km;(b) 2.0 km;(c) 3.0 km;(d) 4.0 km

Fig. 7 Sampling data of angle-of-arrival relative fluctuation at different altitudes.

(a) 1.0 km; (b) 2.0 km; (c) 3.0 km; (d) 4.0 km

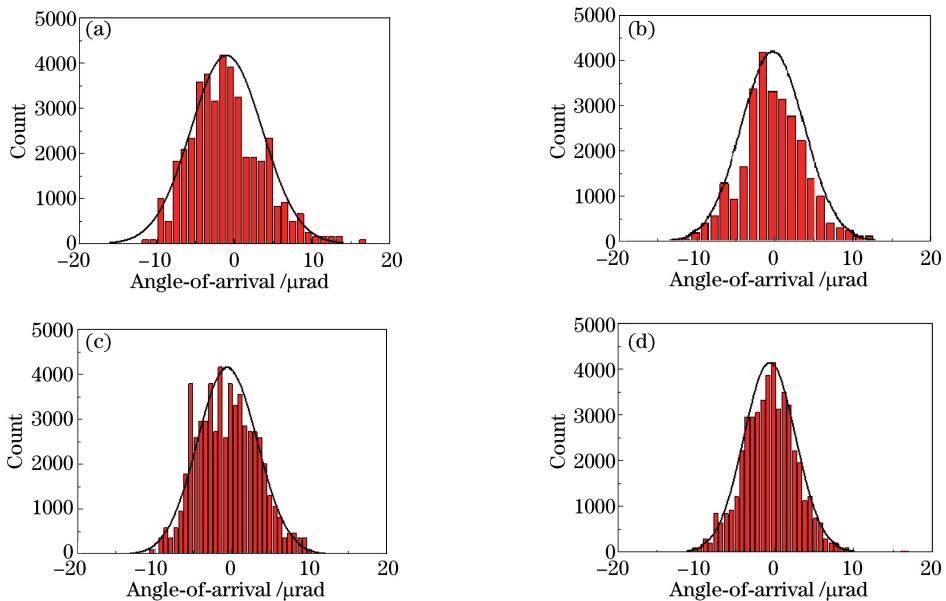


图8 不同海拔高度处到达角相对起伏的直方图。(a) 1.0 km;(b) 2.0 km;(c) 3.0 km;(d) 4.0 km

Fig. 8 Histograms of angle-of-arrival relative fluctuation at different altitudes.

(a) 1.0 km; (b) 2.0 km; (c) 3.0 km; (d) 4.0 km

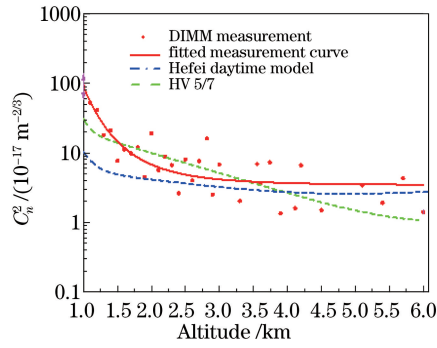


图9 加格达奇地区 C_n^2 随海拔高度的变化

Fig. 9 Variation in C_n^2 with altitude in Jiagdaqiqi area

由图7~9可知,随着机载测量平台飞行高度的升高,大气湍流引起的光斑质心到达角相对起伏方差呈减小趋势,在海拔为1.0~2.0 km范围内,光斑质心相对抖动明显减小, C_n^2 迅速减小;在海拔为2.0~3.0 km范围内,光斑质心抖动程度相差不多, C_n^2 减小趋势明显放缓,尤其在海拔为2.2~2.8 km范围内, C_n^2 还出现了增加趋势。根据夏季大气覆盖逆温特性^[19],可以判断混合层顶应在海拔为2.2~2.8 km范围内;在海拔为3.0~4.0 km范围内,光斑质心抖动方差继续减小, C_n^2 减小的趋势大于海拔为2.0~3.0 km范围内 C_n^2 减小的趋势,但仍然小于海拔为1.0~2.0 km范围内 C_n^2 减小的趋势。综合上述分析,得到加格达奇地区大气湍流随海拔高度变化的趋势与合肥日间湍流廓线模型相近^[20-21],但测量数据中出现了强弱湍流层交替出现的情况,这是由大气湍流在空间与时间上的间歇性引起的,可见大气湍流对机载光通信的影响随高度、时间的不断变化变得更加复杂。

4.2 白天不同时间段内大气湍流参数测量

为了测量白天工作时段大气相干长度的变化趋势,于2013年8月26、27日开展了白天大气相干长度的测量实验。由于飞行平台续航能力的限制,机载测试设备无法实现长时间连续测量,因此选择理论上较适合激光通信的清晨-上午时间段以及大气湍流运动最为剧烈的午后时段进行分段测量,飞行高度为海拔3.5 km,实验结果如图10所示。利用雪崩光电二极管(APD)通信探测器对信标光光强起伏进行检测,并将测量结果反演为大气相干长度 r_0' ,并将 r_0' 与 DIMM 测量值 r_0 进行对比^[6]。

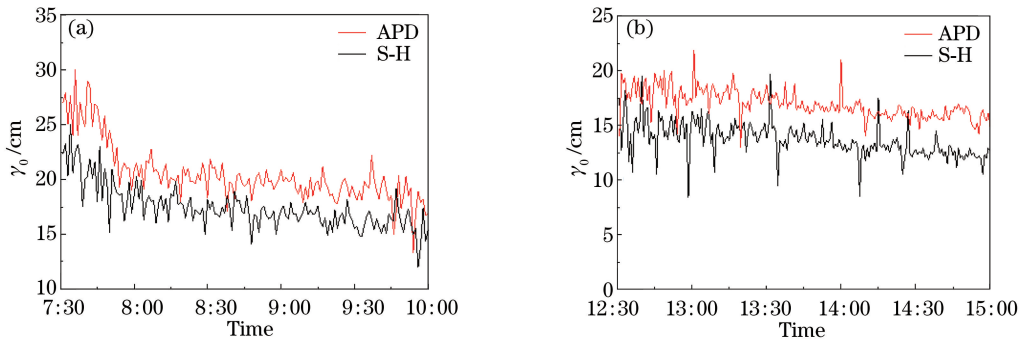


图10 白天不同时间段大气相干长度测量曲线。(a) 7:30—10:00; (b) 12:30—15:00

Fig. 10 Atmospheric coherence length measurement curves in different time intervals during day.

(a) 7:30—10:00; (b) 12:30—15:00

图10(a)为7:30—10:00时段内 r_0 在同一海拔高度上随时间的变化情况。可以看出,利用DIMM测得上午 r_0 的变化范围为15~26 cm,且 r_0 随着时间变化递减;在7:30—8:00时段内, r_0 减小了约6~8 cm;在8:00—10:00时段内, r_0 的减小趋势趋于平稳,2 h内减小了约2~3 cm;APD光强起伏反演结果在18~28 cm之间,与DIMM测量曲线变化趋势相近。虽然APD通信探测器对大气湍流高阶分量的探测能力高于S-H传感器,但其所使用的光学口径为200 mm,大于S-H传感器前端50 mm的光学口径。更大的光学接收口径能够接收更大面积的光波波前,对相位起伏中高阶分量产生了更强的平均效果,即所谓的孔径平滑效应^[22],这是 r_0' 大于 r_0 的主要原因,可见DIMM测得的大气相干长度更接近真实值。图10(b)为12:30—

15:00时段内测得的 r_0 的变化情况,此时间段内大气湍流强度与上午时段相比明显增强, r_0 的整体变化趋势更加平缓,变化范围约为10~14 cm,仅在个别时刻有较大起伏; r_0' 曲线的变化趋势仍然与 r_0 相近,但二者在同一时间点的数值之差相对清晨-上午时间段有所增大,可见孔径平滑效应对较强湍流扰动的抑制效果更加明显。

5 结 论

在飞机-飞机激光通信演示实验中,利用基于 DIMM 测量原理的大气湍流参数测量系统对不同海拔高度的 C_n^2 进行了分层测量,对日间大气相干长度 r_0 进行了分时段测量,得到了机载激光通信过程中大气湍流参数的变化趋势,结论如下:

1) 大气湍流强度随海拔高度的升高逐渐减小,并引起大气折射率的随机起伏。飞行平台在不同海拔高度都实现了信标光轴的对准与捕获,其捕获时间与捕获概率都很接近,说明大气湍流强度变化对激光通信系统指向、捕获过程影响不大。

2) 在室内模拟飞行平台抖动的测试环境下,伺服系统精跟踪单元跟踪误差为2~3 μrad ;实际飞行实验过程中,精跟踪单元跟踪误差增大到10~30 μrad ,说明大气湍流引起的散斑效应对精跟踪单元的跟踪精度有一定影响。

3) 海拔高度为3.5 km时,相同测试条件下的激光通信系统探测误码率会随着大气湍流强弱起伏而发生变化。 $r_0=26$ cm时,通信误码率为 1.4×10^{-9} ;当 $r_0=15$ cm时,通信误码率为 3.2×10^{-8} ;当 $r_0=10$ cm时,通信误码率为 7.1×10^{-7} 。可见,大气湍流影响越小,激光通信系统的通信性能越好。

在下一步工作中,将结合湍流实测数据与理论模型,深入分析大气湍流对空间激光通信链路各项指标性能的影响机理,为空间激光通信系统的优化设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying, *et al.* Optical principle research of space laser communication network[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006003.
姜会林, 胡 源, 丁 莹, 等. 空间激光通信组网光学原理研究[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006003.
- [2] Mai V V, Thang T C, Pham A T. Performance of TCP over free-space optical atmospheric turbulence channels[J]. Journal of Optical Communications & Networking, 2013, 5(11): 1168-1177.
- [3] Rao Ruizhong. Modern atmospheric optics[M]. Beijing: Science Press, 2012.
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [4] Rao Ruizhong. Turbulence path integral parameters and light propagation effects in turbulent atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(1): 79-85.
饶瑞中. 湍流路径积分参量与湍流大气中光的传播效应[J]. 光学学报, 1997, 17(1): 79-85.
- [5] Wang Hongxing, Song Bo, Wu Xiaojun, *et al.* Experiment of beam spreading of collimated Gaussian beam in atmospheric turbulence under sea surface environment[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0305004.
王红星, 宋 博, 吴晓军, 等. 近海面大气湍流中准直高斯光束光斑扩展实验[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0305004.
- [6] Wang Jianye, Rao Ruizhong, Liu Xiaochun. Comparison of experimental study of atmospheric coherence length[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(1): 64-66.
汪建业, 饶瑞中, 刘晓春. 大气相干长度的对比实验研究[J]. 中国激光, 2005, 32(1): 64-66.
- [7] Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming. Analysis on daily variation of atmospheric turbulence with height distribution in Hefei region[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(2): 94-98.
孙 刚, 翁宁泉, 肖黎明. 合肥地区大气湍流随高度分布日变化特性分析[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(2): 94-98.
- [8] Guo Jie, Sun Dongsong, Qiang Xiwen, *et al.* Error analysis of differential image motion lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0801004.
郭 洁, 孙东松, 强希文, 等. 差分像移湍流廓线激光雷达测量误差分析[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0801004.
- [9] Wang Yingjian. Laser beam propagation and applications and sea water[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
王英俭. 激光在大气和海水中的传输及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.

- [10] Li Xiaoming, Zhang Lizhong, Meng Lixin, *et al.* Research and experiment of PAT system for airborne space laser communication[J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(6): 1044-1051.
李小明, 张立中, 孟立新, 等. 机载无线激光通信对准-捕获-跟踪系统及动态飞行试验研究[J]. *兵工学报*, 2016, 37(6): 1044-1051.
- [11] Rao Changhui, Jiang Wenhan, Ling Ning. Atmospheric parameters measurements for non-Kolmogorov turbulence with Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(9): 1201-1207.
饶长辉, 姜文汉, 凌 宁. 应用哈特曼-夏克波前传感器测量大气湍流参数[J]. *光学学报*, 2000, 20(9): 1201-1207.
- [12] Martin H M. Image motion as a measure of seeing quality[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1987, 99(622): 1360-1370.
- [13] Sarazin M, Roddier F. The ESO differential image motion monitor[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 1990, 227(1): 294-300.
- [14] Huang Dequan, Zhou Wenchao, Qiu Hong, *et al.* Research on measurement of atmospheric coherence length using Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(8): 11-16.
黄德权, 周文超, 邱 红, 等. 哈特曼测量大气相干长度研究[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(8): 11-16.
- [15] Belen'kii M S, Roberts D W, Stewart J M, *et al.* Experimental validation of the differential image motion lidar concept [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(8): 518-520.
- [16] Eaton F D, Peterson W A, Hines J R, *et al.* Comparison of two techniques for determining atmospheric seeing[C]. *SPIE*, 1988, 926: 319-334.
- [17] Andrews L C, Phillips R L. *Laser beam propagation through random media*[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- [18] Gao Tianyuan, Hu Yuan, Jiang Huilin, *et al.* The effect of atmosphere boundary layer on airborne space laser communication and its compensation technology[J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(12): 2278-2283.
高天元, 胡 源, 姜会林, 等. 机载空间激光通信大气附面层影响及补偿技术研究[J]. *兵工学报*, 2015, 36(12): 2278-2283.
- [19] Yuan Renmin, Ma Chengsheng, Fan Aiyuan. Discussion on capping inversion[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2003, 33(2): 247-251.
袁仁民, 马成胜, 范爱媛. 混合层顶覆盖逆温层变化规律研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 2003, 33(2): 247-251.
- [20] Cheng Zhi, He Feng, Jing Xu, *et al.* Improved retrieval method of turbulence profile from differential column image motion light detection and ranging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0401004.
程 知, 何 枫, 靖 旭, 等. 改进的差分光柱像运动激光雷达的湍流廓线反演方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0401004.
- [21] Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming. Vertical distribution models of atmospheric structure constant of refractive index[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(2): 183-188.
孙 刚, 翁宁泉, 肖黎明. 合肥地区大气折射率结构常数高度分布模式[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(2): 183-188.
- [22] Chen Chunyi. Study on mechanism and mitigation technology of atmospheric effects in optical wireless communications [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009.
陈纯毅. 无线光通信中的大气影响机理及抑制技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.