

文章编号: 0253-2239(2004)05-592-5

# 大气温度分布特性及对折射率结构常数的影响\*

孙 刚 翁宁泉 肖黎明 马成胜 吴 毅

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 合肥 230031)

**摘要:** 影响大气湍流运动强弱和时空结构的因子比较复杂, 大气中平均流场和大气温度的分布都是不均匀的, 特别是沿垂直方向的大气温度分布, 决定着垂直方向的热力不稳定性和湍流的强弱。观测事实表明, 随着季节和天气条件的不同, 大气温度垂直分布有很大的变化。通过对我国安徽合肥地区整层(0~20 km)大气温度的观测资料的分析, 得到了大气温度的垂直分布廓线和统计特性模式误差廓线; 大气折射率结构常数  $C_n^2$  是表示大气光学湍流强度的一个重要参量, 但大气折射率的测量较为困难, 因此通常先测量温度起伏量, 再用平均的温度和气压来计算得到  $C_n^2$ 。通过对温度和气压模式误差的分析, 可以计算得到  $C_n^2$  结果的误差, 重点分析大气温度分布特性及由此带来的模式误差, 并讨论其对计算  $C_n^2$  的影响。

**关键词:** 应用光学; 大气湍流; 大气温度; 分布特性; 模式误差; 大气折射率结构常数

中图分类号: O439 文献标识码: A

## Profile and Character of Atmospheric Temperature

Sun Gang Weng Ningquan Xiao Liming Ma Chengsheng Wu Yi

(National Atmospheric Optics Lab, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

(Received 28 March 2003; revised 10 June 2003)

**Abstract:** The factors that affect turbulence and space-time structure are comparatively complex, the distribution of average stream and atmospheric temperature is not uniform. Especially, the vertical distribution of temperature decides caloric instability in vertical and size of turbulence. It is shown by observed results that the vertical profile of temperature  $T$  is changed by the different season and weather condition. The vertical profile of temperature and mode error is gained with balloon borne instrument in Hefei (0~20 km). The atmospheric structure of refractive index  $C_n^2$  is a important parameter denoting turbulence. But, measuring of atmospheric refractive index is quite difficult, so usually the variation of temperature is measured and  $C_n^2$  is gained by average temperature and air pressure. An analysis of mode error of temperature and air pressure is performed for the mode error of  $C_n^2$ . An analysis is performed for the vertical distribution of temperature  $T$  and the mode error. Also, the relationship of  $C_n^2$  and temperature  $T$  is discussed. And the effect of counting structure constant of refractive index  $C_n^2$  by mode error is also discussed.

**Key words:** applied optics; atmospheric turbulence; atmospheric temperature; vertical profile; model error; refractive index structure constant

## 1 引 言

光波和电磁波在大气中传播时, 会受到大气湍流的影响而产生各种效应, 如大气湍流效应会引起

激光束的漂移和展宽、闪烁、光束强度的起伏和到达角起伏等, 大气湍流影响光波或电磁波主要是通过大气湍流所引起的大气折射率起伏, 随机起伏的湍流会引起折射率的随即起伏, 使大气变成一种随机起伏的介质, 这样就会破坏光波或电磁波的相干性。研究传输问题中的大气湍流, 就是研究湍流所造成的大气折射率随机变化的规律, 而折射率的随机变化又

\* 国家高技术 863 计划激光技术资助课题。

E-mail: sungang0988@sina.com.cn

收稿日期: 2003-03-28; 收到修改稿日期: 2003-06-10

受到大气温度变化的直接影响,因此,讨论大气温度分布特性对折射率分布特性的影响是很有必要的。

在讨论光波和电磁波传播中的大气湍流效应时,主要是关心小尺度湍流运动,这通常满足科尔莫戈罗夫(Kolmogorov)局地均匀各向同性的假定。科尔莫戈罗夫引入结构函数来研究局地均匀各向同性湍流的统计结构,同时用量纲分析的方法证明了:在湍流惯性区内两点间的结构常数只与两点间的距离的 $2/3$ 次方有关,与两点的位置和相对方向无关,这就是著名的“ $2/3$ ”定律。科尔莫戈罗夫的理论是在速度的基础上推导的,但在小尺度的情况下温度起伏或折射率起伏同样可以认为满足局地均匀各向同性的假定和结构函数的“ $2/3$ ”定律<sup>[1]</sup>。具体情况表示如下:

$$D_n(r) = \langle [n(r_1 + r) - n(r_1)]^2 \rangle = C_n^2 r^{2/3}, \quad (1)$$

$$D_T(r) = \langle [T(r_1 + r) - T(r_1)]^2 \rangle = C_T^2 r^{2/3}, \quad (2)$$

其中 $D_n(r)$ 和 $D_T(r)$ 分别是折射率和温度的结构函数, $C_n^2$ 和 $C_T^2$ 分别是折射率和温度的结构常数。对于局地均匀各向同性的湍流,通常用结构常数可以表示湍流的强度,大气折射率结构常数 $C_n^2$ 是表示大气光学湍流强度的一个重要参量。国内外很多人对 $C_n^2$ 进行了观测和研究<sup>[2,3]</sup>。

在光波和电磁波波段,折射率 $n$ 可以表述为温度 $T$ 、气压 $P$ 的函数

$$n - 1 = 79 \frac{P}{T} \times 10^{-6}, \quad (3)$$

在光波和无线电波段湿度变化的影响比较小,可以不考虑。按照研究微小起伏时常用的小扰动法分别把折射率 $n$ 、温度 $T$ 和气压 $P$ 分解为平均项和起伏项:

$$n = \bar{n} + n', \quad T = \bar{T} + T', \quad P = \bar{P} + P',$$

代入(3)式,可以容易地得到折射率起伏项的表达式<sup>[4]</sup>:

$$n' = 79 \left[ \frac{P'}{\bar{P}} - \frac{T'}{\bar{T}} \right] \left[ \frac{\bar{P}}{\bar{T}} \right] \times 10^{-6}, \quad (4)$$

在实际大气中一般有 $\frac{P'}{\bar{P}} \ll \frac{T'}{\bar{T}}$ ,因此研究折射

率的起伏主要研究温度起伏的影响,其他参量如气压、湿度等起伏的影响可以忽略,表示为

$$n' = -79 \frac{\bar{P}}{\bar{T}^2} T' \times 10^{-6}, \quad (5)$$

$$C_n^2 = \left( 79 \frac{\bar{P}}{\bar{T}^2} \right)^2 C_T^2, \quad (6)$$

这就是折射率结构常数直接测量的依据和方

法<sup>[5]</sup>。

在大气中折射率的测量较为困难,而温度及其起伏量的测量比较容易实现,因此在测量折射率结构常数时,通常测量温度起伏量,再用平均的温度和气压来计算得到折射率结构常数。

在利用温度脉动探空测量折射率结构常数廓线时,直接得到的是温度结构常数廓线数据,需要加上温度和气压廓线才可以计算出折射率结构常数,而仪器中没有温度和气压数据的直接测量,在这种情况下,需要由模式给出温度和气压廓线,这就会带来一定的误差,这个误差的大小可以通过分析温度和气压模式的误差来估计,通过对温度和气压模式误差的分析,就可以了解计算得到的折射率结构常数结果的误差,对折射率结构常数廓线的使用有一定的意义。

由于气压的变化相对于温度的变化较小,下面着重分析温度模式误差的影响。(6)式对温度偏微分可以得到

$$\frac{\partial C_n^2}{\partial T} = -4 \times 79^2 \frac{P^2}{T^5} C_T^2, \quad (7)$$

对于温度的模式误差,有

$$\Delta C_n^2 = -4 \times 79^2 \frac{P^2}{T^5} C_T^2 \Delta T, \quad (8)$$

除以(6)式,可以估计相对误差为

$$\frac{\Delta C_n^2}{C_n^2} = -4 \frac{\Delta T}{T}, \quad (9)$$

由(9)式可以得知大气温度误差 $\Delta T$ 对大气折射率结构常数误差 $\Delta C_n^2$ 有直接影响,可以看到温度误差越大,则计算的折射率结构常数误差也越大,而温度越高,计算的折射率结构常数误差越小,假定温度为300 K,温度误差为5 K,所带来的折射率结构常数误差为7%。本文正是重点分析和讨论大气温度垂直分布特性以及由此带来的模式误差,并由此得出大气温度垂直分布特性误差对大气折射率结构常数分布特性误差的影响。

## 2 仪器和数据

大气温度结构常数 $C_T^2$ 的测量采用了安徽光机所研制的HTP-2型温度脉动探空仪,它装在气象用的120号气球上,气球的上升速度为400 m/min。探测器使用两个相距1 m的长度为2.4 cm直径10  $\mu$ m铂丝电阻,测量两点的温度差 $T_1 - T_2$ ,频率相应范围是0.05~30 Hz,系统噪声0.002 K。信号用变频方式调制在400 MHz的载波上由发射机发射到地

面,经气象探空接收机,再解调后由计算机并行口直接采集,每秒钟采集 100 次,采样 6 s。测量得到两点的温度脉动差值<sup>[6]</sup>,平均就得到大气温度结构常数

$$C_T^2 = \frac{(T_1 - T_2)}{r^{2/3}}, \quad (10)$$

同时采用了气象中常用的气球称重方法估算了气球升速,这样就由气球上升的时间可以估算出气球的高度,再由平均的温度廓线模式得到了气球所在高度的温度值,此温度值为估算值,由压高公式可以得到气球所在高度的气压。由(6)式和(10)式就可以计算出大气折射率结构常数。

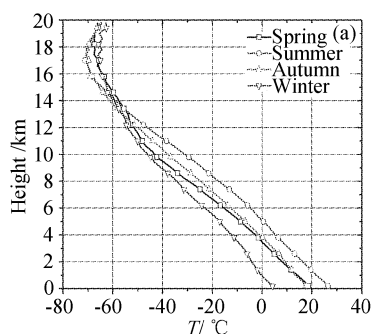
而气球所经路径的大气温度并非由温度脉动测量仪直接测得,此温度是由温度模式估算的平均温度,因此,用估计温度由(6)式和(10)式计算出的大气折射率结构常数就会有一定的误差,由(9)式可以算出大气温度的模式误差在计算  $C_n^2$  时所造成的具体误差值。

从 1997 年 4 月到 2002 年 10 月,在合肥地区共施放了近 100 次温度探空,探空高度一般在 20 km 以上,其中很多接近 25 公里的高度。施放的天气条件一般选择在晴朗的天气,施放时间一般在清晨 8 时左右和晚上 7 时左右。

### 3 分析和讨论

#### 3.1 大气温度 $T$ 高度分布特性

大气温度  $T$  随高度的增加有显著的变化,同时由于季节的不同,温度的值也会有相应的变化。观



测事实表明,随着天气条件不同,大气温度垂直分布又有很大的变化。即使在同一天中,由于测量时间的不同,大气温度的垂直分布廓线也会出现不同的差异。

图 1 是在合肥地区的大气温度垂直分布廓线,测量时间是从 1997 年 4 月到 2002 年 10 月,测量高度为 0~20 km 左右,数据中包括了白天和夜间的情况,图 1(a)按照春、夏、秋、冬四个不同的季节进行分类,在高度上用 400 m 为一层做平均。从图中可以看出大气温度随高度的增加,有显著的降低。四个不同季节的温度廓线在 0~11 km 之间随高度的增加呈相似斜率的线性递减,在 12~14 km 之间减少趋缓。这一高度正是对流层顶的高度,也是对流层和平流层的分界层,因此温度减少趋于缓和,并且随高度的继续增加有缓慢升高的趋势。

在图 1(a)中还可以看出,在地面春、秋两季的大气温度大致相同,在 18 °C 左右。并且随高度的增加,两季的分布廓线也大体相似。而冬、夏两季的地面温度分别约为 5 °C 和 27 °C,并随着高度的增加分布廓线趋于一致。在 12~14 km 之间,四季的温度廓线趋于重叠,即在此高度区间,各个季节的大气温度大体相同。

图 1(b)是合肥地区四季总体大气温度整层的垂直分布廓线。从图中可以看出其变化趋势与各个季节的变化趋势大体相同,也是随着高度的增加温度递减,从 14 km 向上温度减少趋缓并有增加的趋势。

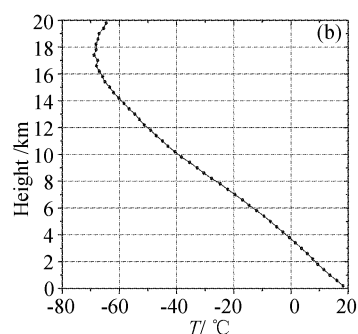


Fig. 1 Average profile of  $T$

#### 3.2 大气温度 $T$ 标准差廓线分析

在确定的湍流条件下,从结构函数的定义来看,温度起伏等同于温度的二阶矩,可以证明它是随气象条件变化而变化的。因此,通过对温度标准差廓线的分析和讨论,可以得到大气温度垂直分布特性误差  $\Delta T$  的范围和量级。最常用的温度模式方法是温度的平均模式,即使用平均的温度廓线,由于温度

会随不同的季节和天气条件变化,这就会带来一定的误差。

图 2 是合肥地区大气温度的标准差廓线。测量时间是从 1997 年 4 月到 2002 年 10 月,测量高度为 0~20 km 左右,数据中包括了白天和夜间的情况,图 2(a)分别按照春、夏、秋、冬四个不同的季节进行分类,在高度上用 400 m 为一层计算标准差。从图

中可以看出不同季节的大气温度标准差廓线均有不同。可以看到夏季整层的标准差一般在 $2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,平均为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,变化范围不大,即温度的模式误差也较小;春、秋、冬三个季节整层的标准差一般在 $2\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,平均为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,变化比夏季稍大,但总体来看,四个季节的温度模式误差都很小。

图 2(b)是合肥地区四季总体大气温度的标准差廓线,从图中可以看出,整层的标准差一般在 $3\sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,平均为 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,比各个季节的变化稍大,在靠近地面的边界层( $0\sim 2\text{ km}$ ),由于大气温

度受地表温度的影响较大,大气运动剧烈而频繁,因此温度分布特性误差较大,但是随着高度的增加,大气温度的变化趋于缓和,从 $12\text{ km}$ 左右向上进入平流层,大气运动平稳,温度的变化也相应的减小并趋于稳定,变化范围在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,从合肥地区四季总体温度在整层分布的标准差廓线来看,在相应的大气层中的温度变化范围不大,大气温度的垂直分布特性误差 $\Delta T$ 较小,由此可以得出合肥地区整层的大气温度模式误差不大。

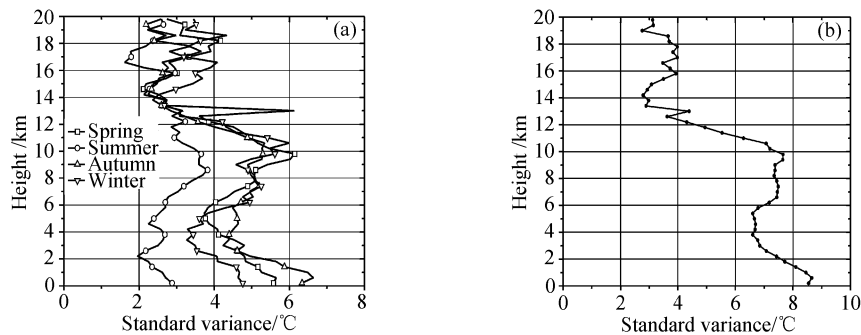


Fig. 2 Standard variance profile of  $T$

### 3.3 大气折射率结构常数计算误差分析

由于 $C_n^2$ 随时间、空间有较大的变化,对其统计矩的分析可以得出它变化的特点<sup>[7]</sup>。由前面对大气温度的分布特性误差 $\Delta T$ 的分析和计算,可以通过(9)式计算出折射率结构常数分布的相对误差 $\Delta C_n^2/C_n^2$ 的范围和量值,由此可以判断大气温度特性误差 $\Delta T$ 在计算过程中对 $C_n^2$ 的影响。

图 3 是合肥地区大气折射率结构常数标准差廓线。它是根据从 1997 年 4 月到 2002 年 10 月之间测量的近 100 份大气温度探空资料,由(9)式计算所得 $\Delta C_n^2/C_n^2$ 的标准差廓线,在高度上同样用 $400\text{ m}$ 为一层计算标准差。图 3(a)分别按照春、夏、秋、冬四个不同的季节进行分类,从图中可以看出不同季

节的 $\Delta C_n^2/C_n^2$ 标准差廓线均有不同,夏季整层的标准差一般在 $2\sim 6$ 之间,平均为 $4$ 左右,即相对误差 $\Delta C_n^2/C_n^2$ 约为 $4\%$ ,因此误差很小;春、秋、冬三个季节整层的标准差一般在 $4\sim 11$ 之间,平均约为 $7.5$ ,即相对误差 $\Delta C_n^2/C_n^2$ 约为 $7.5\%$ ,比夏季稍大,但总体来看,四个季节的相对误差 $\Delta C_n^2/C_n^2$ 的值都很小。

图 3(b)是用四个季节总体大气温度计算所得 $\Delta C_n^2/C_n^2$ 的标准差廓线。从图中不难看出整层 $\Delta C_n^2/C_n^2$ 的标准差大致在 $5\sim 13$ 之间,平均值为 $9$ ,即从整层来看,四季总体大气温度模式误差对计算 $C_n^2$ 造成的相对误差为 $9\%$ ,因此,由(8)式计算出的大气折射率结构常数误差 $\Delta C_n^2$ 也较小。这样计算出的 $C_n^2$ 应该可以比较准确的描述大气湍流的实际强弱。

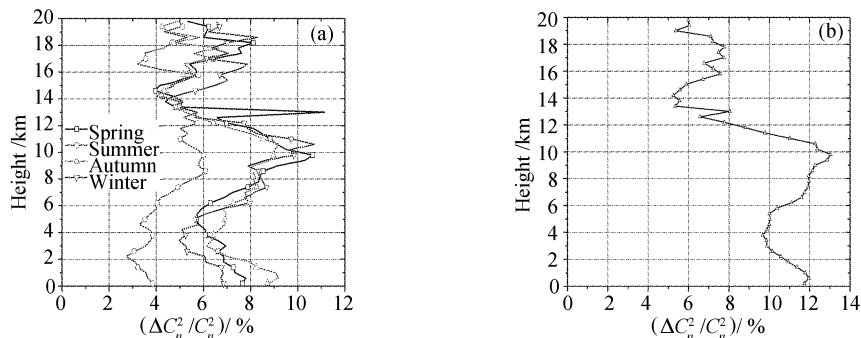


Fig. 3 Standard variance profile of  $\Delta C_n^2/C_n^2$

**结论** 1) 大气温度的垂直分布是不均匀的,观测事实表明,由于季节和天气条件的不同,大气温度垂直分布有很大的变化,其分布决定着垂直方向的热力不稳定性及大气湍流。大气温度在0~14 km之间随高度的增加而递减,平均的递减率约为 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。温度在14~16 km之间(对流层顶)减少趋缓,并且随高度的继续增加而逐渐升高。

2) 通过对近百份温度探空资料的分析 and 处理,可以大致了解合肥地区大气温度的垂直分布特性,并得出大气温度垂直分布特性模式误差,按季节平均约为 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,按总体平均约为 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,由此计算大气折射率结构常数时造成的相对误差也分别为 $7.5\%$ 和 $9\%$ ,都较小,且都在实验允许的误差范围内。因此,这种根据模式给出的估计温度计算得到的折射率结构常数 $C_n^2$ 是可信的。但在实验过程中还应注意大气温度分布特性误差对 $C_n^2$ 的影响。

3) 如果利用实际的大气温度计算大气折射率结构常数,则上述由模式估计的温度所造成的误差将会消除,但仪器中还没有对温度和气压实际数据的直接测量。在目前条件下,还需要由模式给出温度和气压廓线,由此带来误差的大小可以通过分析温度和气压模式的误差来估计,通过对温度和气压模式误差的分析,就可以了解所计算得到的折射率

结构常数结果的误差大小,对折射率结构常数廓线的使用有一定的意义。

### 参 考 文 献

- 1 Song Zhengfang. *Applied Atmospheric Optics* (应用大气光学基础). Beijing: China Meteorological Press, 1990. 67~70 (in Chinese)
- 2 Beland R R. *Propagation Through Atmospheric Optical Turbulence*. IE/E-O System Handbook Vol. 2. Fredericck G. Smith, Editor, SPIE Optical Engineering Press, 1993
- 3 Reffaele Barletti, Guido Cepatelli. Mean vertical profile of atmospheric turbulence relevant for astronomical seeing. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(12):127~128
- 4 Zhou Xiuji. *Altitude Atmospheric Physics* (高等大气物理学). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 252~346 (in Chinese)
- 5 Yuan Renmin, Zeng Zongyong, Weng Ningquan *et al.*. Comparison of some methods of measuring refractive index structure. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(6): 755~756 (in Chinese)
- 6 Yuan Renmin, Zeng Zongyong, Ma Chengsheng *et al.*. Laboratory simulation of light propagation in atmospheric convective boundary layer. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(5):519~520 (in Chinese)
- 7 Wen Jingsong. *Probability and Microcosmic Atmospheric Physics* (概率论与微大气物理学). Beijing: China Meteorological Press, 1995. 92~154 (in Chinese)