

文章编号: 1001-4322(1999)06-0668-05

复杂地形近地面光学湍流*

曾宗泳, 刘小勤, 马成胜, 肖黎明, 袁仁民, 翁宁泉, 谭 钊

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥市 1125 信箱, 230031)

摘 要 分析了合肥一水库边, 近地面大气折射率结构常数 C_n^2 的观测结果。表明 C_n^2 的水平分布和时间变化与气象条件有关, 是近地面热量平衡变化的结果。由于大面积大热容量水体的存在, 使 C_n^2 的变化有复杂多样的特点。得到了用气象要素, 即气温、云量加上太阳高度分别估算近湖面和近地面 C_n^2 的经验公式。提出了估算复杂地形 C_n^2 的方法。

关键词 复杂地形; 结构常数; 热量平衡

中图分类号: TN247 **文献标识码**: A

激光束在湍流大气中传播时, 受到折射率小尺度起伏的影响, 造成光束强度起伏, 扩展和抖动等等。根据局地均匀各向同性的湍流理论, 量度这种折射率起伏强度的量为折射率结构常数, 定义为

$$C_n^2 = \langle [n(s_1) - n(s_2)]^2 \rangle r^{-2/3} \quad (1)$$

即空间 s_1, s_2 两点折射率 n 的差值平方平均后除以两点距离 r 的 $2/3$ 次方, 角括符表示系综平均。对于光波, C_n^2 可直接由温度结构常数 C_T^2 得到^[1]。 C_T^2 的定义和 C_n^2 的定义相同, 把 n 换成温度 T 即可。如果湍流大气是平稳的, 当平均时间足够长, C_T^2 可由时间平均得到^[2]。对于光传输问题, 也需要计算局部的、短时间平均的结构常数, 但本文只讨论式(1)定义的结构常数。

通过 C_T^2 的直接测量能够提供光传输路径上折射率起伏强度的分布, 而数十米以下的大气近地面有关 C_T^2 的理论可以作为分析预报结构常数变化的基础。湍流的平均量是可以预报的^[3], 对于均匀平坦地形, 结构常数 C_T^2 为^[1]

$$C_T^2 z^{2/3} / T_*^2 = f(z/L) \quad (2)$$

式中 z 为测量高度; T_* 为特征温度; L 为大气稳定度。函数 $f(z/L)$ 的形式可由实验确定, 其细节参看文献[1]。当 $z/L \gg 1$ 时, 式(2)可化简为

$$C_T^2 = 2.7(g/T_a)^{-2/3} E_g^{4/3} z^{-4/3} \quad (3)$$

式中 g 是重力加速度; T_a 为空气温度; E_g 为地面热通量。Kunkel^[4]通过解地面温度的热量平衡方程, 建立了平坦均匀地形计算 C_T^2 昼夜变化的模式。地面热通量的直接测量并不比 C_T^2 的测量容易, 相反激光传输的闪烁被用来测量热通量^[5]。但是能够通过地面热量平衡的分析来预测 C_T^2 的大小。热通量还可以写成^[4]

$$E_g = C_h u (T_g - T_a) \quad (4)$$

式中 C_h 为地面导热系数; T_g 为地表温度; u 为风速。联合(3)和(4)式, 不难得到 C_T^2 。

复杂地形时的结果比较少。Panofsky^[6]指出在近中性条件下, 当气流流经的下垫面其粗糙

* 国家 863 激光技术领域资助课题
1999 年 1 月 17 日收到原稿, 1999 年 11 月 1 日收到修改稿。
曾宗泳, 男, 1940 年 12 月出生, 研究员

度改变时,小尺度湍流在较短的距离就能和下垫面达到新的平衡。根据 Zeng^[7]的研究,不稳定条件下,障碍物下风方的近地面层中

$$\sigma_T/T_s = f(x/h)(-z/L)^{-1/3} \quad (5)$$

式中 σ_T 为温度起伏标准差; h 为障碍物的特征高度; x 为观测点至障碍物的距离。

本文将通过对复杂地形测量结果的分析,给出估算 C_n^2 的经验公式,提出估算复杂地形 C_n^2 的方法。

1 观测概况

测量场地在合肥市一水库边。水库东西长约 10km,南北宽约 2km。水库北侧有一个西北—东南向、宽约 700m 长不到 3km 的半岛,在半岛顶端的西侧,沿北北西—南南东方向的一条直线上,设置了 21 个测量点,各点相距 25m。从北面起,第一个点即 1 号点以及 2~6 号点,从草地经过,中间 7 至 18 号点在水面上,东面是鱼塘,大致呈扇形。鱼塘在东北角上往东北延伸,当吹东风时,可能影响到 1 至 6 号点。19 至 21 号点在地面上,但离西边的水库和东边的树林都很近。各点离地高度在 4m 左右。每个测点都有两个相距 1 米的温度传感器,测量空间两点的温度差,并配有一台单片机采样和进行 A/D 转换,记录的数据经网络送至控制计算机处理、贮存。每 12s 记录一组 21 个 C_n^2 值。由于平均时间短造成 C_n^2 偏小 2%。

温度传感器采用直径 10 μ m、长 2.4cm 的钨丝,频率带宽为 0.01~30Hz,噪声 0.002 $^{\circ}$ C。测量误差包括标定误差和传感器支架迟后误差约 15%。当钨丝被污染后对高频的响应变迟钝,但对 C_n^2 的结果影响不很大。

观测从 1995 年 8 月开始,1998 年 6 月止,得到了不同季节、不同天气(雨天除外)总共 1800 余小时的记录。1996 年 10 月下旬在水库中心一座两层小楼楼顶离水面 11 米的高度上,10 余天的 C_n^2 观测结果也被使用。测量场地上有一个气象站,每日 8 时和 14 时左右进行云、能见度、风、气温、湿度的定时观测,平时的温度和风速则由自动记录仪记录读取。

2 测量结果

3.1 折射率结构常数的日变化和频数分布

21 个测点 C_n^2 值特别是晴天均有白天强夜间弱的日变化,但鱼塘上的测点变化幅度要小。湖中心的 11 米高度上所有测量结果都表明了 C_n^2 不存在明显的日变化。

为满足工程设计的需要,表 1 给出了 21 个点不同 C_n^2 平均值出现的累计频数,即小于某一 C_n^2 值的百分数。

表 1 平均结构常数 C_n^2 小于所列数值时出现的频数

Table 1 Occurrence in percent of structure parameter C_n^2 smaller than the value in the same row

structure parameter $C_n^2/10^{-15}m^{-2/3}$	5.0	10	30	50	300
daytime	6%	10%	35%	80%	100%
night	47%	82%	100%		

需要说明的是, C_n^2 的频数分布还和气候有关。因此表中的结果仅可作为参考,利用大气和地表参数预报 C_n^2 值,才是可靠的方法。

2.2 湖中心的折射率结构常数

从式(4)出发,用气象站的气温代替水库中心的气温,用半个月平均气温 $\langle T_s \rangle$ 代替水

面温度,得到的温度差和 C_n^2 有明显的关联,结果见图 1。

通过图中的数据拟合得到

$$\lg C_n^2 = - (14.563 + 0.1355(T_a - \langle T_a \rangle) + 0.00555(T_a - \langle T_a \rangle)^2) \quad (6)$$

拟合曲线的相关系数等于 0.62,标准差为 $2.5 \times 10^{-15} \text{m}^{-2/3}$ 。由于测量点下楼房等因素的影响,数据有较大的离散。

2.3 近地面的折射率结构常数

地面热通量主要和太阳辐射,或地面向上的长波辐射有关。我们首先从平均影响出发来估算白天天空中云对辐射的作用^[8]

$$S/S_1 = 0.29 + 0.71(1 - 3I_d/40 - I_g/40) \quad (7)$$

式中 S 为太阳直接辐射; S_1 被假定是晴天的太阳直接辐射。上式中我们把总云量分成了低云量 I_d 和高中云量 I_g ,并各有不同的权重。晴天时的直接太阳辐射为

$$S_1 = S_0 \sin \beta \exp(-a/\sin \beta) \quad (8)$$

式中太阳辐射常数 S_0 ; β 为太阳高度;系数 a 和大气湿度、能见度有关,我们暂不考虑,而是定义一个相对量 S/S_0 并叫做太阳辐射因子。将(8)式代入(7),取 $a = 0.3$,可以计算出不同季节、不同云量时的 S/S_0 。3号测量点的 C_n^2 和 S/S_0 相关分析结果给在图 2 上,相关系数达到 0.68,标准差为 4×10^{-15} 。拟合曲线为

$$C_n^2 = 10^{-15} [41.2 + 1.89S/S_0 + 342.2(S/S_0)^2] \quad (9)$$

选择 3 号点是因为该点受水面和建筑物、树林的影响可能最小。因此上式有可能用于平坦地形近地面的情况。

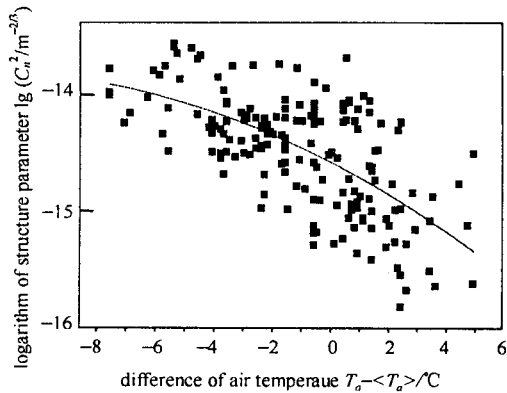


Fig. 1 The correlation of C_n^2 with difference of air temperature $(T_a - \langle T_a \rangle)$ (Averaging time of C_n^2 is one hour).

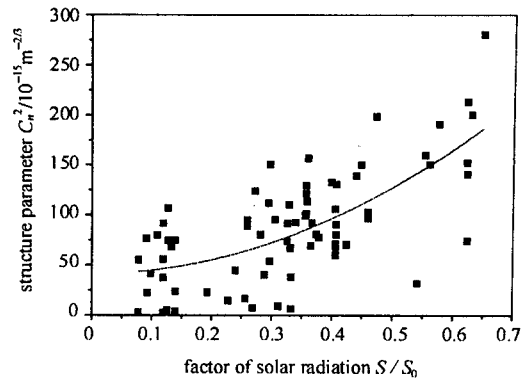


Fig. 2 The correlation of C_n^2 with the factor S/S_0 of direct solar radiation at No. 3 station in daytime.

夜间 C_n^2 值的变化因水面的影响变得复杂。总的来说,21 点平均 $C_n^2 > 5 \times 10^{-15} \text{m}^{-2/3}$ 的较强湍流中,80% 出现在低云量 = 0(成),高云量 < 2.5 (成)的时候。但晴天也出现 $C_n^2 < 5 \times 10^{-15} \text{m}^{-2/3}$ 的情况,可能和水面湍流弱有关。所以如果除去水面的影响,可以认为在一般土壤湿度较高时 $C_n^2 < 5 \times 10^{-15}$ 。下面分析夜间 C_n^2 的变化。

2.4 折射率结构常数的水平分布

晴天白天地面 C_n^2 比水面强很多,因此通常南北两端强中间弱。这有可能说明下垫面影响的范围。以图 3 为例,当风从树林吹向水面,鱼塘呈扇形,18~14 测点东边水面逐渐加宽到

80m, C_n^2 值也随着减小, 并接近水库中心的 C_n^2 。地面上的 6~1 号点离东边鱼塘的距离也逐渐增加, 3 号点达 120m, C_n^2 值也随之增加。考虑到鱼塘水面温度可能比水库水面要高, C_n^2 应高一些, 因此白天下垫面的影响距离在 100m 以下。此外, 南端 C_n^2 比北端高可能和树林有关。

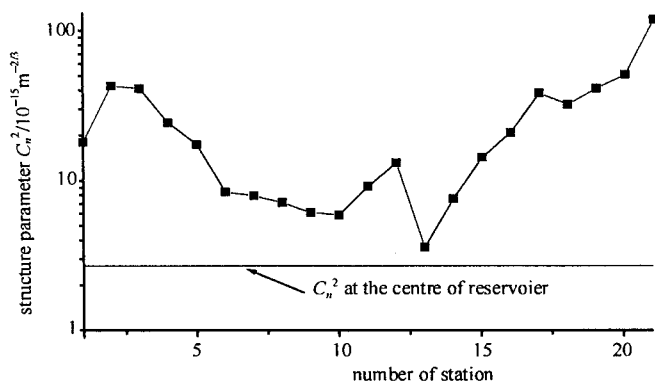


Fig. 3 Horizontal distribution of C_n^2 in daytime, 14:31~16:00, October 16, 1996, E, 3.2m/s, cloud cover 6/0 (all-cloud cover/low cloud cover)

图 3 白天 C_n^2 的水平分布, 1996 年 10 月 16 日 14:31~16:00, 风向 E, 风速 3.2m/s, 云量 6/0 (总云量/低云量)

夜间水库中心常常比鱼塘中心的 C_n^2 高很多, 但还不能完全说明夜间下垫面影响的范围很大, 这时小尺度湍流如何随下垫面改变需要进一步研究。

夜间湍流较弱 ($C_n^2 < 3 \times 10^{-15} \text{m}^{-2/3}$), 吹东风的时候, 中间测量点 C_n^2 比南北两端强。当湍流较强, 特别是冷空气过后吹西风的时候, 南北两端测量点 C_n^2 比中间强, 离水库水面近的南端 C_n^2 可能特别强, 19 号测量点曾有 C_n^2 达到 $8.9 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ 的记录。

不论上述哪一种分布, 只要气象条件没有大的变化, 分布的特征就不改变, 这是 C_n^2 水平分布的一个特点。同时说明了一个大小和气象条件有稳定关系的 C_n^2 的存在。

总结上述结果, 不同下垫面对 C_n^2 分布影响的大小和范围是随气象条件改变的。要较为准确地估算 C_n^2 , 必须根据气象条件, 特别是地面、水面大气的稳定度以及风速和风向来进行。

3 讨论

类似这种水陆交界的地方, 首先可用文中提出的公式估算假定未受上游影响的 C_n^2 值, 然后根据下垫面只影响局部区域 (尽管稳定条件时的影响距离还不清楚), 以及障碍物后高度分布和水平变化可以分开的道理, 给出不同位置的 C_n^2 值。

比较不同地方的测量结果可以看出地表特征对 C_n^2 的影响。表 2 列出了部分数据, 沙漠中的 C_n^2 最高, 特别在夜间 C_n^2 偏高。白天的估算值由式 (7) 计算, 取能见度为 10km, 云量的多少带有任意性。

由于大气复杂的变化有时可能测不到一个稳定的平均 C_n^2 值, 但并不意味着系综平均 C_n^2 不存在。系综平均和空间时间平均的关系; 复杂地形内边界层的出现, 从而改变 C_n^2 的高度变化规律; 局部地形的扰动可能使 C_n^2 局部增强, 这些是下一步应解决的问题。

表 2 C_n^2 测量结果的比较^[9]Table 2 Comparing of values of C_n^2 measured at variant terrain

structure parameter $C_n^2/10^{-15}\text{m}^{-2/3}$	grass *	desert *	surface at Hefei
daytime (summer)	40	160	120
night (summer)	6.4	10	4.1
estimate daytime	99	153	120
night	<5	>5	<5
zenith /°	40	35	30
cloud cover (all/low)	7/2	2/0	7/2

* 引自^[9]

参考文献

- Wyngaard J C and Izumi Y, et al. Behavior of the refractive-index—structure parameter near the ground. *J Opt Soc Am*, 1971, **61**:1646~1650
- 贝达特 J S. 凌福根译. 随机数据分析方法. 北京:国防工业出版社,1976,200
- Frisch U and Orszag S A. Turbulence; challenges for theory and experiment. *Physics Today*, 1990, (1):24~32
- Kunkel K E and Walters D L. Modeling the diurnal dependence of the optical refractive index structure parameter. *J of Geophys Res*, 1983, **88**(c15):10999~11004
- Thiermann V and Grassl H. The measurement of turbulent surface-layer fluxes by use bichromatic scintillation. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, **58**:367~389
- Panofsky H A and Larko D. Spectra of velocity components over complex terrain. *Q J R Meteor Soc*, 1982, **108**:215~230
- Zeng Zongyong, et al. An analysis of the turbulent structure in the unstable surface layer nearby a shelter belt. *Advances in Atmos Sci*, 1989, **6**:494~500
- Houghton H G. *Physical Meteorology*. The MIT Press, 1985.89~189
- Wesely M L and Alcaraz E C. Diurnal cycles of the refractive index structure function coefficient. *J of Geophys Res*, 1973, **78**:6224~6229

OPTICAL TURBULENCE IN THE SURFACE LAYER OVER COMPLEX TERRAIN

ZENG Zong-yong, LIU Xiao-qin, MA Cheng-sheng, XIAO Li-ming,
YUAN Ren-min, WENG Ning-quan, TAN Kun

Anhui Institute of Optical and Fine Mechanics, Academia Sinica, P. O. Box 1125, Hefei 230031

ABSTRACT The experimental data of atmospheric refractive index structure parameter (RISP) in the surface layer over the complex terrain measured at the top of a peninsula in Hefei were analysed. It is shown that because of a large area of water possessing large thermal capacity existing, the variation of (RISP) is complicated and variety. Experience formulas used for estimation of (RISP) in the surface layer over water and land were obtained. A method used for estimation of (RISP) in the surface layer over complex terrain was presented.

KEY WORDS complex terrain; structure parameter; thermal balance