

文章编号: 1001-4322(2008)07-1079-05

## 圆屋附近大气折射率结构常数的空间分布\*

吕炜煜<sup>1,2,3</sup>, 姚东升<sup>2</sup>, 朱文越<sup>1</sup>, 苑克娥<sup>1,3</sup>, 郝磊<sup>1,3</sup>, 饶瑞中<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031; 2. 西北核技术研究所, 西安 710024;

3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** 通过两点温度脉动法, 测量了孤立建筑物圆屋附近不同位置的折射率结构常数, 对比分析了气象塔 8.0, 6.0 m 高度处的折射率结构常数。结果表明: 圆屋附近 8.2, 8.5, 9.0 m 高度处的折射率结构常数要比非圆屋附近同高度的结果大; 距离圆屋等距离垂直方向的折射率结构常数大于水平方向的测量结果; 因此将圆屋附近认为是近地面的假设不成立; 圆屋附近温度谱幂率基本符合“-5/3”定律。

**关键词:** 大气湍流; 折射率结构常数; 圆屋; 等效相干长度

**中图分类号:** TN012; P427.1

**文献标志码:** A

光波在湍流大气中传播时, 大气湍流造成的折射率的起伏导致光波阵面的畸变, 破坏了光波的相干性<sup>[1]</sup>, 对许多光学工程如激光大气传输、自由空间光通讯、天文观测等带来了严重影响。因此大气光学湍流一直是光波大气传输研究中的重要课题。衡量大气光学湍流强度的折射率结构常数  $C_n^2$  对激光大气传输效果的影响非常敏感<sup>[2-5]</sup>, 由测量的  $C_n^2$  得到传输路径上的等效相干长度  $r_0$ 。是评估传输效果的一个大气参量, 因此对  $C_n^2$  进行精确测量, 将是正确评估传输效果的基础。

圆屋作为光学工程应用中一种重要的建筑物, 对圆屋内的实验仪器可以起到有效挡风、减小风振动、克服杂散光和沙尘带来的影响的作用。但是由于圆屋封闭性好, 圆屋内的热气流和圆屋外墙壁受太阳热辐射加热影响, 圆屋内温度和外界环境大气温度的温差, 改变了圆屋内外大气的流场结构和热量分布状态, 使得圆屋附近的大气湍流特征与相同高度自由空间的通常大气相比会有所不同。通过测量圆屋周围的  $C_n^2$ , 定量分析圆屋对  $C_n^2$  空间分布的影响程度, 可以为圆屋内发射的激光束的大气传输问题提供分析基础。本文使用温度脉动仪对望远镜圆屋附近的  $C_n^2$  空间分布情况进行了测量研究, 初步归纳了分布规律。并通过各种可能的影响因素分析, 提出了进一步研究这个问题的初步方案。

## 1 测量原理与方案

在光波波段, 地面附近大气压起伏变化相对较小, 可以忽略不计, 可认为折射率  $n$  的起伏主要是由于位温起伏引起, 满足<sup>[6]</sup>

$$\delta n = -0.79 \times 10^{-6} p \frac{\delta \theta}{T^2} \quad (1)$$

式中:  $\delta n$  表示折射率起伏;  $\delta \theta$  表示位温起伏;  $p$  表示大气压(Pa);  $T$  表示大气温度(K)。

根据 Kolmogorov 的局地各向同性假设, Kolmogorov 和 Obukhov 证明在被动保守量在惯性子区间也满足“-2/3”定律, 由测量平均温度  $T$  和平均气压  $p$  并由式(1)可以表示为

$$C_n^2 = (0.79 \times 10^{-6} \frac{p}{T^2})^2 C_\theta^2 \quad (2)$$

由于联系折射率结构常数和温度结构常数的系数仅依赖于平均气压和温度, 所以通常用  $C_\theta^2$  代替  $C_n^2$ 。这可以由温度脉动仪测量得到的  $C_\theta^2$  计算出  $C_n^2$ 。

温度脉动仪使用的是两个相距一定距离、直径为 10  $\mu\text{m}$  的铂丝电阻, 频率带宽为 0.01~30 Hz, 系统噪声 0.002  $^\circ\text{C}$ , 采样频率为 100 Hz, 平均时间 15 s。测量示意图如图 1 所示。测量的场地安排在圆屋所在的平顶建筑物上, 建筑物高度约 8.0 m, 在垂直于平顶建筑物方向 0.2 m(A1), 0.5 m(B1), 1.0 m(C1), 2.0 m(D1),

\* 收稿日期: 2007-09-14; 修订日期: 2008-06-18

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 吕炜煜(1974—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光和红外大气传输研究工作; wylv\_0551@163.com。

3.0 m(E1)及水平方向距平顶建筑物 0.5 m(A2), 1.0 m(B2), 2.0 m(C2), 3.0 m(D2)的距离分别测量  $C_n^2$ 。

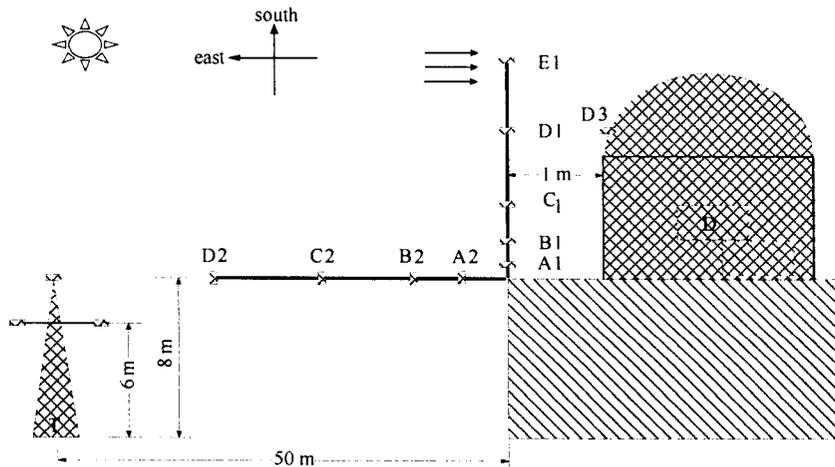


Fig. 1 Schematic of sensors arrangement

图 1 传感器安置示意图

实验的测量的时间段为 12:00~16:00,在测量过程中,为了充分获知小尺度的影响情况,圆屋附近的温度脉动仪两个铂丝电阻之间的距离调整为 20 cm,而距平顶建筑物上 50 m 处,气象塔 8.0 m 及 6.0 m 高度处的温度脉动仪两个铂丝电阻之间的距离为 75 cm。此外在圆屋屋顶放置温度脉动仪,取得了 24 h 的折射率结构常数的测量数据。

## 2 垂直方向和水平方向的 $C_n^2$ 分析

图 2(a)给出的是垂直方向实际测量结果与理论结果的对比曲线。理论分析中  $C_n^2$  随高度变化白天满足  $C_n^2 \approx C_n^2(1)h^{-4/3}$  [ $C_n^2(1)$ 表示距离地面 1.0 m 处的  $C_n^2$ ,理论曲线的初始值使用气象塔 6.0 m 高度的实际测量值,6.0 m 以下的结果是外推结果]。8.2 m(A1),8.5 m(B1),9.0 m(C1),10.0 m(D1),11.0 m(E1)的测量结果不但大于气象塔 8.0 m 和 6.0 m 高度的实际测量结果,而且大于一般情形下同高度的理论结果;同时 8.0 m 的实际测量结果与理论结果吻合。这说明,在有平顶建筑物和圆屋影响的情形下位于高处的  $C_n^2$ ,并不一定比不受平顶建筑物和圆屋影响位于低处的  $C_n^2$  小;无平顶建筑物和圆屋影响下,白天近地面实际测量的  $C_n^2$  符合理论曲线。图 2 (b)给出了在距墙水平路径上的  $C_n^2$  分布的分布状况,其分布并不完全均匀,随着距墙距离的增加,  $C_n^2$  呈增加趋势,在 2.0 m 处达到极大值,随着距墙距离的增加,  $C_n^2$  呈减小趋势,这种现象一方面说明墙对  $C_n^2$  是有影响的,另一方面也说明墙的影响距离有限。

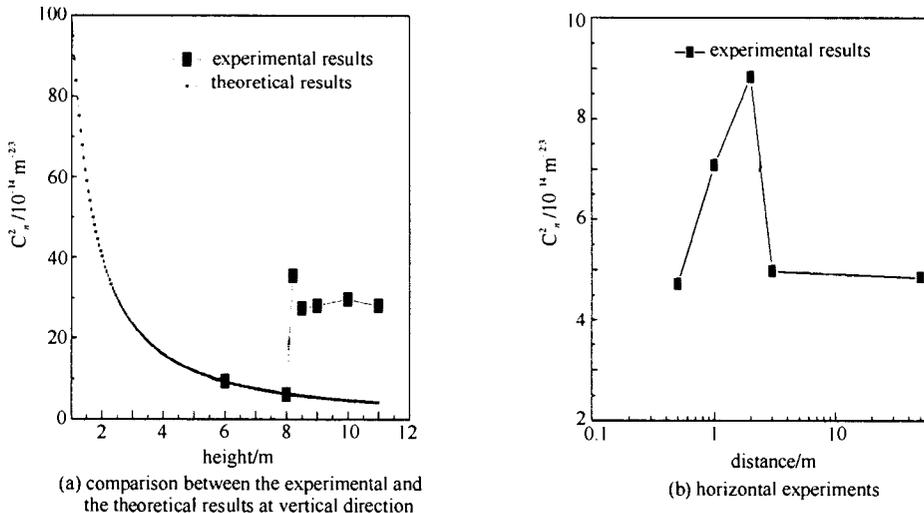


Fig. 2 Different directional results of  $C_n^2$

图 2 不同方向  $C_n^2$  结果

图 3(a)给出的是圆屋垂直方向上 0.2 m(温度脉动仪安置在圆屋顶上 D3 处,距离地面约为 10.0 m)与气

象塔 6.0 m, 8.0 m 高度处的 24 h 对比结果, 相同点在于 3 个高度的  $C_n^2$  都具有类似的日变化趋势; 都具有明显的转换时刻(一天在日出后和日落前  $C_n^2$  极小值出现时间)。不同点在于圆屋顶上  $C_n^2$  比绝对高度基本一致的气象塔 8.0 m 处的  $C_n^2$  大一个量级, 甚至比气象塔 6.0 m 的测量结果也要大; 圆屋顶的转换时刻与气象塔两个高度的转换时刻在时间及特征上有所不同, 圆屋附近日落前  $C_n^2$  的转换时刻提前, 且持续时间短。图 3(b) 给出测量时间段内圆屋附近垂直方向和水平方向平均结果的对比情况, 表明不同方向距墙等距离处的  $C_n^2$  大小也不相同, 垂直方向要比水平方向距墙等距离的测量结果大 3 倍左右。

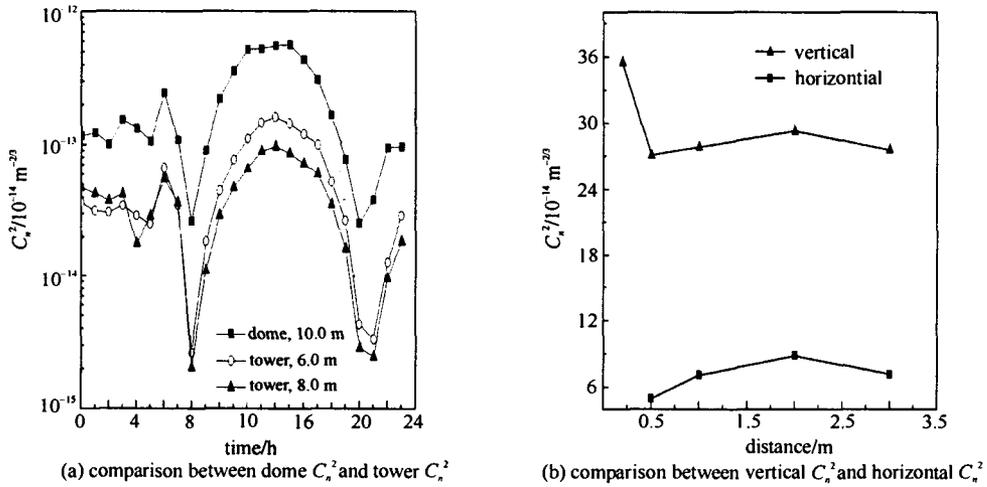


Fig. 3 Comparison between different directional experimental results of  $C_n^2$

图 3 不同方向  $C_n^2$  实验结果对比

为了判断将圆屋附近看作近地面的假设是否成立, 图 4(a), (b) 分别给出了垂直方向、水平方向的测量结果与近地面理论曲线( $C_n^2 \approx C_n^2(1)h^{-4/3}$ )的对比结果, 其中理论曲线中的  $C_n^2(1)$  取的是垂直方向和水平方向 1.0 m 的实测结果, 对比曲线表明实际测量结果与理论结果差别较大, 这说明将圆屋附近近似认为是近地面的假设并不成立。

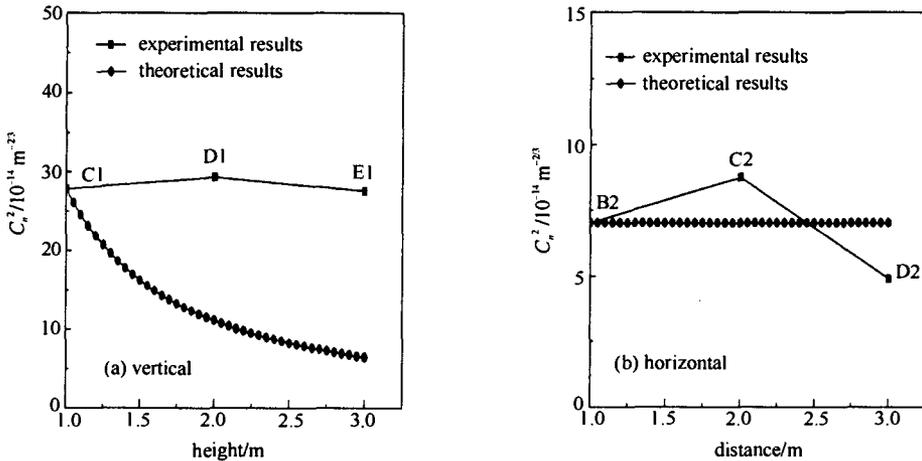


Fig. 4 Comparison between experimental and theoretical results of different directional  $C_n^2$

图 4 不同方向  $C_n^2$  实验结果理论结果对比

通过上述测量结果分析, 可以有如下结论: (1) 圆屋附近垂直方向的  $C_n^2$  大于理论上相同高度的  $C_n^2$ , 水平方向上的  $C_n^2$  表现出不均匀性; (2) 圆屋附近的  $C_n^2$  与代表一般大气状况的气象塔上的测量结果有所不同; (3) 距墙体相同距离的  $C_n^2$  在垂直方向上的结果大于水平方向上的结果, 原因可能是: 圆屋及所在平顶建筑物的墙体比热比空气比热小, 因而吸热和散热的速率较快, 墙体周围的空气通过湍流与墙体交换热量。当圆屋及附近墙体吸收太阳辐射, 自身温度高于周围空气温度, 圆屋及平顶建筑物净得能量大于净失能量, 圆屋及平顶建筑物通过湍流加热周围空气, 使得周围空气温度升高。当太阳照射高度发生变化, 圆屋及平顶建筑物净失能量比净得能量小时, 周围空气通过湍流加热墙壁。所以圆屋及平顶建筑物与周围空气交换热量的速率高于一般情形下空气与地面热量的交换速率, 圆屋及平顶建筑物周围的湍流强度就要比一般情况下气象塔测量的同高度的

湍流强度强,造成圆屋附近的大气折射率结构常数的转换时刻出现的具体时间也受到影响。圆屋及平顶建筑物附近垂直方向上的测量仪器整体更靠近圆屋,测量区域内的大气折射率结构常数同时受到圆屋及平顶建筑物的影响,而水平方向的大气折射率结构常数距离圆屋较远,主要受平顶建筑物的影响,所以距墙体相同距离垂直方向上的湍流强于水平方向的湍流。

### 3 湍流功率谱分析

在局地均匀各向同性的假设下,大气温度的 1 维谱满足“ $-5/3$ ”定律,即有<sup>[8]</sup>

$$S_T(k) = 0.26 C_n^2 k^{-5/3}, \quad L_0 \gg l \gg l_0 \quad (3)$$

式中:波数  $k=2\pi/l$ ,  $l$  为温度起伏区间,  $L_0$  表示外尺度,  $l_0$  表示内尺度。折射率谱也具有相同的形式。因此通过分析温度谱,可以得知折射率谱的变化情况。

为了确定测量点的温度谱幂率,首先对测量频谱进行平滑,用最小二乘法分段进行直线拟合确定谱幂率,根据  $10 \mu\text{m}$  铂丝响应特点,对频谱  $1\sim 20 \text{ Hz}$  范围进行分析,考虑到平滑和直线拟合中的误差,把幂率为  $-5/3 \pm 0.20$  的谱都认为是符合“ $-5/3$ ”定律<sup>[10]</sup>。实际测量中发现在测量时间内所选测量点的幂率基本上符合  $-5/3$ , 幂率主要集中在  $-5/3$  到  $-5/3-0.20$  之间,图 5(a), (b) 给出的是气象塔  $6.0 \text{ m}$ , D3 高度上的谱幂率分析图,二者谱幂率都较好地符合了“ $-5/3$ ”定律,图中  $S$  即  $S_T(k)$ , 表示密度,  $f$  即时间频率,与  $k$  的关系满足  $k=2\pi f/v$ ,  $v$  为风速。这也说明在测量的时间段内圆屋附近的  $C_n^2$  即使在量级上与气象塔的测量结果有所差异,但在谱幂率上无明显差异,这也说明圆屋附近湍流充分发展,满足了惯性子区间的假设条件。

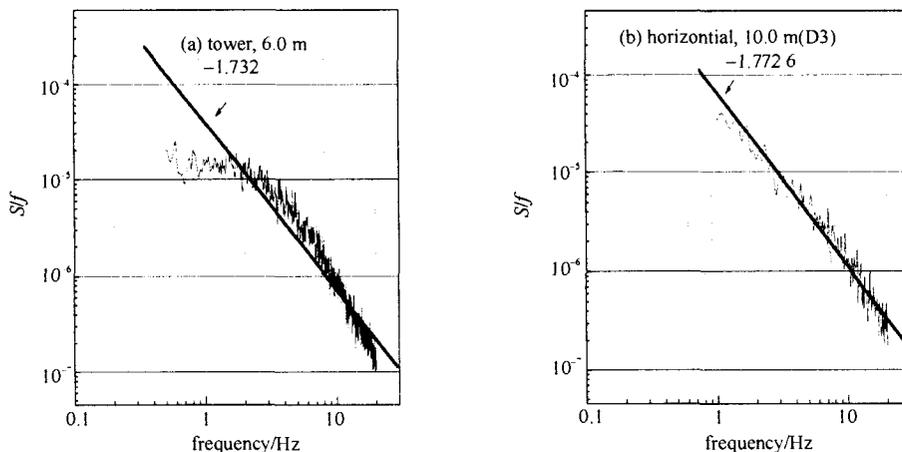


Fig. 5 Temperature spectra of different heights

图 5 不同高度温度谱图

### 4 结 论

圆屋及平顶建筑物附近的  $C_n^2$  与相同高度但无障碍物情形下的  $C_n^2$  是不同的,圆屋及平顶建筑物作为一个热源(冷源),改变了圆屋及平顶建筑物附近空气的热量交换,造成了  $C_n^2$  增大; $C_n^2$  极大值往往出现在距墙一定距离处;将圆屋附近简化成近地面并不合适;距墙等距离处垂直方向的湍流强度强于水平方向的湍流强度;圆屋附近的温度谱满足“ $-5/3$ ”定律。圆屋及平顶建筑物的影响也说明对于光传输路径均匀的假设在实际情况下并不满足,在有关传输效应评估中应注意路径非均匀性的影响。关于  $C_n^2$  积分光传播效应的具体分析可见文献[9]。圆屋及平顶建筑物对  $C_n^2$  空间分布的影响,说明了实际工程应用中对  $C_n^2$  进行精确测量的必要性。

由于实验条件和实验时间的局限,圆屋附近的风向、风速、温度等分布没有精确测量,太阳入射角度的变化使得圆屋形成的阴影也在变化,造成圆屋周围热通量分布复杂,圆屋对周围空气的具体影响距离也会变化,可考虑通过增加测量距离,给出建筑物影响范围的定量结果。同时,开展圆屋四周的测量数据对比工作,分析晴天、阴天等不同天气条件下的数据特点。鉴于使用  $10 \mu\text{m}$  铂丝由于带宽原因,低频和高频部分都得不到反映,文献[10]使用  $1 \mu\text{m}$  铂丝也是一种较好的参考。在此基础上,就建筑物对湍流参数的影响进行定量、半定量分析和讨论(包括外尺度、内尺度方面的分析),以及对一般建筑物(如楼房)和圆屋对大气折射率结构常数影响的区别进行进一步的测量分析,都将是进一步通过实验开展有关建筑物附近  $C_n^2$  空间分布研究的重要内容。

## 参考文献:

- [1] 饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 合肥:安徽科学技术出版社,2005. (Rao R Z. Light propagation in the turbulent atmosphere. Hefei: Hefei Science and Technology Press,2005)
- [2] 黄印博,王英俭. 激光传输大气参量测量精度要求的数值分析[J]. 强激光与粒子束,2006,18(5):720-724. (Huang Y B,Wang Y J. Effect of the measurement errors of atmospheric parameters on the laser propagation effects. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(5): 720-724)
- [3] Pries T. High energy laser meteorology (HELMET)[C]//Proc of SPIE. 1990, 1221:254-293.
- [4] Harada L K,Naiman A E,Carlson L W. Sensitivity of HEL far field intensity calculations to choice of turbulence models and parameters [C]//Proc of SPIE. 1990, 1221:317-326.
- [5] 王英俭. 激光大气传输及其位相补偿的若干问题探讨[D]. 合肥:中国科学院安徽光学精密机械研究所,1996. (Wang Y J. Some study on the laser propagation in the atmosphere and its phase compensation. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,Chinese Academy of Sciences,1996)
- [6] Strohbehn J W. Laser beam propagation in the atmosphere[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1978,12-14.
- [7] 张逸新,迟泽英. 光波在大气中的传播与成像[M]. 北京:国防工业出版社,1997. (Zhang Y X,Chi Z Y. Optical wave propagation in atmosphere and imaging. Beijing:National Defence Industry Press,1997)
- [8] 曾宗泳,袁仁民,谭琨,等. 复杂地形近地面谱测量[J]. 量子电子学报,1998,15(2):134-139. (Zeng Z Y,Yuan R M,Tan K, et al. The spectrum of temperature in the surface layer over complicated terrain. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998,15(2):134-139)
- [9] 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. (Rao R Z. Turbulence path-integral parameters and light propagation effects in turbulent atmosphere. *Acta Optica Sinica*,1997,17(1):79-85)
- [10] 吴晓庆,王英俭,曾宗泳,等. 大气温度起伏谱的测量[J]. 强激光与粒子束,2002,14(2):233-237. (Wu X Q,Wang Y J,Zeng Z Y, et al. Measurements of the spectrum of atmospheric temperature fluctuations. *High Power Laser and Particle Beams*,2002,14(2):233-237)

## Spatial distribution of atmospheric refractive index structure parameter about the dome

LÜ Wei-yu<sup>1,2,3</sup>, YAO Dong-sheng<sup>2</sup>, ZHU Wen-yue<sup>1</sup>, YUAN Ke-e<sup>1,3</sup>, HAO Lei<sup>1,3</sup>, RAO Rui-zhong<sup>1</sup>

(1. *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1125, Hefei 230031, China;*

*2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;*

*3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

**Abstract:** Micro-temperature method is used to measure the turbulence strength of different positions near the telescopic dome which is an isolated building. From analyzing the refractive index structure parameter near the dome and the same parameter at tower, the parameter of turbulence at altitude of 8.2 m, 8.5 m, 9.0 m are stronger than that of same altitude of general atmosphere. The refractive index structure parameters of equidistance between sensors and dome in different directions are different. The vertical turbulence intensity is stronger than the horizontal turbulence intensity. It is unreliable to consider the range near dome as near ground. The spectrum of temperature fluctuations near the dome follows the  $-5/3$  law.

**Key words:** Atmospheric turbulence; Refractive index structure parameter; Dome; Effective coherent length