

文章编号: 0253-2239(2007)02-0191-6

# 利用气象要素估算海洋大气近地层光学湍流\*

戴福山<sup>1,2</sup> 李有宽<sup>1</sup>

(1 北京应用物理与计算数学研究所计算物理国家级重点实验室, 北京 100088)  
(2 北京应用气象研究所, 北京 100029)

**摘要:** 基于近地层相似理论以及极端层结下对该理论的修正,建立了海洋大气近地层光学湍流估算模型,并进行了数值分析。结果表明:当气温与海温相差较大时,温度起伏对光学湍流贡献最大;当气温与海温相差较小时,海面湿度越小,光学湍流越强;在较低湿度条件下,尤其在红外窗区,湿度扰动对光学湍流贡献起支配作用。当气温小于海温时,光学湍流先随海面风速增大而增强,后随风速增大而减弱;当气温大于海温时,光学湍流总体上是伴随海面风速增大而减弱。当气温小于海温或与海温接近时,与可见光和近红外波段相比,红外窗区光学湍流显著偏强;当气温远大于海温时,两波段光学湍流接近。在中性和近中性层结下,大气折射率结构参量  $C_n^2$  依赖于垂直高度的负幂指数接近  $-2/3$ ,伴随海面大气层结稳定度或不稳定度增强, $C_n^2$  依赖于垂直高度的负幂指数的绝对值分别逐渐减小或增大,并分别趋近于稳定极限下的 0 或不稳定极限下的  $-4/3$ 。

**关键词:** 大气光学; 光学湍流; 相似理论; 海洋大气近地层

中图分类号: TN201; P42 文献标识码: A

## Estimation of the Optical Turbulence in the Marine Atmospheric Surface Layer Based on Meteorological Data

Dai Fushan<sup>1,2</sup> Li Youkuan<sup>1</sup>

(1 *National Key Laboratory of Computational Physics, Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088*)  
(2 *Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029*)

**Abstract:** A model used to estimate the optical turbulence in the marine atmospheric surface layer is developed based on the similarity theory and some modifications of the theory under the extremely stable and unstable conditions, and some numerical analyses are done. It is found that the temperature fluctuation dominates the contributions to the optical turbulence when the temperature difference between the air and the sea surface is large. As the temperature difference becomes smaller, the moisture fluctuation contribution becomes dominative, especially in the infrared windows, with the lower air moisture, and the lower the air moisture, the stronger the optical turbulence. Accompanying the strengthening of the surface wind, the optical turbulence first becomes stronger with the weaker surface wind, then weaker with the stronger surface wind when the air is cooler than the sea surface, but generally becomes weaker with the air being warmer than the sea. The optical turbulence is stronger in the infrared window than that in the visible and near-infrared band when the air is cooler or slightly warmer than the sea, but they are comparable when the air is much warmer than the sea. Under the neutral and near-neutral conditions, the dependence of the vertical profile of the structure parameter of the air refractive index,  $C_n^2$ , on the vertical height obeys the  $-2/3$  power law. As the surface stability becomes more stable (unstable), the absolute value of the negative power of the profile becomes smaller (bigger), and approaches to 0 ( $-4/3$ ).

**Key words:** atmospheric optics; optical turbulence; similarity theory; marine atmospheric surface layer

\* 国家 863 计划(激光技术主题)资助课题。

作者简介: 戴福山(1967-),男,江苏睢宁人,高级工程师,博士,主要从事大气环境对光电传播影响的研究。

E-mail: dfs@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2006-01-10; 收到修改稿日期: 2006-06-15

## 1 引 言

受大气折射率随机起伏影响,在湍流大气中传播的光波,出现强度起伏、相位改变以及相干光谱移动。对于激光束,湍流扰动还可能导致波束漂移和扩展<sup>[1~4]</sup>。光波在湍流大气中的这些传播特性被称为光学湍流现象。光学湍流通常用大气折射率扰动来描述。对于可见光和近红外波段,温度扰动对大气折射率扰动影响尤其重要<sup>[5]</sup>。但在海洋大气近地层,Friehe 等<sup>[6]</sup>指出湿度扰动通过温度与湿度相关扰动对大气折射率扰动产生重要影响。虽然目前有多种手段直接测量大气折射率结构参量,但直接测量在时间与空间上都十分有限。根据近地层相似理论,利用日常气象水文观测,确定近地层大气折射率结构参量是定量评估光学湍流的重要手段。Wyngaard 等<sup>[7,8]</sup>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;Friehe<sup>[9]</sup>、Davidson 等<sup>[10]</sup>利用海上实测资料检验了该模型在海面的应用。Frederickson 等<sup>[11]</sup>比较了相似理论模型估算的大气折射率结构参量与海上同期闪烁观测导出的大气折射率结构参量,指出对大气折射率结构参量理论模拟的进一步改进,有待于对不同大气层结条件下近地层相似理论的进一步认识。袁仁民等<sup>[12]</sup>通过取风、热量和湿度交换系数为常数对利用气象要素估算近地面光学湍流作了研究。本文将通过对极端层结条件下近地层相似关系式进行修正,给出利用海面气象水文观测估算海面光学湍流的模型,并通过数值分析,研究气海温差、风速以及湿度对海面光学湍流的影响。

## 2 大气折射率及其结构参量

可见光与近红外波段(0.36~3 μm)大气折射率  $n_v$  由下式确定<sup>[13~15]</sup>:

$$10^6(n_v - 1) = m_1(\lambda) \frac{P}{T} + [m_2(\lambda) - m_1(\lambda)] \frac{qP}{T\epsilon r(q)}, \quad (1)$$

$$r(q) = 1 + \frac{1-\epsilon}{\epsilon} q, \quad \epsilon = 0.62197, \quad (2)$$

其中  $P$  为气压; $q$  为比湿; $T$  为绝对温度; $m_1(\lambda)$ 、 $m_2(\lambda)$  为波长  $\lambda$  的函数,分别由以下两式确定:

$$m_1(\lambda) = 23.7134 + \frac{6839.397}{130 - \lambda^{-2}} + \frac{45.473}{38.9 - \lambda^{-2}}, \quad (3)$$

$$m_2(\lambda) = 64.8731 + 0.58058\lambda^{-2} - 0.0071150\lambda^{-4} + 0.0008851\lambda^{-6}, \quad (4)$$

红外窗区(7.8~19 μm)大气折射率  $n_i$  为<sup>[14,16]</sup>:

$$10^6(n_i - 1) = m_1(\lambda) \frac{P}{T} - m_1(\lambda) \frac{qP}{T\epsilon r(q)} + \frac{qP}{R_d Tr(q)} \left[ \frac{Q(T, \lambda)}{H(T, \lambda)} + S(\lambda) \right], \quad (5)$$

$$Q(T, \lambda) = 957 - 928y^{0.4}(x - 1),$$

$$H(T, \lambda) = 1.03y^{0.17} - 19.8x^2 + 8.2x^4 - 1.7x^8,$$

$$S(\lambda) = \frac{3.747 \times 10^6}{12499 - x^2}, \quad x = \frac{10}{\lambda}, \quad y = \frac{T}{273.16},$$

$R_d$  为干空气理想气体常数。

大气折射率结构参量  $C_n^2$  用温度  $T$ 、比湿  $q$  的结构参量  $C_T^2$ 、 $C_q^2$ , 以及温度与比湿交叉结构参量  $C_{Tq}$  表示为

$$C_n^2 = A^2 C_T^2 + 2ABC_{Tq} + B^2 C_q^2, \quad (6)$$

对于可见光与近红外波段,

$$A = \frac{\partial n_v}{\partial T}, \quad B = \frac{\partial n_v}{\partial q}, \quad (7)$$

对于红外窗区,

$$A = \frac{\partial n_i}{\partial T}, \quad B = \frac{\partial n_i}{\partial q}. \quad (8)$$

## 3 结构参量与近地层特征尺度间的关系

温度和湿度结构参量  $C_T^2$ 、 $C_{Tq}$  和  $C_q^2$  可以用大气近地层温度特征尺度  $T_*$  和湿度特征尺度  $q_*$  表示<sup>[10,11]</sup>:

$$C_T^2(z) = z^{-2/3} T_*^2 f_T(z/L), \quad (9)$$

$$C_{Tq}(z) = z^{-2/3} r_{Tq} T_* q_* f_{Tq}(z/L), \quad (10)$$

$$C_q^2(z) = z^{-2/3} q_*^2 f_q(z/L), \quad (11)$$

其中  $f_T(z/L)$ 、 $f_{Tq}(z/L)$  和  $f_q(z/L)$  是无量纲函数,  $r_{Tq}$  是温度与湿度谱相关系数,  $L$  为莫宁-奥布霍夫(Monin-Obukhov, M-O) 长度,  $z$  为垂直高度。不稳定层结条件下,  $f_T(z/L)$ 、 $f_{Tq}(z/L)$  和  $f_q(z/L)$  用下式描述<sup>[11,14,17,18]</sup>:

$$f_{Tq}\left(\frac{z}{L}\right) = f_T\left(\frac{z}{L}\right) = f_q\left(\frac{z}{L}\right) = 5.9 \left(1 - 8 \frac{z}{L}\right)^{-2/3}, \quad z/L < 0 \quad (12)$$

稳定层结条件,  $f_T(z/L)$ 、 $f_{Tq}(z/L)$  和  $f_q(z/L)$  用下式描述<sup>[8,11,14,18]</sup>:

$$f_{Tq}\left(\frac{z}{L}\right) = f_T\left(\frac{z}{L}\right) = f_q\left(\frac{z}{L}\right) = 5.9 \left[1 + 2.4 \left(\frac{z}{L}\right)^{2/3}\right], \quad z/L \geq 0 \quad (13)$$

当  $\Delta T/\Delta q \geq 0$  时,取  $r_{Tq} \approx 0.8$ ; 当  $\Delta T/\Delta q < 0$  时,取  $r_{Tq} \approx 0.5$ <sup>[11]</sup>; 其中,  $\Delta T = T_a - T_s$ ,  $\Delta q = q_a - q_s$ ,

$T_a$ 、 $T_s$  分别是气温和海面温度； $q_a$ 、 $q_s$  分别是对应于温度  $T_a$  和  $T_s$  的比湿。

### 4 海洋大气近地层特征尺度的确定

根据莫宁-奥布霍夫相似理论(以下简称 M-O 相似理论),在海洋大气近地层内,速度特征尺度  $u_*$ 、温度特征尺度  $T_*$  和湿度特征尺度  $q_*$  可以用以下诸式描述:

$$u_* = \kappa u(z) \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_u\left(\frac{z}{L}\right) \right]^{-1}, \quad (14)$$

$$T_* = \kappa [T(z) - T_s] \left[ \ln\left(\frac{z}{z_{0t}}\right) - \psi_t\left(\frac{z}{L}\right) \right]^{-1}, \quad (15)$$

$$q_* = \kappa [q(z) - q_s] \left[ \ln\left(\frac{z}{z_{0q}}\right) - \psi_q\left(\frac{z}{L}\right) \right]^{-1}, \quad (16)$$

其中  $\kappa = 0.4$ ;  $z$  是垂直高度;  $u(z)$ 、 $T(z)$ 、 $q(z)$  分别是  $z$  高度处的水平风速、气温和比湿;  $z_0$ 、 $z_{0t}$ 、 $z_{0q}$  分别是风速、温度和比湿的粗糙度;  $T_s$  为海面温度,通过假设海面处于饱和状态确定  $q_s$ ;  $\psi_u$ 、 $\psi_t$  和  $\psi_q$  是稳定度参量  $z/L$  的函数,称为普适函数。 $L$ 、 $z_0$ 、 $z_{0t}$  和  $z_{0q}$  采用文献[19]方法确定。稳定层结条件下,普适函数  $\psi_u$ 、 $\psi_t$  和  $\psi_q$  取为

$$\psi_{uk}\left(\frac{z}{L}\right) = \psi_{tk}\left(\frac{z}{L}\right) = \psi_{qk}\left(\frac{z}{L}\right) = -4.7 \frac{z}{L}, \quad (17)$$

不稳定层结条件下,普适函数  $\psi_u$ 、 $\psi_t$  和  $\psi_q$  分别为:

$$\begin{aligned} \psi_{uk}\left(\frac{z}{L}\right) &= \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) + 2\ln\left(\frac{1+x}{2}\right) - \\ & 2\arctan x + \pi/2, \\ x &= \left(1 - 16 \frac{z}{L}\right)^{1/4}, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \psi_{tk}\left(\frac{z}{L}\right) &= \psi_{qk}\left(\frac{z}{L}\right) = 2\ln\left(\frac{1+y}{2}\right), \\ y &= \left(1 - 9 \frac{z}{L}\right)^{1/2}, \end{aligned} \quad (19)$$

在极端不稳定层结下,对普适函数  $\psi_u$ 、 $\psi_t$  和  $\psi_q$  分别

引入修正项  $\psi_{xc}$  :

$$\begin{aligned} \psi_{xc} &= 1.5 \ln\left(\frac{1+y+y^2}{3}\right) - \sqrt{3} \arctan\left(\frac{1+2y}{\sqrt{3}}\right) + \frac{\pi}{\sqrt{3}}, \\ y &= \left(1 - 12.87 \frac{z}{L}\right)^{1/3}. \end{aligned} \quad (20)$$

对于强稳定层结,采用胡隐樵和张强<sup>[20]</sup>给出的局地相似经验函数,对普适函数  $\psi_u$ 、 $\psi_t$  和  $\psi_q$  分别引入修正项  $\psi_{xc}$  :

$$\psi_{xc} = a(\ln z - \ln z_{0x}) - b \frac{z - z_{0x}}{L}, \quad (21)$$

对于  $\psi_{uc}$ 、 $\psi_{tc}$ ,  $a = -0.5$ ,  $b = 0.45$ ; 对于  $\psi_{qc}$ ,  $a = -0.75$ ,  $b = 0.175$ 。

最后,普适函数  $\psi_u$ 、 $\psi_t$  和  $\psi_q$  由下式确定:

$$\psi_x = \frac{1}{1+\xi^2} \psi_{xk} + \frac{\xi^2}{1+\xi^2} \psi_{xc}, \quad \xi = \frac{z}{L}. \quad (22)$$

## 5 数值分析

### 5.1 海面湿度对光学湍流估算的影响

假设海面温度  $T_s$  为 25 °C、海面 6 m 高度处气压  $P_a$  为 1013 hPa、风速  $U$  为 10 m/s,在不同相对湿度条件下,估算的 10 m 高度处波长分别为 1.315  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$  光波光学湍流  $C_n^2$  随气海温差的变化分别见图 1,  $(T_a - T_s)$  为气海温差。

由图 1 可见,10.6  $\mu\text{m}$  光波和 1.315  $\mu\text{m}$  光波光学湍流强度随相对湿度以及气海温差的变化规律相似。当气海温差小于零或为小的正值时,海面相对湿度越低,光学湍流越强。当气海温差较小时,湿度对光学湍流影响十分显著;海面相对湿度较低时,估算的光学湍流的最小值偏在气海温差为正值一侧;伴随海面相对湿度增大,与光学湍流最小值对应的气海温差代数值逐渐减小;当相对湿度达到 90% 时,与光学湍流最小值对应的气海温差为零。

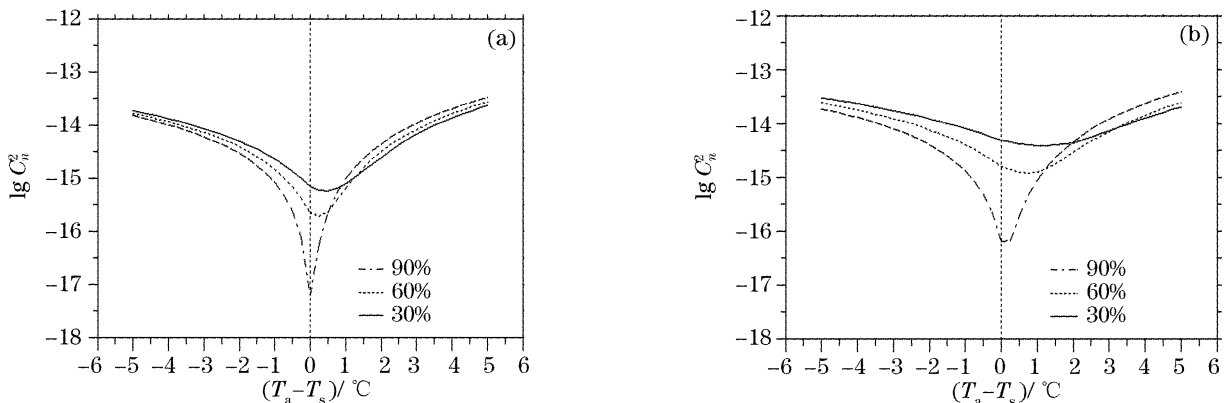


图 1 海面相对湿度对 1.315  $\mu\text{m}$  (a)和 10.6  $\mu\text{m}$  (b)光波光学湍流估算的影响

Fig. 1 Effects of the surface relative humidity on the estimating of optical turbulence for 1.315  $\mu\text{m}$  (a) and 10.6  $\mu\text{m}$  (b)

### 5.2 海面风速对光学湍流的影响

假设海面温度  $T_s$  为 25 °C、海面 6 m 高度处气压  $P_a$  为 1013 hPa、相对湿度为 90%，在不同风速下估算的 10 m 高度处 1.315  $\mu\text{m}$  光波光学湍流  $C_n^2$  随气海温差的变化见图 2。

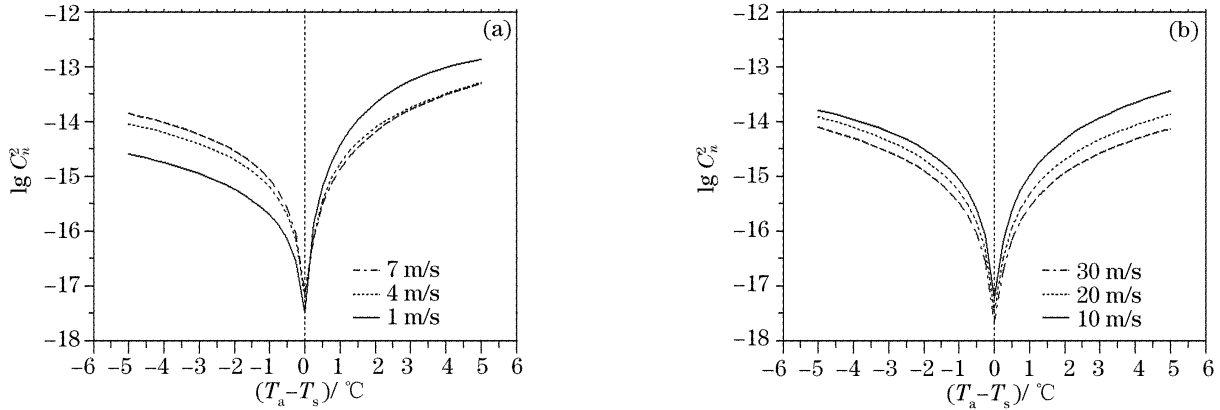


图 2 海面风速变化对 1.315  $\mu\text{m}$  光波光学湍流估算的影响

Fig. 2 Effects of the sea surface wind speed on the estimating of optical turbulence for 1.315  $\mu\text{m}$

### 5.3 $C_T^2$ 、 $C_q^2$ 和 $C_{Tq}$ 对 $C_n^2$ 的贡献

假设波长为 1.315  $\mu\text{m}$ 、海面温度  $T_s$  为 25 °C、海面 6 m 高度处气压  $P_a$  为 1013 hPa。取 6 m 高度处相对湿度为 90% 时，在不同风速条件下估算的 10 m 高度处  $C_T^2$ 、 $C_{Tq}$  和  $C_q^2$  对  $C_n^2$  的贡献 [(6) 式右侧三项] 随气海温差的变化见图 3(a)。在取 6 m 高度处风速  $U$  为 10 m/s，不同湿度条件下估算的 10 m 高度处  $C_T^2$ 、 $C_{Tq}$  和  $C_q^2$  对  $C_n^2$  的贡献随气海温差的变化见图 3(b)。图 3 中  $T$ 、 $Tq$  和  $q$  分别代表 (6) 式右侧三项绝对值的对数，对应纵坐标。

气海温差绝对值较大时， $C_T^2$  对  $C_n^2$  的贡献最大，

当气温小于海温时，在海面风速较低条件下，估算的光学湍流随风速增大而增强；但当海面风速较大时，估算的光学湍流随风速增大而减弱。当气温大于海温时，估算的光学湍流总体上随风速增大而减弱。该结论对 10.6  $\mu\text{m}$  光波同样成立。

其次是  $C_{Tq}$  对  $C_n^2$  的贡献。 $C_T^2$ 、 $C_q^2$  和  $C_{Tq}$  对  $C_n^2$  的贡献随海面风速变化较小；当气温大于海温时，随海面风速增大，各贡献项略有减小。 $C_T^2$ 、 $C_q^2$  和  $C_{Tq}$  对  $C_n^2$  的贡献受海面湿度变化影响较大，海面湿度越大，湿度扰动和温度-湿度交叉相关项对  $C_n^2$  的贡献越小；反之，则越大；尤其当气温与海温接近时，在较低湿度条件下，湿度扰动和温度-湿度交叉相关项对  $C_n^2$  的贡献远大于温度起伏的贡献。尤其在红外窗区，湿度起伏对光学湍流的贡献更显重要。在红外窗区，当海面湿度较低时，在相对更宽泛的气海温差范围内，湿度扰动对光学湍流的贡献起决定性作用。

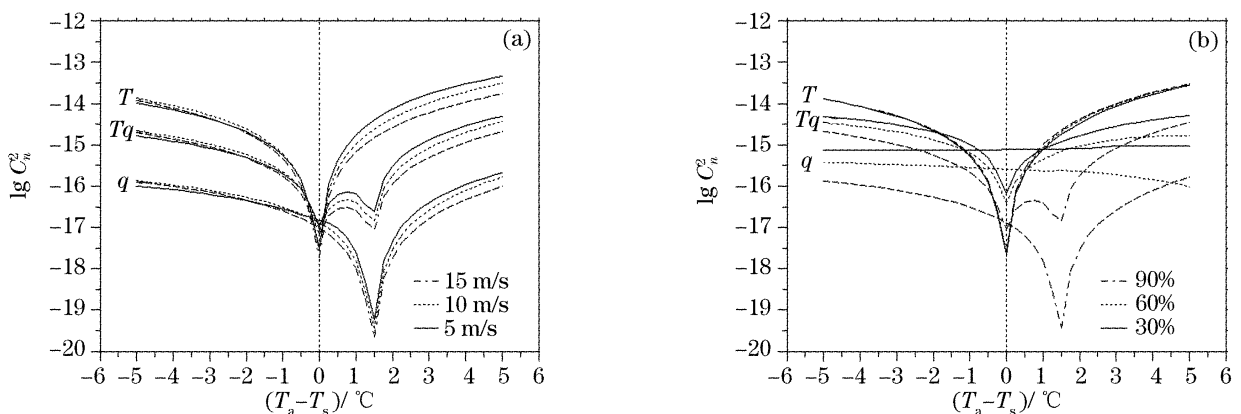


图 3 其他条件相同只是海面风速不同(a)和其他条件相同只是湿度不同(b)条件下估算的  $C_T^2$ 、 $C_q^2$  和  $C_{Tq}$  对  $C_n^2$  的贡献

Fig. 3 Respective contributions of  $C_T^2$ ,  $C_q^2$  and  $C_{Tq}$  to  $C_n^2$  with the other parameters unchanged but the sea surface wind speed in (a) and the sea surface relative humidity in (b)

### 5.4 不同波长对应的光学湍流

假设海面温度  $T_s$  为 25 °C、海面 6 m 高度处气压  $P_a$  为 1013 hPa、风速  $U$  为 10 m/s。在取 6 m 高

度处相对湿度分别为 50% 和 90% 时，估算的 10 m 高度处波长分别为 0.55  $\mu\text{m}$ 、1.315  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$  的光波对应的光学湍流分别见图 4。

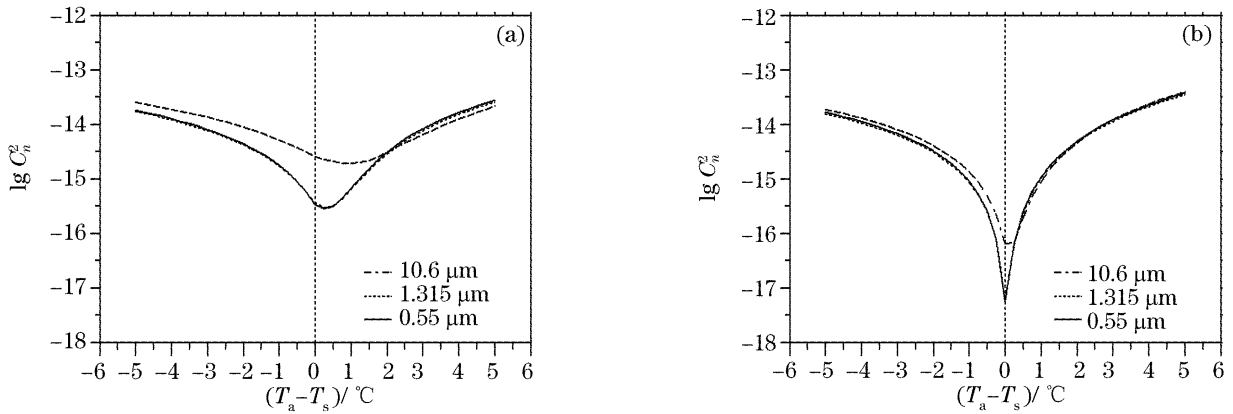


图 4 取海面相对湿度为 50%(a)和 90%(b)时估算的三个不同波长(0.55  $\mu\text{m}$ , 1.315  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$ )光波在 10 m 高度处光学湍流

Fig. 4 Estimated optical turbulence at the three different wavelengths (0.55  $\mu\text{m}$ , 1.315  $\mu\text{m}$ , and 10.6  $\mu\text{m}$ ) at 10 m over the sea with the surface relative humidity taken as 50% in (a) and 90% in (b)

在不同条件下估算的 0.55  $\mu\text{m}$  和 1.315  $\mu\text{m}$  光波的光学湍流几乎相同。当气温远大于海温时,位于红外窗区的 10.6  $\mu\text{m}$  光波的光学湍流与可见光和近红外波段的光学湍流十分接近;但当气温小于海温或与海温较接近时,红外窗区的光学湍流偏强;尤其当海面相对湿度较低时,红外窗区光学湍流远大于可见光和近红外波段光学湍流。

5.5 海洋大气近地层  $C_n^2$  的垂直廓线

假设海面温度  $T_s$  为 25  $^\circ\text{C}$ 、海面 6 m 高度处气压  $P_a$  为 1013 hPa。风速  $U$  分别为 10 m/s 和 1 m/s,相对湿度分别为 90%和 30%。气海温差  $T_a - T_s$  分别为 -2  $^\circ\text{C}$ 、0  $^\circ\text{C}$ 、2  $^\circ\text{C}$  和 -4  $^\circ\text{C}$ 、0  $^\circ\text{C}$ 、4  $^\circ\text{C}$  时,估算的 1.315  $\mu\text{m}$  光波大气折射率结构参量  $C_n^2$  的垂直廓线,分别见图 5(a)和图 5(b)中实线、点线和断线。

图中同时给出了用不连续的实心小方块表示的对这些廓线的拟合。图 5(a)中,实线上不连续的实心小方块描述的  $C_n^2$  廓线在 15 m 高度以下随垂直高度  $z$  按  $z^{-0.73}$  幂率变化,15 m 高度以上按  $z^{-0.81}$  幂率变化;点线上不连续的实心小方块描述的  $C_n^2$  廓线随垂直高度  $z$  按  $z^{-2/3}$  幂率变化;断线上不连续的实心小方块描述的  $C_n^2$  廓线随垂直高度  $z$  按  $z^{-0.59}$  幂率变化。图 5(b)中,实线上不连续的实心小方块描述  $C_n^2$  的廓线随垂直高度  $z$  按  $z^{-1.3}$  幂率变化;点线上不连续的实心小方块描述的  $C_n^2$  廓线随垂直高度  $z$  按  $z^{-1.27}$  幂率变化;断线上不连续的实心小方块描述的  $C_n^2$  廓线随垂直高度  $z$  按  $z^{-0.2}$  幂率变化。

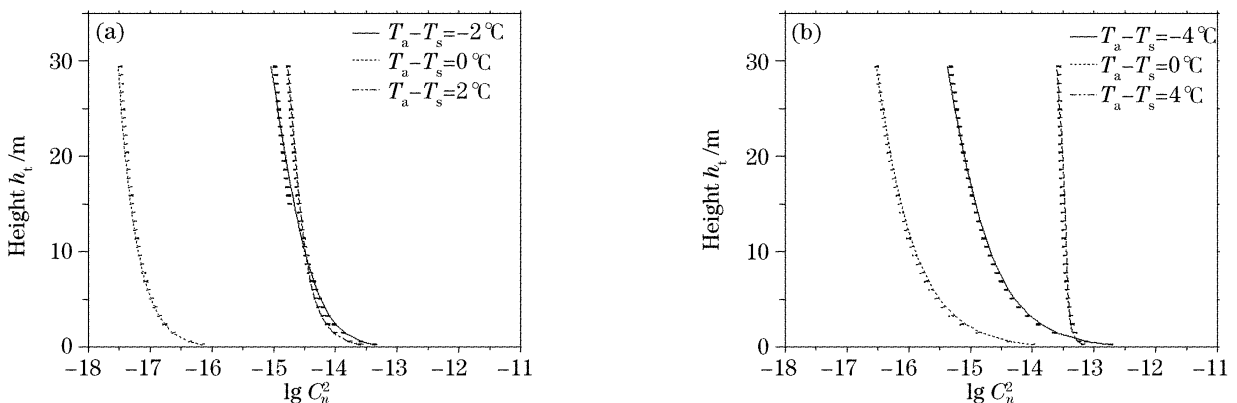


图 5 气海温差分别取 -2  $^\circ\text{C}$ 、0  $^\circ\text{C}$  和 2  $^\circ\text{C}$  时(a)和分别取 -4  $^\circ\text{C}$ 、0  $^\circ\text{C}$  和 4  $^\circ\text{C}$  时(b)估算的 1.315  $\mu\text{m}$  光波大气折射率结构参量  $C_n^2$  的垂直廓线(图中实线、点线和断线)。图中实心小方块表示对这些廓线的拟合

Fig. 5 Vertical profiles of the estimated  $C_n^2$  with temperature difference between the air and the sea surface,  $T_a - T_s$ , taken as -2  $^\circ\text{C}$ , 0  $^\circ\text{C}$ , 2  $^\circ\text{C}$  in (a), and taken as -4  $^\circ\text{C}$ , 0  $^\circ\text{C}$ , 4  $^\circ\text{C}$  in (b) for 1.315  $\mu\text{m}$ . The small solid squares represent the fitted profiles to the estimated profiles

可见,在中性或近中性层结条件下,大气折射率结构参量  $C_n^2$  接近于随垂直高度  $z$  按  $z^{-2/3}$  幂率变

化。伴随海面大气层结稳定度增强,大气折射率结构参量  $C_n^2$  的垂直廓线依赖于高度  $z$  的负幂指数的

绝对值逐渐减小;伴随海面大气层结不稳定性增强,大气折射率结构参量  $C_n^2$  依赖于高度  $z$  的负幂指数的绝对值不断增大。由(9)式~(11)式可知,在强稳定极限情况下,大气折射率结构参量  $C_n^2$  趋于与高度  $z$  无关;在强不稳定层结极限条件下,大气折射率结构参量  $C_n^2$  随高度  $z$  的变化趋于  $z^{-4/3}$  幂率变化。该结论对 10.6  $\mu\text{m}$  光波同样成立。

## 6 结 论

根据近地层相似理论,以及极端层结条件下对该理论的修正,给出了海洋大气近地层光学湍流估算模型,并通过数值分析,得出以下主要结论:当气温与海温相差较大时,温度起伏对光学湍流贡献最大;当气温与海温相差较小时,海面湿度越小,光学湍流越强;在较低湿度条件下,尤其在红外窗区,湿度扰动对光学湍流贡献起支配作用。当气温小于海温时,光学湍流先随海面风速增大而增强,后随风速增大而减弱;当气温大于海温时,光学湍流总体上是伴随海面风速增大而减弱。当气温小于海温或与海温接近时,与可见光和近红外波段相比,红外窗区光学湍流显著偏强;当气温远大于海温时,两波段光学湍流接近。在中性和近中性层结下,大气折射率结构参量  $C_n^2$  依赖于垂直高度的负幂指数接近  $-2/3$ , 伴随海面大气层结稳定度或不稳定性增强,  $C_n^2$  依赖于垂直高度的负幂指数的绝对值分别逐渐减小或增大,并分别趋近于稳定极限下的 0 或不稳定极限下的  $-4/3$ 。

本文仅利用给出的光学湍流估算模型对不同条件下海洋大气近地层光学湍流进行数值分析,缺乏实际海上光学湍流观测试验的检验,该模型的估算能力有待海上光学湍流观测试验的检验。

**致谢** 感谢北京应用物理与计算数学研究所杜祥琬院士对本工作的指导和帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Shipeng, Rao Ruizhong, Liu Xiaochun. Statistical properties of laser irradiance scintillation in a real turbulent atmosphere throughout a year[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(3): 390~397 (in Chinese)  
王世鹏,饶瑞中,刘晓春. 实际大气中激光强度起伏的全年统计特征[J]. 光学学报, 1999, **19**(3): 390~397
- 2 Rao Ruizhong, Wang Shipeng, Liu Xiaochun *et al.*. Experimental study of spot dancing of laser beam in a turbulent atmosphere[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **A27**(11): 1011~1015 (in Chinese)  
饶瑞中,王世鹏,刘晓春等. 湍流大气中激光束漂移的实验研究[J]. 中国激光, 2000, **A27**(11): 1011~1015

- 3 Liu Jianguo, Huang Yinbo, Wang Yingjian. Numerical analysis of intensive fluctuating scale characteristics in space laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1009~1012 (in Chinese)  
刘建国,黄印博,王英俭. 空间激光通信中光强起伏尺度特征的数值分析[J]. 光学学报, 2005, **25**(8): 1009~1012
- 4 Ji Xiaoling, Lü Baida. Effect of turbulence on the spectral shift of partially coherent light[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(4): 506~510 (in Chinese)  
季小玲,吕百达. 湍流对部分相干光光谱移动的影响[J]. 中国激光, 2005, **32**(4): 506~510
- 5 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)  
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
- 6 Friehe Carl A., J. C. La Rue, F. H. Champagne *et al.*. Effects of temperature and humidity fluctuations on the optical refractive index in the marine boundary layer[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1975, **65**(12): 1502~1511
- 7 Wyngaard J. C., Y. Izumi, S. A. Collins, Jr.. Behavior of the refractive-index-structure parameter near the ground[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**(12): 1646~1650
- 8 Wyngaard J. C.. *On Surface Layer Turbulence, in Workshop On Micrometeorology* [M]. D. Haugen, Editor. American Meteorological Society, Boston, 1973. 101~149
- 9 Friehe Carl A.. Estimation of the refractive-index temperature structure parameter over the ocean[J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(2): 334~340
- 10 Davidson K. L., G. E. Schacher, C. W. Fairall *et al.*. Verification of the bulk method for calculating overwater optical turbulence[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(17): 2919~2924
- 11 Frederickson Paul A., K. L. Davidson, C. R. Zeisse *et al.*. Estimating the refractive index structure parameter ( $C_n^2$ ) over the ocean using bulk methods[J]. *J. Appl. Meteor.*, 2000, **39**(10): 1770~1783
- 12 Yuan Renmin, Zeng Zongyong, Ma Chengsheng. Estimation optical turbulence by meteorology factors[J]. *Chin. J. Quantum Electron.*, 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
- 13 Owens J. C.. Optical refractive index of air: dependence on pressure, temperature and composition[J]. *Appl. Opt.*, 1967, **6**(1): 51~59
- 14 Andreas E. L.. Estimating  $C_n^2$  over snow and sea ice from meteorological data[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, **5**(4): 481~495
- 15 Joseph S. Accetta, Dovid L. Shumaker. *The Infrared Electro-optical Systems Handbook* [M]. Bellingham: International Society for Optical Engineering, 1993, Volume 2, Chapter 2: 157~232
- 16 Hill R. J., R. S. Lawrence. Refractive index of water vapor in infrared windows[J]. *Infrared Phys.*, 1986, **26**(6): 371~376
- 17 Edson J. B., C. W. Fairall. Similarity relationships in the marine atmospheric surface layer for terms in the TKE and scalar variance budgets[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**(13): 2311~2328
- 18 Hill R. J.. Implications of Monin-Obukhov similarity theory for scalar quantities[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1989, **46**(14): 2236~2244
- 19 Fairall C. W., E. F. Bradley, D. P. Rogers *et al.*. Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean-global atmosphere coupled-ocean atmosphere response experiment[J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(C2): 3747~3764
- 20 Hu Yingqiao, Zhang Qiang. On local similarity of the atmospheric boundary layer[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1993, **17**(1): 10~20 (in Chinese)  
胡隐樵,张强. 论大气边界层的局地相似性[J]. 大气科学, 1993, **17**(1): 10~20