

近地面光学湍流估算与测量

何武光, 吴 健, 杨春平, 韩 勇, 徐光勇

(电子科技大学光电信息学院 成都 610054)

【摘要】根据Monin-Obkhov相似理论,建立了近地面大气估算和预测模型,并进行了数值分析。与其他基于相似理论的估算模型对比结果表明,在不稳定条件下利用气象要素和一些经验参数估算近地面平坦地形光学湍流,理论估计和实验结果符合较好,在低风速时折射率结构常数随风速增加而减小。利用Thiermann-Kohnle模型,结合地理位置和太阳辐射规律,预测了某地某时段的光学湍流,并通过实地测量气象数据估测了折射率结构常数和湍流内尺度。

关键词 气象要素; 光学湍流; 折射率结构常数; 相似理论; 近地面
中图分类号 TN21 **文献标识码** A

Estimation and Measurement of the Optical Turbulence over Land

HE Wu-guang, WU Jian, YANG Chun-ping, HAN Yong, and XU Guang-yong

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract A model for estimating and predicting the optical turbulence in the surface layer over land is presented based on Monin-Obukhov similarity theory, and some numerical analyses are carried out in comparison with other models. It is found that under unstable conditions, the optical turbulence over land with flat terrain can be well estimated by using standard meteorological parameters and some experiential data. The estimated result shows that the model is in good agreement with the measurements. When wind speed is low, the turbulence intensity (represented by refractive-index structure constant) becomes weaker with the stronger wind. The optical turbulence of some day and year is predicted with the Thiermann-Kohnle model by using geographic information and solar irradiance regularity. Finally, the refractive-index structure constant and inner scale are estimated using meteorological data measured on the spot.

Key words meteorological data; optical turbulence; refractive-index structure constant; similarity theory; surface layer over land

激光在大气中传输时,受大气湍流造成的大气折射率随机起伏影响,导致相位变化,波前扭曲变形,从而衍生出一系列诸如光束抖动、成像分辨率降低和光束相干度降低等大气湍流效应,严重影响了大气激光工程的精度^[1-2],而这些激光工程往往在近地面完成。在大气湍流参数中,最主要的是折射率结构常数 C_n^2 和内尺度 l_0 ,目前直接测量光学湍流参数的方法有很多种^[3],但直接测量在时间和空间上都受到很大限制。利用近地面气象要素,根据Monin-Obkhov相似理论估算折射率结构常数不失为一种简易可行的重要手段,考虑地形地貌及地气之间的热量收支还可以预测光学湍流状况。

文献[4]给出了利用地面气象观测估算温度结构参量的相似理论模型,文献[5]提出了根据天气状况通过地表辐射和热量收支估算一天内的地表热通量

和动量通量的经验程序。文献[6]提出了不同于Wyngaard模型的温度结构常数模型,文献[7-8]分别利用基于相似理论的Thiermann-Kohnle模型进行了建模和长期测量对比,认为适合近地面光学湍流估算。文献[9]对利用气象要素估算近地层湍流强度作了很多研究,文献[10]建立了海洋大气近地层光学湍流估算模型。本文通过对几种模型的数值计算和对比,给出了适合陆地的光学湍流估算模型,并能根据标准气象参数和地形地貌提供折射率结构常数 C_n^2 和内尺度 l_0 的预测值,为激光大气传输提供重要的参考信息。

1 折射率结构参量与温度结构参量

大气折射率起伏主要由温度起伏和湿度起伏影响,压强起伏的贡献可忽略:

收稿日期: 2007-07-02; 修回日期: 2008-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(10376007)

作者简介: 何武光(1976-),男,博士生,主要从事激光大气传输方面的研究。

$$\delta n = a_T(\lambda)\delta\theta + a_q(\lambda)\delta q \quad (1)$$

在可见光和红外窗口, 系数 a_T 为:

$$a_T = -77.6 \times 10^{-6} \left(1 + \frac{0.00753}{\lambda^2} \right) \frac{P}{T^2} \quad (2)$$

式中 P 为大气压强; q 为比湿; T 为空气温度; λ 为波长。对近地面而言, 湿度对大气折射率起伏的贡献比温度小一个数量级, 忽略湿度影响^[11], C_n^2 可由温度结构常数 C_T^2 测量得到, 其关系式为:

$$C_n^2 = a_T^2 C_T^2 \quad (3)$$

在可见光和近红外波段可近似表示为:

$$C_n^2 = \left(79 \times 10^{-6} \frac{P}{T^2} \right)^2 C_T^2 \quad (4)$$

2 Thiermann-Kohnle模型

2.1 折射率结构常数估算模型

在近地面, 温度起伏强度取决于地表植被类型、土壤湿度、环境温度、太阳辐射和风速。Thiermann-Kohnle模型结合这些环境特征信息, 根据Monin-Obkhov相似理论通过摩擦速度 u_* 、温度特征尺度 T_* 、Monin-Obkhov长度 L 估算出 C_T^2 , 与Wyngaard模型不同的是将Von Karman常数 k 加入 C_T^2 的定义中。在稳定条件 ($z/L > 0$) 下, 即当气温高于地面温度时:

$$C_T^2 = 4\beta_1 \frac{T_*^2}{(kz)^{2/3}} \left[1 + 7\frac{z}{L} + 20\left(\frac{z}{L}\right)^2 \right]^{1/3} \quad (5)$$

在不稳定条件 ($z/L < 0$) 下, 即气温低于于地面温度时:

$$C_T^2 = 4\beta_1 \frac{T_*^2}{(kz)^{2/3}} \left[1 - 7\frac{z}{L} + 75\left(\frac{z}{L}\right)^2 \right]^{1/3} \quad (6)$$

式中 β_1 是Obukhov-Corrsin常数, 其值为0.86; z 为离地面的高度。根据相似理论, 对应的特征尺度表示为:

$$u_* = uk \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi(L) \right]^{-1} \quad (7)$$

$$T_* = -\frac{Q_0}{u_*} \quad (8)$$

$$L = \frac{u_*^2 T}{kgT_*} \quad (9)$$

式中 u 为高度 z 处的水平风速; z_0 为地表面的粗糙度长度; Q_0 为垂直运动热通量; T 为气温, k 约为0.35~0.41; g 是重力加速度(9.8 m/s²)。

u_* 的计算取决于普适函数 $\psi(L)$, 采用Wyngaard

给出的一种普适函数形式:

$$\psi(L) = -4.7z/L \quad z/L > 0 \quad (10)$$

$$\psi(L) = 2\ln\left(\frac{1+y}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+y^2}{2}\right) - 2\arctan y + \frac{\pi}{2}$$

$$y = (1-15z/L)^{1/4} \quad z/L < 0 \quad (11)$$

对于白天和夜晚情形, Q_0 的表达式不同:

$$Q_0 = \frac{\eta}{c_p \rho} \left[\left(1 - \frac{\alpha}{1+\gamma/s} \right) (1-A)R - \beta \right] \quad (12)$$

$$Q_0 = \frac{cu^3}{1+(cc_p \rho / H_{\max})u^3} \quad (13)$$

式(12)、式(13)分别对应白天和夜晚模式, 其中:

$$c = -\frac{4}{27} \frac{k^2 T}{5gz [\ln(z/z_0)]^2} \quad (14)$$

式中 η 是经验常数取值为0.9; c_p 为空气比热, 可看作常量1 004.6 J·K/kg; ρ 为空气密度; α 为0~1间的表面湿度参数, 表征地面水汽蒸发量, 沙漠等干燥地区取值为0; γ/s 可用与气温有关的表达式给出; A 为地面反照率; R 为太阳辐照度; β 为经验常量, 可设为35 W/m²; 感热通量 H_{\max} 取决于当地植被、地面特征、大气湿度、云层覆盖等因素, 取值范围为-5~-100 W/m²。

根据地貌、天气等因素确定相关物理量, 采用叠代法计算出 u_* 、 L , 就可以估算出 C_n^2 。

2.2 湍流内尺度估算模型

文献[7]提出大气湍流内尺度 l_0 可由空气运动粘滞度 ν (标准温度标准大气压下为 1.46×10^{-5} m²/s) 及湍流动能耗散率 ϵ 表示:

$$l_0 = 7.4\nu^{3/4} \epsilon^{-1/4} \quad (15)$$

Thiermann-Kohnle模型给出了 ϵ 的表达式, 从而能够估算湍流内尺度 l_0 :

$$\epsilon = \frac{u_*^3}{kz} \left[1 + 4\frac{z}{L} + 16\left(\frac{z}{L}\right)^2 \right]^{1/2} \quad z/L > 0 \quad (16)$$

$$\epsilon = \frac{u_*^3}{kz} \left[\left(1 - 3\frac{z}{L} \right)^{-1} - \frac{z}{L} \right] \quad z/L < 0 \quad (17)$$

3 数值分析与对比

文献[9-10]分别介绍了一种基于相似理论的光学湍流估算模型(以下简称模型1和模型2), 两者的主要区别在于采用的普适函数不同。虽然前者主要针对海洋大气近地层光学湍流, 但忽略模型中有关比湿 q 的影响, 并针对陆地地形特征选取相应的参数, 修改后的模型2同样适合估算陆地近地面光学湍流。

3.1 波长对光学湍流的影响

对于近地面光学湍流估算, 忽略湿度对折射率起伏的影响, 取 $\lambda_1=0.6328\ \mu\text{m}$ 和 $\lambda_2=10.6\ \mu\text{m}$, 根据式(3)计算相同条件下对应的 C_n^2 比值为:

$$\frac{C_{n\lambda_1}^2}{C_{n\lambda_2}^2} = \frac{a_{T\lambda_1}^2}{a_{T\lambda_2}^2} = \frac{1+0.00753/\lambda_1^2}{1+0.00753/\lambda_2^2} \approx 1.04 \quad (18)$$

所以在估算和测量近地面光学湍流时, 可见光和近红外波长的折射率结构常数偏差在4%以内, 一般情况下可忽略波长影响。

3.2 风速、气温对光学湍流的影响

在近地面光学湍流中, 风的作用是导致空气混合并降低温度和湿度的不均匀性, 随着风速的增加, 地面热量耗散加剧, 温度梯度减小, C_n^2 也随之减小, 这一现象在实验中也得到了证实^[7]。

假设离地面 z_1 处温度为 $T_0=30^\circ\text{C}$ (z_1 的高度约等于地面粗糙度长度), 在离地面 $z_2=1\ \text{m}$ 高处测得的风速分别为2、4、6 m/s, 大气压强为1 013 hPa。利用修改后的模型2估算不同风速下 C_n^2 随气温 T_a 与 T_0 之差变化情况如图1所示。

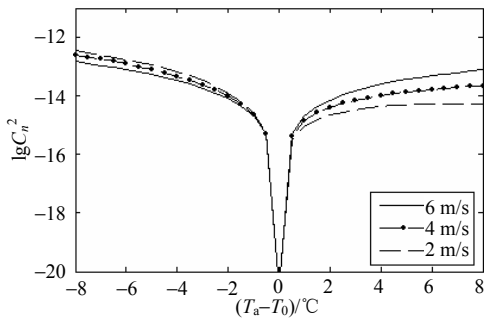


图1 风速对光学湍流估算的影响(修改后的模型2)

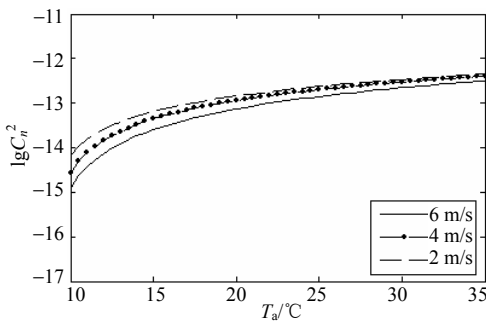


图2 风速对光学湍流估算的影响(Thiermann模型)

可见气温低于地面温度时, 即在不稳定状态下, 当风速较低时, 估算的 C_n^2 随风速增加而减小。图2为利用Thiermann-Kohnle模型估算的白天离地面1m高处不同风速下 C_n^2 随气温变化的情况, 风速对 C_n^2 影响趋势与修改后的模型2结果基本符合。

当气温低于地面温度时, 利用Thiermann-Kohnle模型夜晚模式估算的风速对 C_n^2 影响变化趋势与修改后的模型2结果相反, 即稳定状态下估算的 C_n^2 也随风速增加而减小。这种差异说明受相似理论限制, 光学湍流估算模型均有一定的应用范围。

3.3 光学湍流估算误差及预报

采用文献[7]实验所提供的测量数据: 1995年8月24日加拿大瓦卡蒂尔防御研究基地中午12点时太阳辐射 $920\ \text{W/m}^2$, 离地面3 m高处风速6 m/s, 气温 19.2°C , 相对湿度60%。根据地面特征粗糙度长度 z_0 设为0.02 m, 地面反照率 A 为0.2, 表面湿度参数 α 取为1。

根据这些参数, 分别采用模型1、修改后的模型2以及Thiermann-Kohnle模型估算 C_n^2 , 估算结果如表1所示。

表1 估算的 C_n^2 及实测值

模型1	修改后的模型2	Thiermann-Kohnle模型	实测值
/m ^{-2/3}	/m ^{-2/3}	/m ^{-2/3}	/m ^{-2/3}
3.3×10^{-12}	9.8×10^{-13}	7.9×10^{-13}	6.1×10^{-13}

由表1可以看出修改后的模型2以及Thiermann-Kohnle模型估算的 C_n^2 与实测值在同一个数量级, 而模型1估算值明显偏大, 主要是所采用的普适函数不够精确。同时粗糙度长度和一些经验参数的选取也会引起估算值误差。尽管如此, 后两种模型可以满足一般条件下光学湍流的估算和测量要求。特别是Thiermann-Kohnle模型, 只要输入基本的气象数据, 就可根据一些经验参数估算 C_n^2 和 l_0 ; 把太阳辐射能和地理信息及天文参数联系起来, 将太阳辐射规律加入该模型中, 就能预测某地某时段的光学湍流。图3是预测2008年10月1日成都地区(东经104°, 北纬23°)某平坦地形8时至18时的光学湍流, 假设天气晴朗, 并考虑风速和少量云层影响。

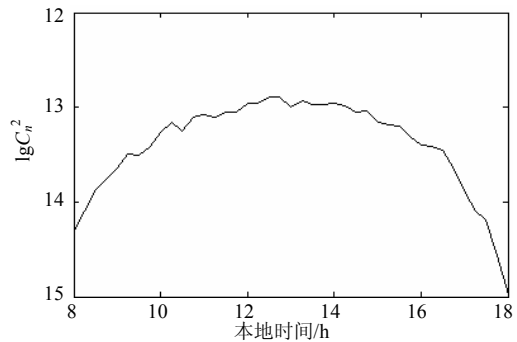


图3 预测成都某地的光学湍流

4 光学湍流测量

2007年8月13日下午13时至16时在某空旷路面上进行了光学湍流估算测量实验,气象要素测量仪器为空盒气压表、数字温度计(分辨率 0.1°C)、数字风速表(启动风速 0.4 m/s 、分辨率 0.1 m/s)。当时天气晴朗,在14时测得离地面 1 m 高处风速 1 m/s ,气温 33.2°C ,同时测得离地面 0.05 m 处气温为 38.1°C ,大气压强 990 hPa 。

根据相关参数利用Thiermann-Kohnle模型估算 C_n^2 为 $1.2\times 10^{-12}\text{ m}^{-2/3}$, l_0 为 4.4 mm ,与文献[1,7]相同条件下的测量结果吻合,估测值符合实际情况。

5 总 结

利用相似理论估算光学湍流的模型进行数值分析对比可知:对于干燥空气,在可见光和近红外波段大气折射率起伏只依赖于温度的起伏;在低风速时风速的增加会导致 C_n^2 减小;在不稳定条件下利用气象要素和一些经验参数估算近地面平坦地形光学湍流,理论估计和实验结果符合较好。特别是Thiermann-Kohnle模型,不仅能利用较少的气象数据估算白天和夜晚的 C_n^2 、 l_0 ,还可以根据地形地貌及地气之间的热量收支预测光学湍流状况。本文在该模型中结合根据地理位置、天文参数计算的太阳辐射规律,可以预测某地某时段的光学湍流,为大气激光工程提供重要信息。

参 考 文 献

- [1] 吴 健, 杨春平, 刘健斌. 大气中的光传输理论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005: 150-160.
WU Jian, YANG Chun-ping, LIU Jian-bin. Theory of light propagation in atmosphere[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 150-160.
- [2] 饶瑞中. 大气光传播研究中的湍流谱与间歇性[J]. 电子科技大学学报, 1999, 28(4): 437-442.

- RAO Rui-zhong. Light propagation in atmosphere: Turbulence spectrum and intermittency[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1999, 28(4): 437-442.
- [3] EATON F D. Recent developments of optical turbulence measurement techniques[C]//Atmospheric Propagation II. Bellingham: SPIE Press, 2005, 5793: 68-77.
- [4] TOFSTED D H, O'BRIEN S G. Modeling optical turbulence in the atmospheric boundary layer[C]//Targets and Backgrounds XII: Characterization and Representation. Bellingham: SPIE Press, 2006, 6239: 62390G1-10.
- [5] HOLTSLAG A A M, VAN ULDEN A P. A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data[J]. Journal of climate and applied meteorology, 1983, 22(4): 517-529.
- [6] THIERMANN V, KOHNLE A. A simple model for the structure constant of temperature fluctuations in the lower atmosphere[J]. Journal of Physics, 1988, 21(8): 37-40.
- [7] HUTT D L. Modeling and measurements of atmospheric optical turbulence over land[J]. Optical Engineering, 1999, 38(8): 1288-1295.
- [8] BENDERSKY S, KOPEIKA N S, BLAUNSTEIN N. Atmospheric optical turbulence over land in middle east coastal environments: prediction modeling and measurements[J]. Applied Optics, 2004, 43(20): 4070-4080.
- [9] 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.
YUAN Ren-min, ZENG Zong-yong, MA Cheng-sheng. Estimation optical turbulence by meteorology factors[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2001, 18(1): 87-91.
- [10] 戴福山, 李有宽. 利用气象要素估算海洋大气近地层光学湍流[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 191-196.
DAI Fu-shan, LI You-kuan. Estimation of the optical turbulence in the marine atmospheric surface layer based on meteorological data[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(2): 191-196.
- [11] PHILIP E C. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared[J]. Applied Optics, 1996, 35(9): 1566-1573.

编辑 漆 蓉