

文章编号: 0253-2239(2001)05-0518-04

大气对流边界层光传输的实验室模拟*

袁仁民 曾宗泳 马成胜 肖黎明

(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: 利用湍流池模拟大气对流边界层的光传输,同时测量了到达角起伏和光路上的温度脉动。结果表明,在混合层的上部,对数温度谱偏陡,和大气中的观测结果一致,到达角起伏谱也偏陡,但到达角起伏谱曲线反映了湍流在小尺度范围内具有各向同性的特征,此时利用温度脉动方法得到的折射率结构常数小;当边界层顶部逆温层消失,发展为完全对流状态时,温度谱幂率等于 $-5/3$,到达角起伏谱幂率等于 $-8/3$,两种方法测得的折射率结构常数一致。

关键词: 对流边界层; 到达角起伏; 湍流谱; 折射率结构常数; 各向同性

中图分类号: TN012 文献标识码: A

1 引 言

大气湍流一直被认为是影响大气光通讯、天文望远镜成像质量的重要因素。目前,自适应光学通过对波前相位进行校正在一定程度上克服了大气湍流的影响,改善了光信号的质量。但光传输理论和自适应光学技术大多都是建立在科尔莫戈罗夫统计理论基础之上。事实上,不断有报道湍流运动不满科尔莫戈罗夫理论的现象出现,例如,近地层和高空温度谱幂率偏离 $-5/3$ ^[1-3],光在近地面层传输时到达角起伏谱幂率偏离 $-8/3$ 等^[4]。

通常,光传输实验是在近地面层进行的,偶尔有利用飞机在高空进行,甚至于利用卫星来完成。很多人进行了非科尔莫戈罗夫理论研究和数值模拟。但是由于高度高以及湍流大气的复杂性和不易重复,直接在边界层上部进行实验的难度较大。

大气边界层是指大气层最底下的一个薄层,是大气与下垫面直接发生相互作用的层次,其厚度一般在几百米至 2 公里之间。白天由于太阳辐射通过地面加热,形成热对流,因此这时的大气边界层称为对流边界层。数十米以下为近地面层,一般温度呈超绝热递减;以上常称为混合层,温度呈绝热递减分布,位温几乎为常数。在边界层的顶部通常有一逆温层,逆温层以下的大气受下垫面的影响很大,而逆温层以上则不受影响。边界层内的对流使热量不断向上传递,边界层顶逐渐升高,有时达几千米。

我们在实验室开展光波通过大气边界层的传输研究,利用对流湍流池来模拟大气边界层,并进行光传输实验。

2 实验设备及测量

该湍流池是底部均匀加热、上部均匀冷却的水槽,其容积为 200 cm × 40 cm × 36 cm。工作物质为水。在湍流池两端侧面有两个直径为 19 cm 的通光孔,通光孔的中心离池底 18 cm。其详细结构见文献[5,6]。模拟边界层时将池上部的冷却水槽去掉。池中先加入干净不含有气泡的冷水至 30.0 cm 高度,然后再在上面均匀加热水至近 40.0 cm,控制热水温度使水池上部的温度梯度在(0.1~0.5)℃/cm 之间。然后对底部油箱加热以模拟太阳辐射加热,方法类似于文献[7]。

温度的测量分为温度廓线、温度结构常数 C_n^2 和温度脉动谱。5 个温度测量传感器均是利用铂电阻制作的,惯性时间为 0.05 s。其中一个安装在可以上下移动的支架下端,支架由受计算机控制的步进电机带动上下运动,运动的速度为 2.2 cm/s,用于测量温度廓线。此外,在一根竖直放置于池中央的支架上固定四个测量温度脉动的传感器,支架可以由步进电机带动水平移动测量温度在水平方向的变化、温度脉动的空间谱和结构函数。温度传感器的信号经放大、A/D 转换,由计算机以 25Hz 进行采样。

刚开始加热时,光路位于逆温层的下部,混合层的中上部。He-Ne 激光器发出的光经扩束后变成直径为 9.6 cm 的准直光,经过湍流池后再由直径为

* 国家自然科学基金(4977525)资助课题。

收稿日期:1999-09-08; 收到修改稿日期:2000-03-17

10 cm、焦距为 2.0 m 的会聚透镜接收聚焦于四象限探测器上,四象限探测器将光信号变成电信号后经 A/D 转换由计算机以 100 Hz 的频率采样以记录光斑位置的变化,从而得到光束到达角的变化,详见参考文献[6]。

3 实验结果

3.1 竖直方向温度廓线

图 1 给出了从底板开始加热起每隔 4 min 测量得到的 6 条竖直方向温度廓线。图中曲线经过光滑处理,去除了脉动成分。

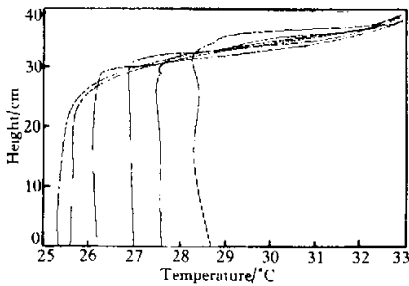


Fig. 1 Six vertical profiles of averaged temperature for stable layer

由图 1 可以看到在湍流池 30 cm 高度处有一逆温层。逆温层以下温度大致为常数。这和实际大气对流边界层位温为常数相似。在加热过程中,逆温层顶不断升高,这与太阳加热地面、对流边界层顶逐渐升高过程相似。由图可知光路几乎总是在边界层的上部,逆温层以下。

本次实验的加热功率是 2600 W。由图 1 可得在开始加热的 20 分钟内由底板向上的热通量为

$$Q_0 = \int_0^h \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} dz = 0.75 \times 10^{-3} \text{ mK/s,}$$

从而可以得到平均对流速度为

$$w_* = (g\alpha Q_0 z_i)^{1/3} = 0.8 \times 10^{-2} \text{ m/s,}$$

上式中 g 为重加速度, α 为水的热膨胀系数, z_i 为混合层厚度。因此再由图 1 可以得到 $\frac{1}{w_*} \frac{\partial z_i}{\partial t} = 0.014$, 而接近实际大气测量得到的该参数值为 0.018^[7]。

由边界层发展可知,在开始加热约 10 min 后可视为良好混合层,可进行温度脉动测量和传输实验。

3.2 温度脉动谱

图 2(a)给出了湍流池中边界层上部的温度脉动谱(温度传感器置于与光路等高度),由图 2 可看到,对数谱曲线的斜率明显偏离“-5/3”,实为“-2.2”,

这和高空观测的结果^[2]是一致的。

图 2(b)是在顶部逆温层消失后得到的温度谱,可以看到对数谱曲线的斜率为“-5/3”,满足“-5/3定律”。

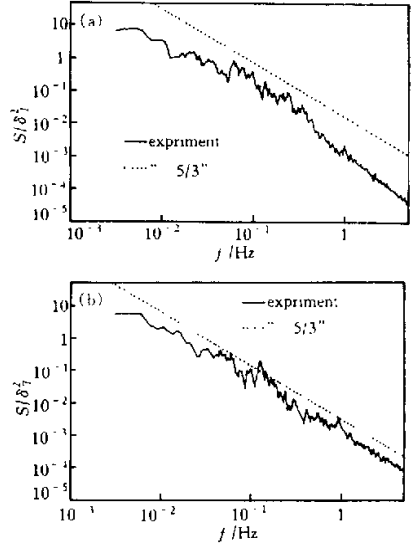


Fig. 2 Normalized temperature spectra (a) for the height near the top of the mixed layer, and (b) when the inversion disappears. S is spectrum density, δ_T^2 is variance of temperature fluctuation

由于没有进行速度的测量,因而无法计算能量耗散率 ϵ ,这里引用文献[7]的部分结果而得到本次实验条件下的湍流内尺度 l_0 约为 0.48 mm,对应频率约为 20 Hz,图 2(a)所示的曲线在大于 0.5 Hz 以上部分偏陡是由于湍流没有充分发展。

3.3 到达角起伏谱

到达角起伏的测量方法、原理及计算公式与文献[6]相同。利用快速傅里叶变换得到到达角起伏的时间谱如图 3 所示。图 3(a)是当光束位于边界层的上部时测量得到的,对应的温度如图 2(a)所示,图中的 x 、 y 方向分别为聚焦光斑沿水平和竖直方向的抖动分量。和图 2(a)相似,图 3(a)到达角起伏谱幂率偏离了“-8/3”约等于“-3.2”。由图 3(a)还可以看出, x 、 y 两个分量的谱密度,特别是高频区是一致的,因此可以说明,即使谱幂率不满足“-5/3”,湍流池可以具有各向同性的特征。这也是为那些按各向同性处理非科尔莫戈罗夫湍流传输问题的理论和数值模拟提供了依据。图 3(b)的到达角起伏谱对应于图 2(b)的温度谱。可以看到,对于充分发展的湍流,到达角起伏谱幂率为 -8/3。

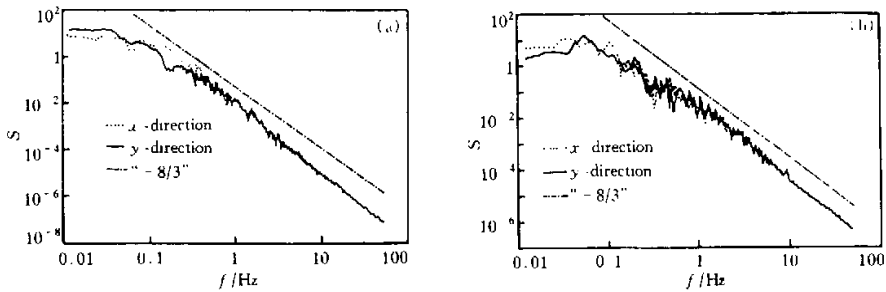


Fig. 3 Normalized spectra of the arrival angle fluctuation (a) for the height near the top of the mixed layer, and (b) when the inversion disappears

3.4 用两种方法测量折射率结构常数 C_n^2 的比较

平行光通过湍流介质后,到达角起伏方差表示为^[8]

$$\langle a^2 \rangle = 2.91 D^{-1/3} \int_0^L C_n^2(\eta) d\eta, \quad (1)$$

式中, D 为接收望远镜的直径, L 为光在湍流介质中传输的距离, 积分沿光路进行。利用此式可以计算光路上的 C_n^2 。

另外, 根据两点 M 和 M' 之间的温度脉动结构函数定义式^[9]

$$D_T = \overline{[T(M) - T(M')]^2}, \quad (2)$$

对于各向同性湍流场有

$$D_T = C_T^2 r^{2/3}, \quad (3)$$

式中, r 为 M 与 M' 之间的距离。水的折射率和温度之间的关系式为^[10]

$$10^5 (N - 1.332156) = -8.889(T - 2) - 0.161(T - 20)^2, \quad (4)$$

式中, N 为水的折射率, T 为水的温度 (单位为摄氏温度 $^{\circ}\text{C}$)。

利用以上两种方法测量得到的 C_n^2 的结果绘于图 4。图中横坐标为时间, 从开始加热算起; 纵坐标为 C_n^2 值。图上的数据在 0 ~ 25 min 是每分钟结果, 而 25 min 以后是 5 min 平均值。

由图 4 可以看到, 25 min 前到达角起伏测量得到的 C_n^2 约为温度脉动测量得到的 C_n^2 的 2 倍。而 25 min 后, 两种方法得到的 C_n^2 的一致性很好。当取 20 min 平均, 两者相差将小于 5%。

在前 25 min 以内, 光路所处的位置在混合层的上半部, 由于温度谱幂率小于 $-5/3$, 根据文献[11]的理论分析, 按对应的谱幂率, 到达角起伏测量 C_n^2 与温度脉动测量 C_n^2 之比大致也是 2 倍, 和实验结果一致。如图 1 所示, 底部加热 25 min 后, 顶部逆温层

消失, 湍流处于充分发展状态, 温度谱幂率等于 $-5/3$, 此时满足科尔莫戈罗夫湍流理论, 因此两种方法测量的 C_n^2 一致。

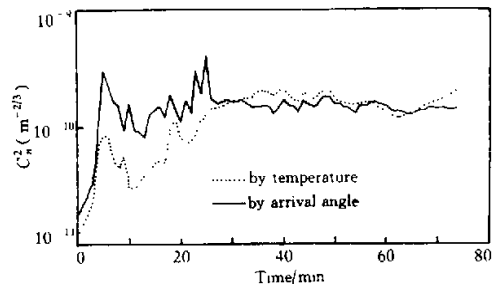


Fig. 4 Compare the measurement results of C_n^2 by means of temperature fluctuation and arrival angle fluctuation

结论

- 1) 利用湍流池进行大气边界层光传输模拟实验是切实可行的;
- 2) 在混合层上半部温度谱幂率偏陡, 到达角起伏谱幂率也偏陡;
- 3) 尽管到达角谱幂率偏陡, 但由到达角起伏时间谱所反映的湍流场在小尺度 (小于 10 cm) 范围内具有各向同性特征;
- 4) 在混合层上部, 由到达角起伏测量的折射率结构常数比由温度脉动测量的折射率结构常数大。这和理论计算是相符的。

参 考 文 献

- [1] Dayton D, Pierson B, Spielbusch, B. Atmospheric structure function measurements with a Shack-Hartman wave front-sensor. *Opt. Lett.*, 1992, 17(24): 1737 ~ 1739
- [2] Zeng Zongyong, Ma Chengsheng. Observations of temperature microstructure in the atmosphere. *Advances in Atm. Sci.*, 1985, 2(2): 234 ~ 242

- [3] 曾宗泳, 袁仁民, 谭 锐 等. 复杂地形近地面温度谱. 量子电子学学报, 1998, 15(2):133~139
- [4] Levine B M, Martinsen E A, Wirth A. *et al.*. Horizontal line-of-sight turbulence over near-ground paths and implications for adaptive optics corrections in laser communications. *Appl. Opt.*, 1998, 37(21):4553~4560
- [5] 肖黎明, 马成胜, 翁宁泉 等. 对流湍流发生池的设计与性能. 量子电子学报, 1999, 16(1):86~89
- [6] 张 骏, 曾宗泳, 龚知本. 对流湍流池 Fried 相干长度的光学结构. 光学学报, 1996, 16(12):1790~1795
- [7] Willis G E, Dearnorff J W. A laboratory modal of the unstable planetary boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 1974, 31(5):1297~1307
- [8] Tatarskii V 著, 温景嵩, 宋正方, 曾宗泳 等译. 湍流大气中波的传播理论(中译本). 北京: 国防工业出版社, 1978. 196~227
- [9] 周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学(上册). 北京: 气象出版社, 1991. 288~289
- [10] Dobbins H M, Peck E R. Change of refractive index of water as a function of temperature. *J. Opt. Soc. Am.*, 1973, 63(3):318~320
- [11] 袁仁民, 曾宗泳, 肖黎明 等. 不同方法测量折射率结构常数的比较. 光学学报, 2000, 20(6):755~761

Laboratory Simulation of Light Propagation in Atmospheric Convective Boundary Layer

Yuan Renmin Zeng Zongyong Ma Chengsheng Xiao Liming

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

(Received 8 September 1999; revised 17 March 2000)

Abstract: With the help of the turbulent cell, an experiment is carried out to simulate light propagation in atmospheric convective boundary layer. At the same time, fluctuation of arrival angle and fluctuation of temperature are sampled. The results show, in the upper mixed-layer, the logarithmic temperature spectrum becomes more steeper than “ $-5/3$ ” in the frequency range $f > 0.1$ Hz (It accords with the fact of atmospheric boundary layer), and the logarithmic arrival angle spectrum becomes more steeper than “ $-8/3$ ”, C_n^2 obtained by means of temperature fluctuation is lower than by means of arrival angle. When the inversion disappears, the temperature spectrum follows the inertial sub-range “ $-5/3$ law”, and the power of arrival angle spectrum is “ $-8/3$ ”, C_n^2 calculated by two methods is same.

Key words: convective boundary layer; fluctuation of arrival angle; turbulent spectrum; refractivity structure constant; isotropy