

利用超声风速仪估算近地层光学湍流强度

余申伟, 方强, 徐小峰, 翁宁泉, 肖黎明

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 安徽 合肥 230031)

摘要: 根据 K41 湍流理论和近地面层湍流相似理论, 研究了利用超声风速仪探测的常规气象参数计算折射率结构常数 C_n^2 的方法, 并与温度脉动仪实测的 C_n^2 结果进行了比较。分析了获得 C_n^2 的两种不同方法的优缺点, 同时对通过超声风速仪虚温计算 C_n^2 的方法进行了误差分析。分析结果表明, 计算得到的 C_n^2 在一定条件下较好地满足经验关系。由此可以得到, 利用超声风速仪获得的气象要素可以对 C_n^2 进行估算。

关键词: 大气光学; 大气折射率结构常数; 大气湍流相似理论; 气象要素; 超声风速仪

中图分类号: P427

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2007)03-0184-04

Estimation of Optical Turbulence Intensity by Ultrasonic Anemometer

YU Shen-wei, FANG Qiang, XU Xiao-feng, WENG Ning-quan, XIAO Li-ming

(Center of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: According to Kolmogorov-K41 theory, Monin-Obukhov similarity theory and semi-empirical relationships of Wyngaard, the optical turbulence refractive index structure constant C_n^2 is obtained by meteorology factors. But C_n^2 or C_T^2 is not easy or precise to measure directly. The meteorology data got from the ultrasonic anemometer were analyzed, and the results showed that the calculated C_n^2 was well agreement with the C_n^2 measured directly by the micro-temperature sensor.

Key words: atmospheric optics; refractive index structure constant; Monin-Obukhov similarity theory; meteorology factors; ultrasonic anemometer

1 引言

激光在大气中传输时, 由于大气湍流所导致的折射率起伏, 会产生光波的抖动、闪烁、光束强度的起伏和到达角起伏等效应, 破坏激光的相干性。通常激光测量、通讯和跟踪等工程都是在近地面完成的, 通常近地面湍流比高空湍流要强很多, 即使对于激光上行传输而言, 近地面的强湍流层也是非常

重要的。同时近地面的强湍流也是估算高空湍流强度的一个重要边界条件, 因此了解近地面层大气光学湍流的强弱及其变化规律是很有必要的。超声风速仪一般用来测量风速风向, 但它具有时间分辨率较高、仪器惯性较小的优点, 因此可以用它测量到的风速风向以及虚温的数据来估算光学湍流参数, 这对光学工程的应用有很好的实际意义。

本文的目的是利用 Monin-Obkhov 相似理论和

收稿日期: 2006-05-24; 修改日期: 2006-09-01

基金项目: 利用超声风速仪估算近地层光学湍流强度

E-mail: ysw@ustc.edu

Wyngaard 等的半经验关系式, 分析超声风速仪测量的近地面气象要素, 进而利用这些气象参数估算 C_n^2 的大小及其变化, 并与温度脉动仪测量得到的实验结果进行比较。

2 观测仪器

超声风速仪通过群声速来计算大气温度和风速值, 而群声速与声速和风速有如下关系: $U = cn + v$, 其中 U 为群声速; n 为垂直于波阵面的单位法线矢量; v 为风速; c 为静止大气中的声速。并且根据热力学原理, 对于理想气体可以得到声速与温度的关系: $c = 20.067\sqrt{T_v}$, 式中 $T_v = T(1 + 0.61q)$ ^[4] 为虚温, T 为大气温度, q 为比湿。

我们采用 Young 公司的 Model 81000 型超声风速仪进行气象观测, 它的部分性能指标: 温度脉动精度 0.01 K; 风速脉动精度 0.01 m/s; 采样频率 16 Hz。在实验中, 与 Model 81000 同时进行观测的还有安光所研制的 HTP-2 型温度脉动仪。该探测器使用两个相距 1 m, 长度为 2.4 cm, 直径 10 μm 的铂丝电阻, 测量两点的温度差 $T_1 - T_2$, 系统噪声 0.002 K。测量得到的温度脉动差值^[1], 平均后就可以得到大气温度结构常数 C_n^2 。

3 方法及数据处理

3.1 由湍流结构函数参数定义直接计算 C_n^2

根据 Kolmogorov 局地均匀各向同性湍流理论 (K41 理论), 在充分发展的湍流条件下, 折射率结构函数在湍流惯性区内满足距离的 2/3 定律^[6]

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

需要注意的是, 式中计算折射率结构常数时的平均指系综平均。在实际计算中, 由各态历经假定^[7], 可以用足够长的时间平均来代替系综平均。近地层湍流的惯性区一般在几个毫米到几米的范围, 温度脉动仪两点距离为 1 m, 可以认为始终处于惯性区范围内, 因此满足结构函数的 2/3 指数距离关系, 用 (1) 式来计算结构常数。

实际上, 由于空气湿度对光波波段折射率的贡献很小, C_n^2 也可以由温度结构常数的测量得到^[2]

$$C_n^2 = (79 \times 10^{-6} p / \bar{T}^2)^2 C_T^2, \quad (2)$$

这里, C_T^2 为温度结构常数且与 C_n^2 的定义相同; \bar{T} 为大气平均温度; p 为气压。同时根据湍流冻结假定^[2], 湍流的空间结构可以用湍流的时间序列来分析, 即: $r = \nu \Delta t$, ν 为平均风速, Δt 为测量气象参数瞬时值之间的时间间隔。

$$C_T^2 = \frac{\langle [T(t) - T(t + \Delta t)]^2 \rangle}{(\nu \Delta t)^{2/3}}, \quad (3)$$

由此, 利用超声风速仪测量的序列和风速时间序列, 通过 (2)、(3) 式的计算即可得出 C_n^2 。

3.2 由 Wyngaard 的半经验关系式计算 C_n^2

根据 Monin-Obkhov 相似理论和 Wyngaard 等的半经验关系式, 并利用超声风速仪测量的气象参数也能够计算出 C_n^2 。Wyngaard 等根据 1968 年 AFCRL 边界层实验数据, 利用量纲分析得出了经验关系式^[3]

$$C_T^2 = T_*^2 z^{-2/3} F(z/L), \quad (4)$$

$$F(z/L) = 4.9[1 + 2.4(z/L)^{2/3}], \quad z/L \geq 0, \quad (4.1)$$

$$F(z/L) = 4.9[1 - 7(z/L)]^{-2/3}, \quad z/L < 0. \quad (4.2)$$

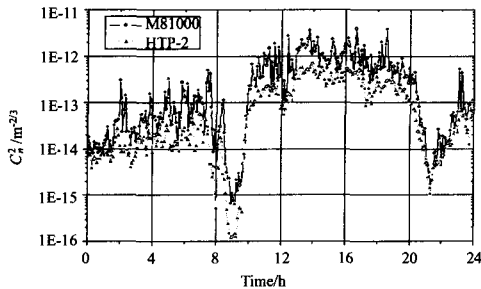
式中: z 为测量点高度; T_* 为特征温度, $T_* = -Q/u_*$, $Q = \overline{\theta'w'}$ 为近地层温度通量; θ' 和 w' 分别为温度脉动和竖直方向速度脉动; u_* 为摩擦速度; L 为 Monin-Obuhkov 长度, 表征边界层的稳定度, 且 $L = -u_*^3 \bar{\theta} / \kappa g Q$ 。 $\bar{\theta}$ 为大气平均温度; κ 为 Karman 常数, 通常 Karman 常数为: $\kappa \approx 0.35 \sim 0.4$ 。

在已知测量点高度 z 、大气平均温度 $\bar{\theta}$ 的情况下, 由超声风速仪测量的气象参数计算出 u_* 、 θ_* 和 L , 代入关系式 (4) 即可得到 C_T^2 , 再由 (2) 式得到 C_n^2 。

4 结果分析

4.1 直接计算 C_n^2

我们对 Model 81000 和 HTP-2 测量仪的大量测量结果进行了对比分析, 其典型的 C_n^2 日变化对比曲线如图 1 所示。从图中可以看到, 变化趋势以及日出日落的变换时刻等方面都与温度脉动仪的测

图1 HTP 和 Model 81000 的 C_n^2 比对Fig.1 Comparison of C_n^2 measured by HTP and Model 81000

量结果基本符合。特别指出在大气湍流较弱时, 超声风速仪与温度脉动仪的测量结果差别较大, HTP-2 测量结果可以下降到 $10^{-16} \text{m}^{-2/3}$ 的量级, 而 M81000 基本在 $10^{-15} \text{m}^{-2/3}$ 量级以上。

由关系式 $T_v = T(1 + 0.61q)$, 且 $q \leq 0.04$ ^[4], 以虚温 T_v 代替温度 T , 并联立关系式 (2)、(3) 可以得到

$$C_n^2 = \frac{(79 \times 10^{-6} P / \bar{T}^2)^2}{(\nu \Delta t)^{2/3}} < \Delta T^2 >, \quad (5)$$

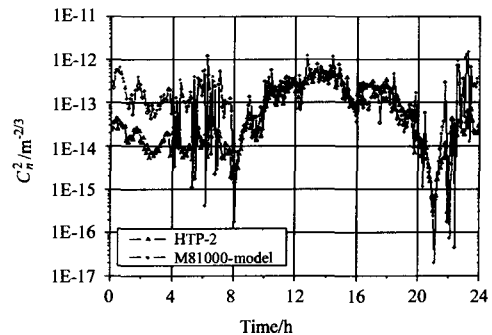
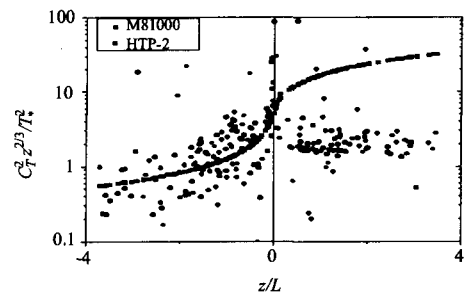
取 $\nu = 1 \text{ m/s}$; $\Delta t = 1/160$; $P = 1000 \text{ hPa}$; $\bar{T} = 300 \text{ K}$; 则可得 $C_n^2 \approx 10^{-11} < \Delta T^2 >$ 。由于 HTP-2 的测温精度 ΔT 为 0.001 K , 而 M81000 的 ΔT 只能达到 0.01 K , 因而利用超声风速仪的虚温直接测量 C_n^2 的方法不适合计算转换时刻或弱湍流条件下的 C_n^2 ($10^{-17} \sim 10^{-16} \text{m}^{-2/3}$)。同时由于以虚温 T_v 代替温度 T 进行计算, 使得 C_n^2 的计算值比温度脉动仪实测结果扩大了 $(1 + 0.61q)^2$ 倍, 即增大了 5% 左右。

4.2 利用相似理论计算 C_n^2

根据 Wyngaard 等的半经验关系式, 利用常规气象参数计算得到的 C_n^2 与温度脉动仪实测的 C_n^2 日变化对比如图 2。从图中可以看到变化曲线吻合的较好, 起伏一致。特别是日出日落的转变时刻以及转变时刻之间的结果吻合的非常好, 能很好地反映 C_n^2 在不稳定层结下 (转变时刻之间) 的变化规律。

同时从关系式 (2)、(4)、(4.1)、(4.2) 中可以得到, 如果 C_n^2 在 $10^{-17} \sim 10^{-13} \text{m}^{-2/3}$ 的量级间变化, 则要求特征位温 θ_* 在 $10^{-5/2} \sim 10^{-1/2} \text{ K}$ 之间变化, 而近地层温度通量 Q 在 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ mKs}^{-1}$

之间变化。Model 81000 型超声风速仪的风速脉动精度和温度脉动精度正好符合 θ_* 和 Q 的测量精度要求。

图2 用两种方法测量的 C_n^2 的比对Fig.2 Comparison of C_n^2 measured by two methods图3 C_T^2 随大气稳定度参数变化关系的比对Fig.3 Comparison of the variations of C_T^2 with atmospheric stability

由图 3 也可以看到, 当大气层结处于稳定时, 理论计算和试验结果离散较大, 其主要原因是理论本身的局限。相似理论是建立在不稳定条件下充分发展的湍流基础上, 假定近地面层为常通量层得到的, 因而对于不稳定层结下的应用, 理论与实验一致性较好。在夜间大气稳定的条件下, 湍流的发展主要是由于大气风速剪切引起的, 在这种机制下, 湍流强度的估算需要进一步研究和分析。另外, 这种估算方法产生的误差与测量精度、平均时间长短和粗糙度大小有关^[5]。

5 结论

通过以上的理论分析和实验结果比较可以得到:

1) 利用超声风速仪测量的虚温可以较好地估算出近地层平坦地形温度结构常数 C_T^2 , 从而计算

出 C_n^2 。但由于利用虚温以及温度测量精度的局限性, 限制了计算 C_n^2 的准确度。

2) 利用虚温直接计算 C_n^2 , 得到的结构常数日变化规律与温度脉动仪实测的结果吻合的很好, 而利用相似理论得出的 C_n^2 日变化规律在夜间与温度脉动仪实测的结果偏差较大, 在白天则吻合的非常好。

3) 在不稳定层结下, 利用超声风速仪测量的常规气象参数可以比较准确地计算出 C_n^2 。

考虑到 C_n^2 主要决定于小尺度起伏, 同时由于大气存在低频变化, 在一定的时间内可以假定满足平稳或平稳增量的条件, 本文对于数据平均时间取为 5 min。以上超声风速仪计算结构常数的结果, 也从另外一个角度验证了温度脉动仪测量结果的正确性和可靠性。

参考文献:

- [1] Yuan Renmin, Zeng Zongyong, Ma Chengsheng, et al. Laboratory simulation of light propagation in atmospheric convective boundary layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(5): 519-520 (in Chinese).
袁仁民, 曾宗泳, 马成胜, 等. 大气对流边界层光传输的实验室模拟 [J]. *光学学报*, 2001, 21(5): 519-520.
- [2] Zhou Xiuji. *Advanced Atmospheric Physics* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991 (in Chinese).
周秀骥. 高等大气物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [3] Wyngarrd J C, Izumi Y. Behavior of the refractive-index-structure parameter near the ground [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(12): 1646-1650.
- [4] Sheng Peixuan, Mao Jietai. *Atmospheric Physics* [M]. Beijing: Beijing University Press, 2003 (in Chinese).
盛裴轩, 毛节泰. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [5] Yuan Renmin, Zeng Zongyong, Ma Chengsheng. Estimation optical turbulence by meteorology factors [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(1): 87-91 (in Chinese).
袁仁民, 曾宗泳, 马成胜. 利用气象要素估算近地面光学湍流 [J]. *量子电子学报*, 2001, 18(1): 87-91.
- [6] Tatarski V I. *Wave Propagation in a Turbulent Medium* [M]. Beijing: Science Press, 1978 (in Chinese).
塔塔尔斯基. 湍流大气中波的传播理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [7] Stull R B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* [M]. Trans. by Yang Changxin. Beijing: Meteorology Press, 1991 (in Chinese).
斯塔尔. 边界层气象学导论 [M]. 杨长新, 译. 北京: 气象出版社, 1991.

作者简介: 余申伟 (1977-), 男, 硕士研究生, 主要从事大气光学湍流探测和规律研究。