

# 无线光通信信道的大气湍流测试及分析

胡 玮, 蒋大钢, 张 静, 李晓峰

(电子科技大学空天科学技术研究院 成都 610054)

**【摘要】**通过长期的大气湍流强度测试,总结了所测信道大气湍流强度的日变化规律,即测试日下午7:00~次日早上8:00时段湍流最弱,湍流强度约为 $10^{-15}\text{m}^{-2/3}$ ;下午1:00~2:00时段湍流最强,湍流强度约为 $10^{-13}\text{m}^{-2/3}$ 。另外还分析了仪器测试原理,推导了湍流强度与大气温度结构常数、大气温度测试精度的关系,并对实验测试误差进行了评估,为研究大气湍流对无线光通信系统的影响提供了基础数据支持。

**关键词** 分析; 信道; 大气湍流强度; 测试

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.02.013

## Test and Analysis on the Atmospheric Turbulence for the Optics Wireless Communication Channel

HU Wei, JIANG Da-gang, ZHANG Jing, and LI Xiao-feng

(Institute of Astronautics & Aeronautics, University of Electronics Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** The atmospheric turbulence's daily characteristic is concluded by a long term experimental study, which can be drawn as: the measured turbulence strength is usually weak from 7 p.m. to 8 a.m. on the order of  $10^{-15}\text{m}^{-2/3}$ , but it is always strong from 1 p.m. to 2 p.m. on the order of  $10^{-13}\text{m}^{-2/3}$ . In addition, the test principle of instrument is analyzed. The relationship between turbulence strength and atmospheric temperature structure function and measurement precision is derived to evaluate the experimental result. This research provides fundamental data for atmospheric turbulence research on the optics wireless communication system.

**Key words** analysis; channel; turbulence strength; test

激光大气传输是无线激光通信领域最基础的关键技术之一<sup>[1]</sup>。激光在大气传输过程中,因衰减和湍流效应,导致光通信链路出现可通率下降、传输误码率增大等链路表征参数恶化。由于我国尚未开展典型地区大气信道特性研究,缺乏不同地区、各种典型气候条件下的长期测试数据<sup>[2]</sup>,使得国内无线光通信系统信道参数设计大多采用经验估计方法,导致某些无线光通信设备重要参数设计过程具有一定的盲目性,无线光通信系统标准化设计和工程化实现困难,难以保障设备性能达到最优化,是严重制约近地大气(以及星地)无线光通信大规模应用的主要原因之一。

目前中国科学院安徽光机所已在我国部分地区开展了闪烁<sup>[3-4]</sup>、湍流尺度<sup>[5]</sup>、相位畸变<sup>[6]</sup>、大气折射起伏<sup>[7-8]</sup>等大气参数的测试工作,形成了可用于天文台选址的测试设备<sup>[9-11]</sup>。哈尔滨工业大学为了探讨大气参数对无线光通信ATP性能的影响,开展了光通信到达角起伏的实验研究<sup>[12]</sup>。

现阶段,大气光学参数测量已经具有良好的研究基础,但大气效应对无线光通信系统性能影响的研究还处于起步阶段。为了满足无线光通信技术发展的迫切需求,需通过大气湍流强度测试、大气衰减测试,为无线光通信信道参数设计积累基础数据,为提高近地无线光通信系统性能提供有效技术手段。

本文介绍了测试系统中的近地大气湍流强度参数测试部分。

### 1 测试原理

湍流引起大气折射率起伏,使得在大气中传输的激光的相干性遭到破坏,产生光波的到达角起伏、光强闪烁、光斑漂移及扩展等现象。

大气折射率结构常数 $C_n^2$ 用于描述大气折射率起伏情况,是表征大气光学湍流强度的重要参数,对该参数已有多种公开报道的测试方案<sup>[13]</sup>。其中,采用直接测量温度结构常数从而间接计算大气湍流强度的方案是当前的研究热点。

收稿日期: 2009-12-11; 修回日期: 2010-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(060841001030203)

作者简介: 胡 玮(1951-),男,高级工程师,主要从事无线光通信技术方面的研究。

该方案通过测量两点温差和距离得到大气温度结构,再结合气压和温度进一步得到大气折射率结构常数。

根据Kolmogorov局地均匀各向同性假定,在湍流充分发展的条件下,处于湍流惯性区内的大气温度结构函数服从“2/3”定律:

$$C_T^2 = \frac{D_T(r)}{r^{2/3}} = \frac{\overline{(T_a - T_b)^2}}{r^{2/3}} \quad (1)$$

该式表明,温度结构常数  $C_T^2$  与温度结构函数  $D_T(r)$  和两点间距离  $r$  有关;  $D_T(r)$  可通过测量两点温度  $T_a$ 、 $T_b$  差的均值得到。

由于折射率的起伏主要受温度起伏的影响,压强起伏的影响可以忽略,折射率结构常数  $C_n^2$  与温度结构常数  $C_T^2$  的关系可进一步表示为:

$$C_n^2 = \left(79 \frac{P}{T^2}\right)^2 C_T^2 \times 10^{-12} \quad (2)$$

式中,大气压强  $P$  参数量纲为百帕;大气温度  $T$  为开氏温度K;温度结构常数量纲为  $\text{K}^2 \text{m}^{-2/3}$ 。

## 2 精度分析

文献[14]在假设  $C_T^2$  为常数的基础上,根据上述模型进行了折射率结构常数  $C_n^2$  的测试精度分析。但是由式(1)可知,  $C_T^2$  在实际测试过程中受温度和距离测试误差影响,为了进行更深入的精度分析,  $C_T^2$  需要视为变量。

下面将根据误差的方差合成理论分析设备精度。该理论认为:由于测试情况复杂,被测量往往存在众多误差来源,其总的误差应该是各个相互独立的误差分量的方差合成。因此,对式(2)取对数后再取导数得到:

$$\frac{u(C_n^2)}{C_n^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{P}\right)^2 u^2(P) + \left(\frac{4}{T}\right)^2 u^2(T) + \left(\frac{1}{C_T^2}\right)^2 \frac{2}{nr^{4/3}} u^2(T_a) + \frac{4}{9} r^{-2} u^2(r)} \quad (7)$$

根据传感器精度,再结合具体测试条件可以得到  $C_n^2$  的测量误差。如在  $P=10^3 \text{ h Pa}$ 、 $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-15} \text{ m}^{2/3}$ 、 $T=300 \text{ K}$ 、 $n=500$ 、 $r=0.75 \text{ m}$  及

$$\frac{u(C_n^2)}{C_n^2} = \sqrt{4 \times 10^{-6} u^2(P) + 1.7 \times 10^{-4} u^2(T) + 3.5 \times 10^3 u^2(T_a) + 0.8 u^2(r)} \quad (8)$$

比较式(8)各项系数高分辨率温度传感器测量误差对  $C_n^2$  测量误差的贡献非常显著,温度、压力等测量误差基本可以忽略,故有:

$$\frac{u(C_n^2)}{C_n^2} \approx \sqrt{\left(\frac{1}{C_T^2}\right)^2 \frac{2}{nr^{4/3}} u^2(T_a)} = \sqrt{3.5 \times 10^3 u^2(T_a)} = 11.8\% \quad (9)$$

$$\frac{dC_n^2}{C_n^2} = 2 \frac{dP}{P} - 4 \frac{dT}{T} + \frac{dC_T^2}{C_T^2} \quad (3)$$

式(3)表明折射率结构常数  $C_n^2$  的测试误差由相互独立的压强  $P$ 、温度  $T$  和温度结构常数  $C_T^2$  的测试误差组成。根据误差的方差合成理论,结合式(3)得到  $C_n^2$  的相对误差为:

$$\frac{u(C_n^2)}{C_n^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{P}\right)^2 u^2(P) + \left(\frac{4}{T}\right)^2 u^2(T) + \left(\frac{1}{C_T^2}\right)^2 u^2(C_T^2)} \quad (4)$$

可见,  $C_n^2$  的相对误差由大气压强误差  $u(P)$ 、大气温度误差  $u(T)$  和温度结构常数误差  $u(C_T^2)$  组成。根据选用的压强和温度传感器精度可知:  $u(P)=0.3 \text{ h Pa}$ 、 $u(T)=0.2 \text{ K}$ 。对  $u(C_T^2)$  还需要结合  $C_T^2$  测试过程进一步分析。

在进行  $C_T^2$  测试时,通过测试两个相距为  $r$  (约  $0.75 \text{ m}$ ) 的高分辨率温度传感器(测温分辨率  $0.002 \text{ K}$ ) 间的平均温度差(500个测量值平均),得到大气温度结构常数  $C_T^2$ , 即式(1)可改写为:

$$C_T^2 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [T_a(i) - T_b(i)]}{r^{2/3}} \quad (5)$$

式中,采样次数  $n=500$ ;  $T_a$  为一端高分辨率温度传感器测得的温度;  $T_b$  为另一端高分辨率温度传感器测得的温度。根据误差的方差合成理论,结合式(5),大气温度结构常数的误差  $u(C_T^2)$  可表示为:

$$u(C_T^2) = \sqrt{\frac{1}{nr^{4/3}} [u^2(T_a) + u^2(T_b)] + \frac{4}{9} r^{-2} (C_T^2)^2 u^2(r)} \quad (6)$$

式中,  $u(T_a)=u(T_b)=0.002 \text{ K}$ ; 距离测试误差为  $5 \text{ mm}$ , 即  $u(r)=0.005 \text{ m}$ 。结合式(4)和式(6),进一步得到:

$C_T^2 = 1.3 \times 10^{-3} \text{ Km}^{2/3}$  的典型测试情况下,由式(7)可得到:

## 3 测试系统简介

长期测试系统中配备了近地大气参数测试系统,该系统可分为温度微变测试传感模块,气象参数传感模块,数据采集、传输、处理及显示模块3个子模块。测试系统测试设备实物图如图1及图2所示。



图1 外场信道参数测试传感设备实物图



图2 大气折射率结构参数二级参数测试外场传感器



图3 大气折射率结构参数测试后台系统

测试过程中使用了近地大气信道数据采集及处理软件, 该软件采用了大型数据库技术, 能完成远程多信道大气参数实时收集、处理和分析。

### 4 测试结果及分析

本文实验通过近3个月不间断的全天候测试, 获得了大量大气信道的性能参数, 初步了解了成都地区2008年第4季度多条信道的基本特征。

#### 4.1 大气折射率结构常数及其测量误差的变化规律

图4所示为2008年12月5日1: 00~24: 00(冬季时段)温度和压力的时间变化曲线, 其中虚线表示压力曲线, 实线表示温度曲线。温度和压力都通过气象参数传感模块获取, 用于  $C_n^2$  的测试及其误差分析。测试条件: 晴朗, 风力1 m/s, 风向ENE)。

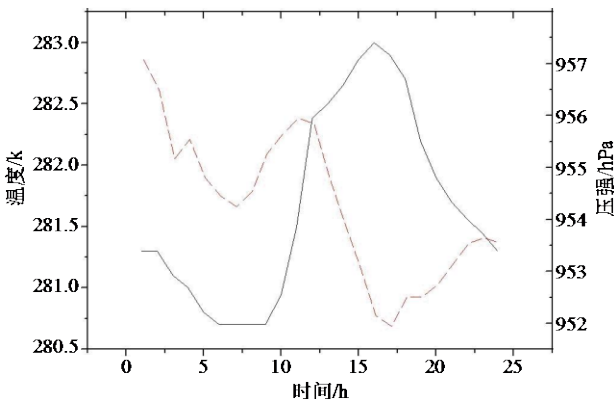


图4 2008年12月5日大气温度、压强随时间变化曲线

图5所示为2008年12月5日1: 00~24: 00大气折

射率结构常数  $C_n^2$  及其测量误差的时间变化曲线, 其中实线表示  $C_n^2$  的测试曲线, 虚线表示  $C_n^2$  的测试误差曲线。

通过温度微变测试传感模块可测得数据  $C_T^2$ , 再结合气象参数模块的气压和温度数据, 根据式(2)计算得到  $C_n^2$ 。根据测试数据, 通过式(7)计算得到  $C_n^2$  的测量误差。

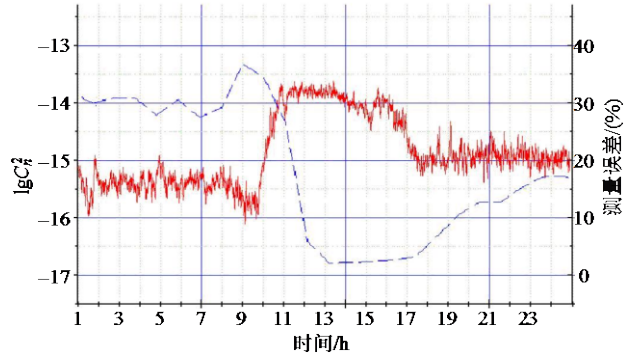


图5 2008年12月5日大气折射率结构常数及其测量误差随时间变化曲线

由图5可知:

- 1)  $C_n^2$  在上午10:00~17:00时段数值较高, 为  $10^{-14}$  量级; 其他时段较低;
- 2)  $C_n^2$  的相对测量误差与  $C_n^2$  的测试值成反比, 在  $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  时, 测试相对误差为2.41%;  $C_n^2 = 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$  时, 测试相对误差高达37%;
- 3) 由近似估算式(9)可知, 当  $C_n^2$  较低时,  $C_T^2$  也较低, 从而导致相对误差增大。

#### 4.2 大气折射率结构常数周变化规律

图6为2008年12月1日~12月7日一周内每天的大气湍流强度变化对比曲线。

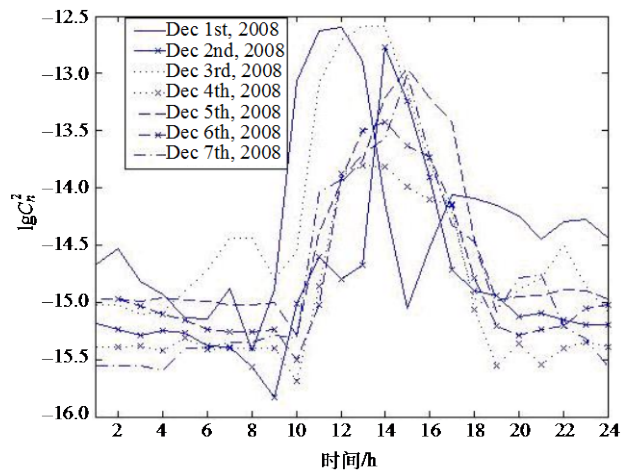


图6 2008年12月1日至12月7日一周内每天的大气湍流强度变化对比

结合信道测试统计数据(2008年12月1日至12月7日一周)的日变化规律进行分析可知: 测量得到的

$C_n^2$  最大值约为  $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$  量级, 最小值约为  $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$  量级, 最大值和最小值之间相差大约有5个量级。

测试时段内,  $C_n^2$  具有明显的日变化规律, 白天湍流较强, 夜间较弱, 测试日下午19:00~次日上午8:00时段湍流最弱, 中午13:00~14:00时段湍流最强, 与日照情况有关。

## 5 结 论

通过以上对信道大气湍流强度的测量和分析, 可以得出以下结论: 1) 从  $C_n^2$  周变化规律可知: 白天湍流较强, 夜间较弱, 测试日下午19:00~次日上午8:00时段湍流最弱, 中午13:00~14:00时段湍流最强, 与日照情况有关。2) 通过理论分析和实验,  $C_n^2$  的相对误差与  $C_T^2$  的测试值成反比, 且因为湍流较弱时, 两测点间的温差较小(尤其在夜间), 当微小温差接近温度探头分辨率时, 仪器自身噪声变得更为显著, 进而导致误差增加。3) 为了提高测试精度, 需要进一步提高温度微变传感器探头分辨率、降低仪器噪声。

## 参 考 文 献

[1] 李晓峰. 地激光通信链路原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.  
LI Xiao-feng. The principle and technology of the satellite-to-ground laser communication links[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.

[2] 饶瑞中, 乔延利, 魏合理, 等. 中国典型地区大气光学特性及其应用[J]. 大气与环境科学学报, 2007, 2(6): 401-408.  
RAO Rui-zhong, QIAO Yan-li, WEI He-li, et al. Research and application on optical properties of atmosphere in typical regions of China[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(6): 401-408.

[3] 饶瑞中, 龚知本, 王世鹏, 等. 激光大气闪烁饱和的孔径平均效应[J]. 光学学报, 2002, 22(1): 36-40.  
RAO Rui-zhong, GONG Zhi-ben, WANG Shi-peng, et al. Aperture averaging of saturated scintillation of laser propagation in the atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(1): 36-40.

[4] 马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 测量折射率结构参数和内尺度的三波长激光闪烁仪[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(1): 49-54.  
MA Xiao-shan, ZHU Wen-yue, RAO Rui-zhong. Three-wavelength laser scintillometer for measuring refractive index structure parameter and inner scale[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(1): 49-54.

[5] 梅海平, 吴晓庆, 饶瑞中. 不同地区大气光学湍流内外尺度测量[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(3): 362-366.  
MEI Hai-ping, WU Xiao-qing, RAO Rui-zhong. Measurement of inner and outer scale of atmospheric optical turbulence in different areas[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(3): 362-366.

[6] 何丽萍, 王英俭, 范承玉. 利用剪切干涉仪测量激光大气传输相位畸变[J]. 量子电子学报, 2001, 18(增刊): 92-96.  
HE Li-ping, WANG Ying-jian, FAN Cheng-yu. Measurement of the phase distortion for a laser beam propagating through the atmosphere by a lateral shear interferometer[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2001, 18(S1): 92-96.

[7] 马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 测量大气折射率结构常数的大口径激光闪烁仪[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 898-902.  
MA Xiao-shan, ZHU Wen-yue, RAO Rui-zhong. Large aperture laser scintillometer for measuring the refractive index structure constant of atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(6): 898-902.

[8] 张斗国, 王沛, 鲁拥华, 等. 近场光学方法测量大气折射率起伏[J]. 量子电子学报, 2005, 22(5): 1814-816.  
ZHANG Dou-guo, WANG Pei, LU Yong-hua, et al. Measurement of fluctuation of atmosphere refractivity using the near-field optical method[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(5): 1814-816.

[9] 孙刚, 翁宁泉, 肖黎明, 等. 绵阳地区近地面层大气光学参数的测量与分析[J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(1): 11-15.  
SUN Gang, WENG Ning-quan, XIAO Li-ming, et al. Measurement and analysis of atmospheric optical parameters of surface layer in Mianyang region[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 3(1): 11-15.

[10] 刘小勤, 谭坤, 曾宗泳, 等. 500m激光传输路径大气光学参数遥测系统[J]. 量子电子学报, 2000, 17(2): 189-192.  
LIU Xiao-qin, TAN Kun, ZENG Zong-yong, et al. A remote measure system of atmospheric optical parameters in light path between five hundred meters[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2000, 17(2): 189-192.

[11] 吴晓庆, 翁宁泉, 曾宗泳, 等. 一种用于天文台选址的气象参数和大气湍流测量系统[J]. 量子电子学报, 2001, 18(2): 184-187.  
WU Xiao-qing, WENG Ling-quan, ZENG Zong-yong, et al. A meteorological parameter and atmospheric turbulence measurement system for locating astronomical observatory[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2001, 18(2): 184-187.

[12] 高宠, 谭立英, 马晶, 等. 空间光通信的到达角起伏实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(2): 177-181.  
GAO Chong, TAN Li-ying, MA Jing, et al. Experimental research of angle-of-arrival fluctuations in free-space optical communications. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(2): 177-181.

[13] 袁仁民, 曾宗泳, 翁宁泉, 等. 不同方法测量折射率结构常数的比较[J]. 光学学报, 2004, 24(5): 592-596.  
YUAN Ren-min, ZENG Zong-yong, WENG Ning-quan, et al. Comparison of some methods of measuring refractive index structure parameter[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5): 592-596.

[14] 孙刚, 翁宁泉. 大气温度分布特性对折射率结构常数的影响[J]. 光学学报, 2000, 20(6): 755-761.  
SUN Gang, WENG Ning-quan. Profile and character of atmospheric temperature[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(6): 755-761.