

文章编号: 0253-2239(2004)12-1599-4

湿度起伏对可见光波段折射率结构常数的影响

吴晓庆 饶瑞中

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 大气折射率起伏主要是由温度和湿度起伏引起的。提出一种研究湿度起伏对折射率结构常数影响的新方法,即从超声风速计测量的虚温信号中提取出湿度起伏的信息,可计算出湿度起伏、温湿相关项的结构常数。采用自行研制的温度脉动仪和超声风速计分别在湿度差异较大的干燥的戈壁滩和潮湿的海边进行实验,并用实验时的气象参量对湿度起伏进行了模式计算。测量和模式计算都表明:湿度起伏本身对 C_n^2 的贡献很小,可忽略不计,湿度起伏对 C_n^2 的影响主要是通过温度起伏相结合来实现的,在一般情况下,这种贡献不到 10%。但在湿度较大,特别是日落前 C_n^2 处于最小值附近,温湿相关项的贡献可超过 10%。

关键词: 大气光学; 折射率结构常数; 湿度起伏影响; 超声风速计虚温; 模式计算

中图分类号: P427.1 文献标识码: A

Effects of Humidity Fluctuation on the Structure Parameter of the Refractive Index for Visible Radiation

Wu Xiaoqing Rao Ruizhong

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

(Received 26 July 2003; revised 20 February 2004)

Abstract: The refractive index fluctuation of atmosphere are mainly caused by variations in temperature and humidity. A new method of studying effects of humidity fluctuation on the structure parameter of the refractive index is proposed. Humidity fluctuations is obtained from fluctuations of 'sonic temperature', very closely equivalent to virtual temperature, using a three-component sonic anemometer. The structure parameters C_n^2 , C_{TQ} , can be calculated. C_n^2 and temperature fluctuation, humidity fluctuation are measured by a sonic anemometer and microthermal probe both in dry desert and in damp sea shore. Meanwhile, the humidity fluctuation can be estimated by a mode using field experiment meteorologic condition as input parameters. Both measurement and mode show that humidity directly influencing C_n^2 can be ignored. Humidity effects is mainly achieved associating with temperature fluctuation. Generally, the contribution to C_n^2 is less than 10% except near a marine surface or saturated soil especially during occurrence minimal C_n^2 before sunset.

Key words: atmospheric optics; the structure parameter of the refractive index; humidity fluctuation influence; sonic anemometer's virtual temperature; model estimation

1 引 言

众所周知,大气折射率起伏主要是由温度和湿度起伏引起的。对于可见光而言,大多数人认为在

通常情况下湿度起伏可忽略不计。但对于潮湿沼泽地或海面上,湿度起伏的最大贡献有 20%^[1]。而 Arnold 等^[2]分析了他人测量的野外实验数据(基本数据包括净辐射通量、显热通量、潜热通量、一些气象参量等),得出的结论与其他学者不同。他们发现,对于可见光波段,湿度起伏的影响不仅大于文献报道,有时甚至超过温度起伏。本文提出一种新方

E-mail: xqwu@aiofm.ac.cn

收稿日期:2003-07-26;收到修改稿日期:2004-02-20

法,即用超声风速计和温度脉动传感器同时测量温度起伏,从超声测量的虚温信号中,提取出湿度起伏的信息,得到潜热通量,计算出湿度起伏、温湿相关项对光学湍流的贡献,并用模式计算了他们在不同条件下所占的比重,用超声信号研究湿度起伏还没有见报道。

2 C_n^2 和 C_T^2 、 C_Q^2 、 C_{TQ} 之间的关系

我们将折射率场的变化主要是由温度起伏引起的湍流称为光学湍流。在均匀各向同性湍流的假定下,折射率场的结构函数 $D_n(r)$ 定义为

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

$$l_0 \ll r \ll L_0$$

\mathbf{x} 和 \mathbf{r} 是位置矢量, r 是 \mathbf{r} 的大小, n 是折射率,对于波长为 λ 而言,它通常是气压 P 、气温 T 和绝对湿度 Q 的函数, C_n^2 是折射率结构常数, l_0 和 L_0 分别是内尺度和外尺度。 C_T^2 、 C_Q^2 的定义与 C_n^2 相同,把 n 换成温度 T 或 Q 即可。

C_n^2 和各结构常数间的关系为^[3~5]

$$\begin{cases} C_n^2 = A^2 C_T^2 + 2ABC_{TQ} + B^2 C_Q^2, \\ C_{TQ} = \pm \sqrt{C_T^2 C_Q^2}, \end{cases} \quad (2)$$

对于确定的电磁波,在给定的气象条件下, A 和 B 是常量。如波长是 $0.55 \mu\text{m}$ 时, $A = 79.0 \times 10^{-6} (P/T^2)$, $B = -56.4 \times 10^{-6}$ 。

为计算出 C_Q^2 和 C_{TQ} , 我们使用 Wesely^[6] 提出的关系式

$$\sqrt{\frac{C_T^2}{C_Q^2}} = \frac{\overline{w'T'}}{\overline{w'Q}}, \quad (3)$$

这样,只要得到显热通量 $\overline{w'T'}$ 、潜热通量 $\overline{w'Q'}$ 和温度结构常数 C_T^2 , 就可计算出 C_Q^2 和 C_{TQ} 。

3 超声风速计测量气温原理

超声风速计有三个非正交轴,每个轴有两个传感器,可同时发射和接收两个相反方向的超声波脉冲信号。对一个轴而言,两传感器间距离是确定的,脉冲传输时间可以知道,这样可得到声速和风在该轴上的分量。同理,可得到三个非正交轴上的风速分量 u_a 、 u_b 、 u_c ,非正交轴上的风速分量可通过 3×3 坐标变换矩阵变换到正交轴上。

在湿空气中,声速是温度和湿度的函数。

$$c^2 = \gamma_d R_d T (1 + 0.51Q) = \gamma_d R_d T_s, \quad (4)$$

$\gamma_d = 1.4$ 是干空气定压比热和定容比热的比值,

$R_d = 287.04 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ 是干空气的气体常量, Q 是绝对湿度,定义为湿空气的水汽质量与湿空气的总质量之比。 T_s 是声虚温, T 是气温,单位是开尔文。

$$T = T_s / (1 + 0.51Q), \quad (5)$$

对(5)式进行泰勒展开,保留一阶项,并作全微分,得到起伏量。

$$T' = (1 + 0.51Q) T_s' - 0.51 T_s Q', \quad (6)$$

$$\overline{T'w'} = k \overline{T_s'w'}, \quad (7)$$

$$\overline{T'^2} = k^2 \overline{T_s'^2}, \quad (8)$$

其中 $k = 1 - 0.51\overline{Q} - 0.51\overline{T_s} \cdot \frac{\overline{Q'w'}}{\overline{T_s'w'}}$, w' 是垂直风速分量。

这样由温度脉动传感器测量出 T' , 超声风速计测量出 T_s' 和三个速度分量,得到 C_T^2 和显热通量 $\overline{w'T'}$, 由(8)式可得到潜热通量 $\overline{w'Q'}$ 。这样,由(2)式和(3)式可计算出 C_Q^2 和 C_{TQ} 。

4 湿度起伏的实验结果

为便于比较不同湿度条件下湿度起伏对光学湍流的影响,我们选择湿度差异较大的两地进行实验。实验分别是 2001 年 10 月采用自行研制的温度脉动仪和国产的超声风速计在戈壁滩,和 2002 年 11 月采用美国 Young 公司超声风速计在一海边进行。实验期间的气温和相对湿度分别是 30°C 、 20% 和 15°C 、 85% 。

图 1 是干燥戈壁滩用超声风速计和温度脉动仪测量的折射率结构常数 C_n^2 和温度起伏、湿度起伏对折射率结构常数 C_n^2 的贡献,图 2 是潮湿的海边用超声风速计和温度脉动仪测量的折射率结构常数 C_n^2 和温度起伏、湿度起伏对折射率结构常数 C_n^2 的贡献。

从图 1 看出,超声风速计和温度脉动仪测量的 C_n^2 差别不大,温湿度相关项 C_{TQ} 对 C_n^2 的贡献与 C_T^2 相比小 1 个多量级,湿度起伏的贡献小 2 个多量级。在图 2 中,超声风速计和温度脉动仪测量的 C_n^2 有一定的差别,如在 20 h 和 45 h 附近,两者有较大的差别。与之对应的 C_{TQ} 和 C_T^2 相差却不到 1 个量级。总之,若超声风速计和温度脉动仪测量的折射率结构常数 C_n^2 差别不大,则 C_{TQ} 和 C_T^2 相差 1 个多量级,若超声风速计和温度脉动仪测量的折射率结构常数 C_n^2 相差较大,则 C_{TQ} 和 C_T^2 相差不到 1 个量级。不管在那种实验条件下,湿度起伏本身的贡献很小,它是通过与温度起伏相结合来影响光学湍流的。

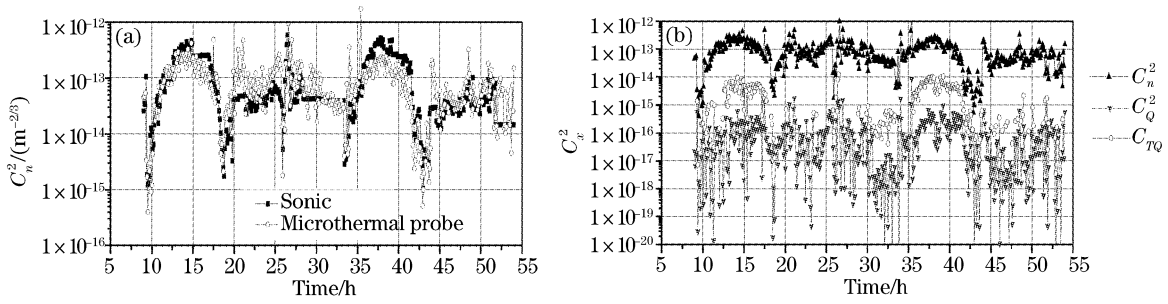


Fig. 1 Measured results in dry desert

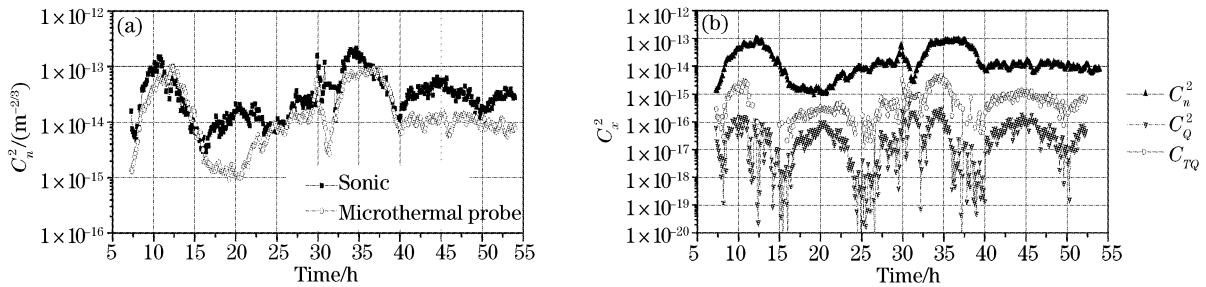


Fig. 2 Measured results in damp sea shore

5 湿度起伏的模式估算

(2)式的温度、湿度、温湿相关项的结构常数可通过 Monin-Obukhov 表面层相似性参量估算出来：

$$\begin{aligned}
 C_T^2 &= T_*^2 Z^{-2/3} f(\zeta), \\
 C_Q^2 &= Q_*^2 Z^{-2/3} A f(\zeta), \\
 C_{TQ} &= r_{TQ} T_* Q_* Z^{-2/3} A^{1/2} f(\zeta),
 \end{aligned} \tag{9}$$

其中 T_* 是表面层温度尺度, Q_* 是表面层湿度尺度, $\zeta = Z/L$ 是无量纲稳定度参量, L 是 Monin-Obukhov 长度, $f(\zeta)$ 经验公式由 Wyngaard 等给出：

$$f(\zeta) = \begin{cases} 4.9(1 - 7Z/L)^{-2/3}, & Z/L < 0 \\ 4.9[1 + 2.4(Z/L)^{2/3}], & Z/L > 0 \end{cases} \tag{10}$$

A 是常量近似为 0.6, r_{TQ} 是温湿相关项参量为 0.8, 我们采用一维折射率结构常数数值模式^[7] 来进行数值计算, 输入的参量是气温分别为 30 °C 和 15 °C, 相对湿度分别为 20% 和 85%, 土壤单位体积含水量的质量比分别是 0.08 和 0.18, 其它输入参量相同。

图 3 和图 4 分别是干燥沙漠气象条件下模式计算的 C_n^2 、 C_T^2 、 C_Q^2 和 C_{TQ} 值, 以及这种条件下 C_T^2 、 C_Q^2 、 C_{TQ} 对 C_n^2 贡献的百分比(图 3 中 C_n^2 和 C_T^2 基本重合)。

而图 5 和图 6 则是潮湿的海边气象条件下用模式计算的 C_n^2 、 C_T^2 、 C_Q^2 和 C_{TQ} 值, 以及在该条件下 C_T^2 、 C_Q^2 、 C_{TQ} 对 C_n^2 贡献的百分比。

从模式计算结果看, 湿度起伏本身对折射率结

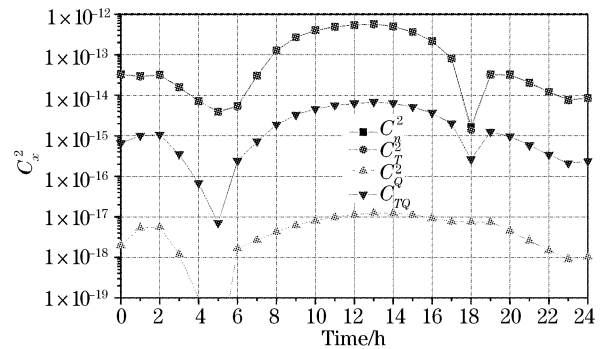


Fig. 3 Calculated results by the model at 30 °C and 20% RH

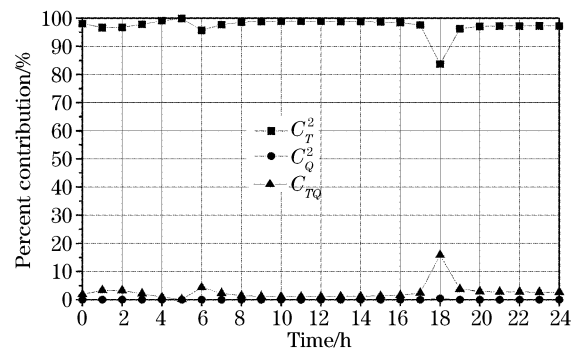


Fig. 4 Percent contribution of C_T^2 , C_Q^2 , C_{TQ} to C_n^2

构常数 C_n^2 的贡献很小, 可忽略不计, 在一般情况下, 温湿相关项对折射率结构常数 C_n^2 的贡献不超过 10%, 在日落前折射率结构常数 C_n^2 处于最小值附近, 温湿相关项对折射率结构常数 C_n^2 的贡献往往超

过 10%。

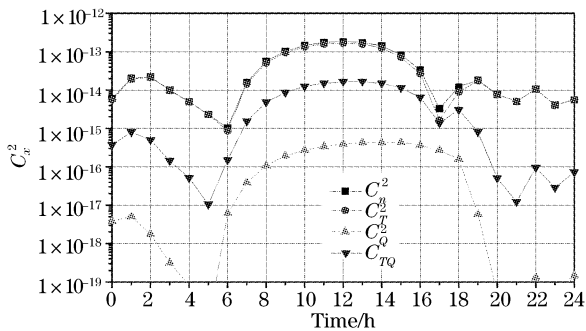


Fig. 5 Calculated results by the model at 15 °C and 85%RH

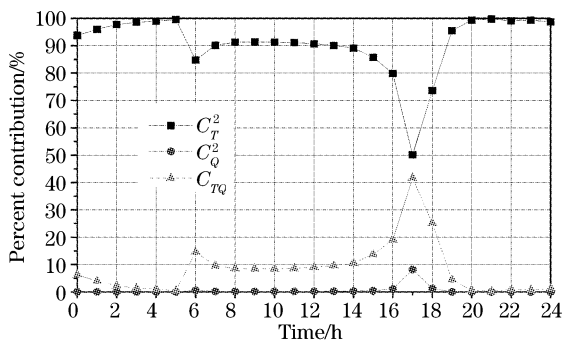


Fig. 6 Percent contribution of C_T^2 , C_Q^2 , C_{TQ}^2 to C_n^2

结论 本文提出一种新方法,即用超声风速计研究湿度起伏对光学湍流的影响。并用模式计算了在不同条件下各量对折射率结构常数 C_n^2 贡献的百分比,实验结果与模式计算结果基本一致,湿度起伏本身

对折射率结构常数 C_n^2 的贡献很小,在一般情况下,这种贡献不到 10%,可忽略不计。但在湿度较大,特别是日落前折射率结构常数 C_n^2 处于最小值附近,温湿相关项的贡献可超过 10%。

参 考 文 献

- 1 Friehe C A, La Rue J C, Champagne F H *et al.*. Effects of temperature and humidity fluctuations on the optical refractive index in the marine boundary layer. *J. Opt. Soc. Am.*, 1975, **65**(12): 1502~1511
- 2 Arnold T, Henry R. Estimating effects of temperature and moisture on in the damp unstable boundary layer for visible, infrared, radio, and millimeter wavelengths. *Proc. SPIE*, 1992, **1688**: 465~476
- 3 Wyngaard J C, Pennell W T, Lenschow D H *et al.*. The temperature-humidity covariance budget in the convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35**(1): 47~58
- 4 Kohsiek W. Measureing C_T^2 , C_Q^2 and C_{TQ}^2 in the unstable surface layer, and relations to the vertical fluxes of heat and momentum. *Boundary-Layer Meteorol.*, 1982, **24**(1): 89~107
- 5 Andreas E L. On the Kolmogorov constants for the temperature-humidity cospectrum and the refractive index spectrum. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**(17): 2399~2406
- 6 Wesely M L. The combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index. *J. Appl. Meteor.*, 1976, **15**(1): 43~49
- 7 Wu Xiaoqing, Wang Yingjian, Zeng Zongyong *et al.*. Numerical model of atmospheric optical refractive index structure parameter. *High Power Laser and Particle Beams (强激光与粒子束)*, 2002, **14**(6): 819~822 (in Chinese)