

湿度起伏对可见光波段 C_n^2 影响的再研究

聂 群, 吴晓庆, 方 强

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 用 Li7500 CO₂/H₂O 分析仪直接测量了近海边湿度起伏数据, 结合温度脉动仪和超声风速计测量的数据, 计算出湿度、温度和温湿相关项的结构常数, 研究了湿度起伏对 C_n^2 的影响。结果表明: 对于可见光, 相对于温度起伏而言, 湿度起伏和温湿相关项的贡献都很小。实验期间不论是白天还是夜晚, 都有与 Kolmogorov $-5/3$ 谱相近的温度谱和湿度谱存在, 并且, 在低波数区出现 -1 次方谱幂率, 绝大部分湿度谱幂率值处于 $-5/3 \pm 0.2$ 的区间内。

关键词: 湿度起伏; 折射率结构常数; 谱幂率

中图分类号: P427

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2007)03-0175-04

Reinvestigation of Humidity Fluctuation Influence on C_n^2 in Visible Range

NIE Qun, WU Xiao-qing, FANG Qiang

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

Abstract: Humidity fluctuation data in damp sea shore were directly measured by Li7500 CO₂/H₂O analyzer. Temperature fluctuation was measured by three component sonic anemometers. Utilizing these data, structure parameters C_t^2 , C_{tq} , C_q^2 were computed and then effects of humidity fluctuation on the structure parameter of the refractive index were reinvestigated. Results showed, for visible range, both humidity effects and temperature-humidity correlation term effects on C_n^2 is obviously less than temperature effects. At daytime as well as at night, there are temperature and humidity spectrum which follows Kolmogorov $-5/3$ law over inertial range during experiment, moreover, the spectrum power -1 is presented at low wavenumber range, most values of the humidity spectrum power are between $-5/3 - 0.2$ and $-5/3 + 0.2$.

Key words: humidity fluctuation; the structure parameter of refractive index; spectrum power

1 引 言

一般认为, 对于可见光和近红外光波段, 折射率的起伏主要是由温度起伏引起的, 湿度起伏的影响很小。Arnold 等^[1]分析他人的野外实验数据, 得

出不同的结论, 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, 在潮湿地带这种现象更为明显。吴晓庆等^[2]提出了从超声虚温信号中提取湿度起伏的信息, 来研

收稿日期: 2006-05-24; 修改日期: 2006-09-03

基金项目: 国家自然科学基金 (40475010)

E-mail: nqmoonshine@163.com

究湿度起伏对折射率结构常数的影响,得出的结论是: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 的影响主要是通过和温度起伏相结合来实现的。在一般情况下,这种贡献不到 10%;在湿度较大,特别是日落前 C_n^2 处于最小值附近时,温湿相关项的贡献可超过 10%。但这一结论是在间接测量湿度起伏和模式计算基础上得到的。本文采用 Li7500 CO₂/H₂O 分析仪在近海边直接测量出湿度起伏,得到湿度结构常数 C_q^2 、温湿相关项结构常数 C_{Tq} ,与温度脉动仪测量的 C_T^2 进行了比较,并对湿度起伏谱和温度起伏谱进行了初步分析。

2 C_n^2 与 C_q^2 、 C_{Tq} 、 C_T^2 之间的关系

折射率场的变化主要由温度起伏引起的湍流称为光学湍流。对于局地均匀各向同性湍流,折射率场的结构函数 $D_n(r)$ 定义为

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

$$l_0 \ll r \ll L_0. \quad (1)$$

x 和 r 是位置矢量, r 是 r 的大小, n 是折射率,对于波长 λ 而言,它通常是气压 P 、气温 T 和绝对湿度 Q (g/m³) 的函数, 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。对于温湿相关项,有

$$C_{Tq} = \frac{\langle [T(x) - T(x+r)][q(x) - q(x+r)] \rangle}{r^{2/3}}, \quad (2)$$

C_n^2 和各结构常数间的关系为^[3-5]

$$C_n^2 = A^2 C_T^2 + 2ABC_{Tq} + B^2 C_q^2,$$

$$C_{Tq} = \pm \sqrt{C_T^2 C_q^2}, \quad (3)$$

此处 q 为比湿,即水汽质量与湿空气总质量之比。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 μ m 时

$$A = 79.0 \times 10^{-6}, B = -56.4 \times 10^{-6}. \quad (4)$$

3 实验测量

2005 年 10 月在厦门附近沿海进行了为期半个月的测量。采用美国 Campbell 公司生产的三维超声风速仪,测量三维风速和超声虚温。声虚温测量

精度为 0.026°C。用 Li7500 CO₂/H₂O 分析仪测量水汽含量,水汽测量精度为 0.5 g/m³。采样频率为 50 Hz。

自行研制的温度脉动传感器,使用两个直径为 10 μ m 的铂丝,组成惠斯登电桥的两臂,测量相距为 1 m 的空间两点温差。传感器输出与两测量点温差起伏成正比,噪声为 0.002°C,带宽为 0.05~20 Hz,采样频率为 50 Hz。求出 15 s 的平方平均值后,由泰勒假定可得到温度结构常数 C_T^2 ,再由 C_n^2 与 C_T^2 的关系式^[7] 计算出 C_n^2 。

4 实验结果和分析

超声风速计、CO₂/H₂O 分析仪和温度脉动仪安装在距地面约 2.5 m 的高度。图 1 为 2005 年 10 月 13 日测量的结果,该天平均温度为 29°C,平均相对湿度为 71.5%。由图 1(a) 看出温度脉动仪和超声虚温计算得到的折射率结构常数 C_n^2 基本一致,特别是在白天。与文献 [1] 不同的是我们用超声风速计在夜晚测到的 C_n^2 比温度脉动仪测到的 C_n^2 还小,说明现在用的超声风速计测温精度远高于文献 [1] 的仪器指标。图 1(b) 是由 Li7500 测量的湿度起伏得到的 C_q^2 以及与温度起伏相结合得到的 C_{Tq} 与 C_T^2 的比较。测量结果验证了文献 [1] 的结论,相对于温度起伏而言,湿度起伏和温湿相关项的贡献都很小。

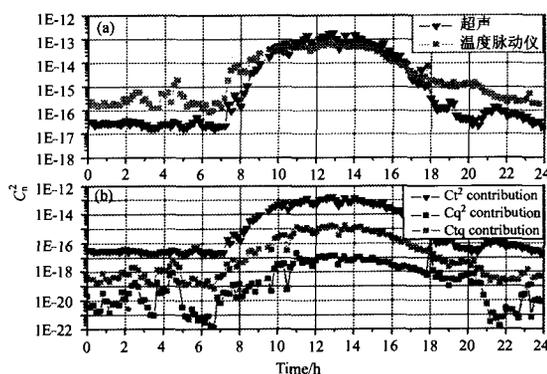


图 1 温度脉动仪和 Li7500 分析仪测量结果 (a) 超声风速计和温度脉动仪测量得出的 C_n^2 (b) 温度、湿度、温湿相关项对折射率结构常数的贡献

Fig.1 Measurement results of micro-thermal sensor and Li7500. (a) C_n^2 measured by sonic anemometers and micro-thermal probe (b) Contributions of C_T^2 , C_q^2 , C_{Tq} to C_n^2

我们分别取实验期间白天和夜晚两个不同时间段的测量数据, 对不同层结下的温度和湿度起伏进行谱分析, 采用常用的 FFT 变换。图 2(a) 数据取自中午 12 时, 图 2(b) 数据取自夜晚 22 时。可以看出, 不论是白天还是夜晚, 都有与 Kolmogorov

-5/3 谱相近的温度谱和湿度谱的存在, 并且, 在低波数区出现 -1 次方谱幂率。图 3 是湿度谱幂率的日变化, 绝大部分幂率值处于 $-5/3 \pm 0.2$ 的区间内。

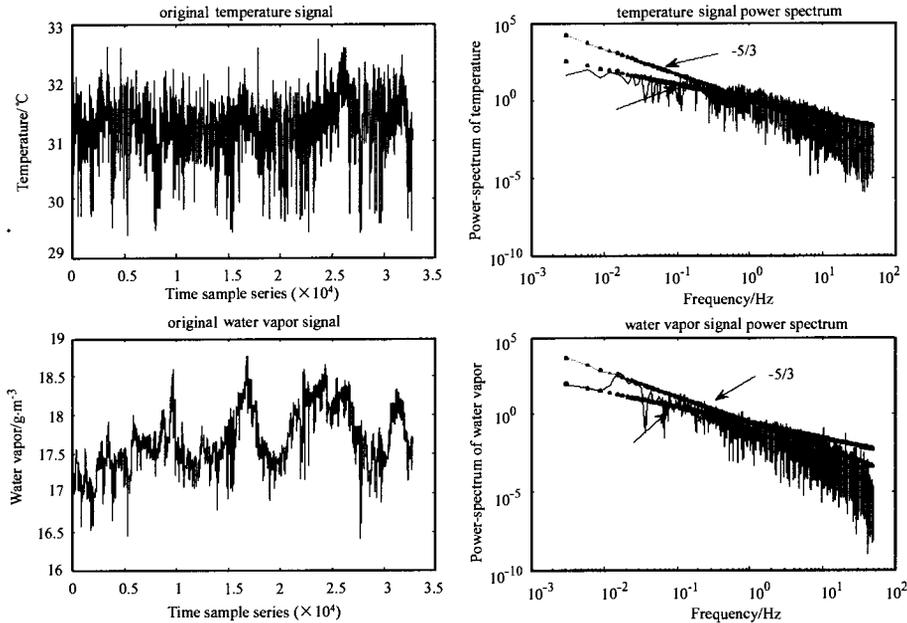


图 2(a) 2005 年 10 月 13 日 12 点温度和水汽功率谱

Fig.2(a) The temperature and water vapor signal power spectrum at 12:00, Oct. 13, 2005

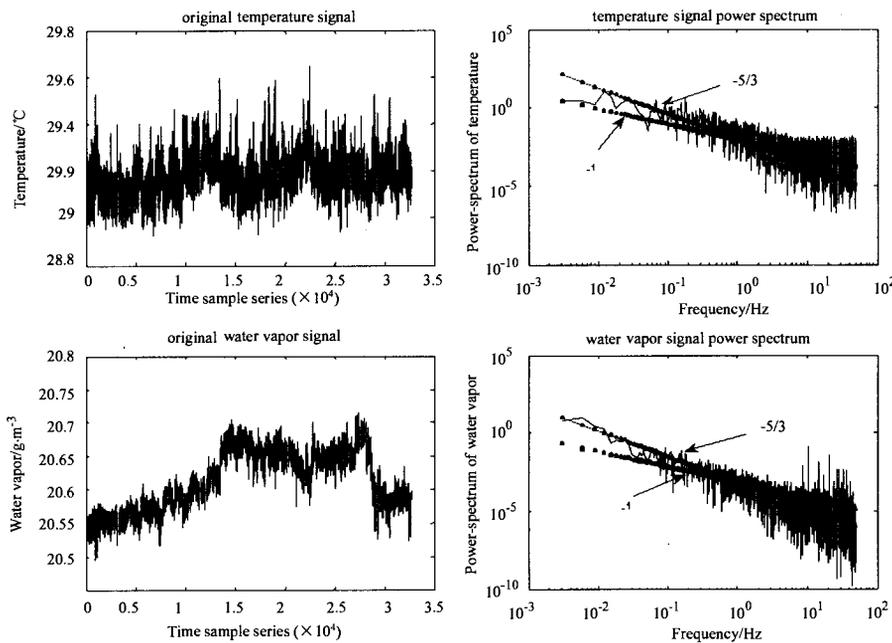


图 2(b) 2005 年 10 月 13 日 22 点温度和水汽功率谱

Fig.2(b) The temperature and water vapor signal power spectrum at 22:00, Oct. 13, 2005

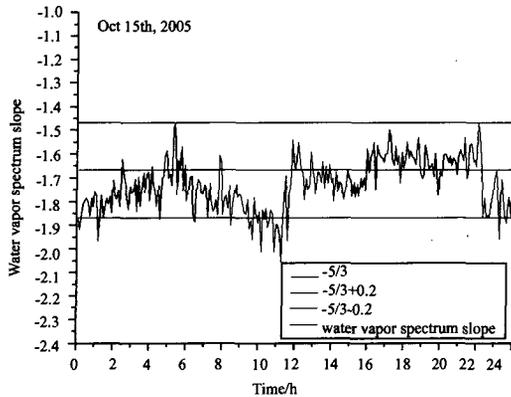


图3 水汽谱斜率

Fig.3 The slope of water vapor spectrum

参考文献:

- [1] Arnold T, Herry R. Estimating effects of temperature and moisture on in the dame unstable boundary layer for visible, infrared, radio, and millimeter wavelengths[C]. *Proc. SPIE*, 1992, **1668**: 465-476.
- [2] Wu Xiaoqing, Rao Ruizhong. Effects of humidity fluctuation on the structure parameter of the refractive index for visible radiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1599-1602(in Chinese).
- [3] 吴晓庆, 饶瑞中. 湿度起伏对可见光波段折射率结构常数的影响 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(12): 1599-1602.
- [4] Wyngaard J C, Pennel W T, Lenschow D H, et al. The temperature-humidity covariance budget in the convective boundary layer [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35**(1):47-58.
- [5] Kohsiek W. Measuring C_T^2 , C_Q^2 , and C_{TQ} in the unstable surface layer, and relations to the vertical fluxes of heat and momentum [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1982, **24**(1): 89-107.
- [6] Andress E L. On the Kolmogorov constants for the temperature-humidity cospectrum and the refractive index spectrum [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**(17): 2399-2406.
- [7] Moene A F. Effect of water vapor on the structure parameter of the refractive index for near-infrared radiation [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, **107**: 635-653.
- [7] Frederickson P A. Estimating the refractive index structure parameter(C_n^2) over the ocean using bulk methods [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, **39**(10): 1770-1783.

作者简介: 聂群 (1982-), 女, 中国科学院安徽光学精密机械研究所攻读硕士, 主要从事大气光学方面的测量和研究。