

# 近海面大气光学湍流计算模型的比较与改进

李云波<sup>1</sup> 黄小毛<sup>2</sup> 余军浩<sup>3</sup> 赵亚明<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 海军海洋水文气象中心, 北京 100161; <sup>2</sup> 海军航行保证部, 天津 300042)  
<sup>3</sup> 61741 部队, 北京 100081)

**摘要** 通过在黄海北部某海域进行的海上大气光学湍流观测实验, 对比分析了不同大气稳定度环境下四种大气光学湍流  $C_n^2$  计算模型的性能。针对中性和近中性环境下模型误差大的问题, 基于温度折射率结构参数  $f_T$  与稳定度的对应关系, 利用实测数据和函数拟合, 提出了一个新的  $f_T$  函数形式。误差分析表明采用新的  $f_T$  参数方案明显提高了  $C_n^2$  模型的计算精度, 其性能大大高于其他几种计算模型。

**关键词** 大气光学; 近海面; 大气湍流; 大气折射率结构常数; 温度折射率结构参数

**中图分类号** P427.1; TN201 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1101004

## Comparison and Improvement of the Atmospheric Optical Turbulence Model in Near Sea Surface

Li Yunbo<sup>1</sup> Huang Xiaomao<sup>2</sup> Yu Junhao<sup>3</sup> Zhao Yaming<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> Navy Marine Hydro-Meteorological Center, Beijing 100161, China)  
<sup>2</sup> Navy Navigation Safeguard Department, Tianjin 300042, China  
<sup>3</sup> No 61741 Army, Beijing 100081, China)

**Abstract** Four atmospheric optical turbulence models are analysed in different stability conditions through atmospheric optical turbulence trial in the Northern Yellow Sea. Focusing on the low precision of model in neutral and near neutral condition, a new form for temperature structure is developed based on the relation between  $f_T$  and stability; using trial data and data fitting, the new  $f_T$  function is proposed. The result of error analysis shows that the  $C_n^2$  model considerably improves the precision using the new  $f_T$  function.

**Key words** atmospheric optics; near sea surface; atmospheric turbulence; atmospheric refractive-index structural constant; temperature refractive-index structural parameter

**OCIS codes** 010.1290; 010.1330; 010.7060

## 1 引 言

光波在近海面低空传播时, 由于受到大气湍流的影响, 导致出现光强闪烁、像点抖动和成像模糊等现象, 直接影响海上光电设备的性能, 特别是用以侦察和探测掠海低空目标的军用光电跟踪仪和目标指示装备。目前, 一般使用大气折射率结构常数  $C_n^2$  描述大气光学湍流强度, 但海上直接测量  $C_n^2$  对监测平台的要求较高, 移动平台大范围实时测量并不现实。因此, 国内外基于近地层相似理论<sup>[1]</sup> 建立了众多数值计算模型, 这样只需常规的气象要素信息就可以估算出  $C_n^2$  的值。

例如, Wyngaard 等<sup>[2,3]</sup> 提出的基于 Bulk 方法的  $C_n^2$  计算模型以及加拿大海军的 LWKD 模型<sup>[4]</sup>, 近年来国内的研究人员袁仁民等<sup>[5~7]</sup> 也进行了不同下垫面环境下  $C_n^2$  模型的相关研究。然而, 在实际应用中, 以上诸多模型因其建立的近地层理论和经验关系适用范围的局限性, 计算准确度各有不同, 特别是在中性以及稳定大气条件下模型的误差较大。为了解决这一问题, Frederickson 等<sup>[8]</sup> 曾尝试通过修改温度折射率结构参数  $f_T$  的函数形式, 提高  $C_n^2$  计算的准确度, 取得了初步的进展。本文利用海上实验数据对比分析了几种  $C_n^2$

收稿日期: 2012-03-30; 收到修改稿日期: 2012-06-13

作者简介: 李云波(1981—), 男, 博士, 工程师, 主要从事军事海洋及其对武器装备的影响方面的研究。

E-mail: plalyb@sohu.com

模型的优劣,并通过数据拟合提出一个新的  $f_T$  函数形式,进而提高了  $C_n^2$  计算模型的精度。

## 2 估算 $C_n^2$ 的理论方法

在大气光学湍流研究中,一般使用折射率结构函数  $C_n^2$  这一概念来表征湍流的强度,根据各向同性湍流理论,  $C_n^2$  可以表示为<sup>[9]</sup>

$$C_n^2 = \langle (n_{R_2} - n_{R_1})^2 \rangle / R^{2/3}, \quad (1)$$

式中  $n_{R_1}, n_{R_2}$  分别为  $R_1, R_2$  处的大气折射率,  $\langle \rangle$  为系综平均,  $R$  为两测量点间的距离,即  $R = R_2 - R_1$ 。

为了找到环境要素与光学湍流之间的关系,一般通过折射指数  $n$  的全微分建立两者之间的联系<sup>[10]</sup>:

$$dn = \frac{\partial n}{\partial T} dT + \frac{\partial n}{\partial Q} dQ + \frac{\partial n}{\partial P} dP. \quad (2)$$

考虑到气压的变化很小,因此只考虑温度和湿度的变化,于是  $C_n^2$  可以由温度、湿度的结构常数  $C_T^2, C_Q^2$  以及温湿的相关结构常数  $C_{TQ}$  表示:

$$C_n^2 = \left( \frac{\partial n}{\partial T} \right)^2 C_T^2 + \left( \frac{\partial n}{\partial Q} \right)^2 C_Q^2 + 2 \frac{\partial n}{\partial T} \frac{\partial n}{\partial Q} C_{TQ}. \quad (3)$$

根据近地层相似理论<sup>[1]</sup>,  $C_T^2, C_Q^2$  以及  $C_{TQ}$  与温度、湿度的特征尺度  $t_*, q_*$  具有以下关系:

$$\begin{cases} C_T^2 = z^{2/3} t_*^2 f_T(z/L) \\ C_Q^2 = z^{2/3} q_*^2 f_Q(z/L) \\ C_{TQ} = z^{2/3} \gamma_{TQ} t_* q_* f_{TQ}(z/L) \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $z$  为观测高度,  $\gamma_{TQ}$  为温度与湿度谱的相关系数,它的取值范围在  $\pm 1$  之间。 $z/L$  为稳定度参数,可写为

$$z/L = zkg[t_*(1 + 0.6078Q) + 0.6078q_*] / (Tu_*^2), \quad (5)$$

式中  $k = 0.4, g = 0.98$ 。 $f_T, f_{TQ}, f_Q$  为无量纲的经验参数,它与稳定度  $z/L$  直接相关,一般取  $f_T = f_Q = f_{TQ}$ 。

根据(2)~(4)式,基于海气通量 Bluk 算法<sup>[11]</sup>,利用常规气象要素及其特征尺度,各结构常数以及经验参数  $f_T$  可以确定  $C_n^2$ 。

$$C_n^2 = \frac{f(z/L)k^2(A^2 dT^2 + 2AB\gamma_{TQ} dT dQ + B^2 dQ^2)}{z^{2/3} [\ln(z/z_\alpha) - \psi(z/L)]^2}, \quad (6)$$

$$A = \frac{\partial n}{\partial T}, \quad B = \frac{\partial n}{\partial Q},$$

式中  $z_\alpha$  为温度粗糙度长度,  $\psi$  为普适函数,其具体形式可见文献<sup>[11]</sup>。

目前国外应用较多的  $C_n^2$  模型主要有 Wyngaard (1973)<sup>[2]</sup>、Edson (1991)<sup>[3]</sup>、LWKD

8.01<sup>[4]</sup>、Frederickson(2005)<sup>[8]</sup>等4种,其理论基础和形式类似,但是由于各个模型实验环境存在差异,因此得到的经验参数形式亦有不同,主要的区别在于  $f_T$  参数方案不同。为便于统一表达,本文给出了如下通用形式:

$$f_T = \begin{cases} E_0[1 + E_1(z/L) + E_2(z/L)^2]^{E_3/3}, & z/L \leq 0 \\ F_0[1 + F_1(z/L) + F_2(z/L)^2]^{F_3/3}, & z/L \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

通过对  $E, F$  的不同赋值,可以表达以上4种模型中的不同  $f_T$  参数形式,便于模型间的分析比较。

## 3 $C_n^2$ 的观测实验

### 3.1 $C_n^2$ 的测量

由  $D_T(r) = \langle [T(r, t) - T(0, t)]^2 \rangle = C_T^2 r^{2/3}$  可知,温度结构常数  $C_T^2$  只与两点间的距离有关,而与两点的位置和连线方向无关。同时根据 Taylor 湍流冻结假定<sup>[12]</sup>,湍流的空间结构可以用湍流的时间序列来分析,即  $r = U\Delta t, U$  为平均风速,  $\Delta t$  为测量气象参数瞬时值之间的时间间隔,则  $C_T^2$  可以写为

$$C_T^2 = \frac{\langle [T(t + \Delta t) - T(t)]^2 \rangle}{(U\Delta t)^{2/3}}, \quad (8)$$

式中  $T$  为高频采集的气温值,  $\langle \rangle$  表示统计平均。则折射率结构常数  $C_n^2$  可以写成<sup>[13]</sup>

$$C_n^2 = \left( 79 \times 10^{-6} \frac{P}{T_a} \right)^2 C_T^2, \quad (9)$$

式中  $T_a$  为平均气温,  $P$  为气压值,单位 hPa。根据(8)、(9)式,利用超声风速仪测量的风速时间序列以及温度和气压平均值,即可得出折射率结构常数  $C_n^2$ 。

### 3.2 观测实验概况

2009年10~12月在黄海北部某海域进行了观测实验。实验码头伸出海岸90m,东南至西南方向( $106^\circ \sim 243^\circ$ )为开阔海面,为避免海浪的影响,自动观测站布设距海面9~10m,水平距海岸6.8m。

自动观测站使用了 Young 81000 三维超声风速仪、Young 41372 温湿传感器, Everest 红外水温传感器(4000.3ZL)、气压传感器(Young 61202)以及 GPS。所有传感器分两层安装在支架顶部,红外海表水温传感器探头下倾  $50^\circ$  对准海面。超声风速仪主要记录三维风速、风向、仰角、声速和超声温度,采样率为 32 Hz;气压传感器、温湿传感器记录大气温度、湿度信息,采样率为 1 Hz;红外水温传感器记录海表水温数据,采样率为 1 Hz。自动观测站全天 24 h 连续监测,所有数据通过 Young 26700 采集器进行实时采集,每分钟存储一次。

## 4 测量结果与讨论

### 4.1 模型结果的对比分析

为了减小海岸地形对湍流场的影响, 尽量选取吹海风的天气, 本文选用11月3日~4日的数据进行分析。期间风向稳定, 平均风速5.4 m/s, 气温呈回升趋势, 海水温度变化较小, 均值在10.8 °C。图1为各气象要素10 min平均数据的时间序列。从海气温差

(ASTD)的时间序列可以看到, 3日14:00之前, 其值 $T_{ASTD} < 0$  °C, 凌晨时接近-4 °C; 3日14:00~4日14:00, 气温和海表水温相差不大, ASTD接近于0 °C; 4日14:00之后, 海气温差增大达到2 °C。

图2显示了 $C_n^2$ 实际测量值与Wyngaard (1973)、Edson (1991)、LWKD 8.01、Frederickson (2005)的模型计算结果。

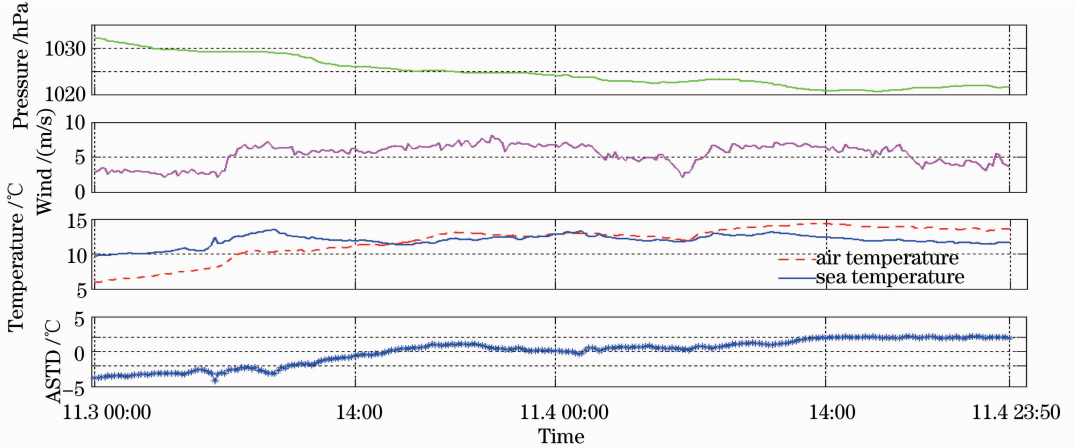


图1 试验期间的水文气象要素时间序列

Fig. 1 Time series of hydrological and meteorological elements during the experiment

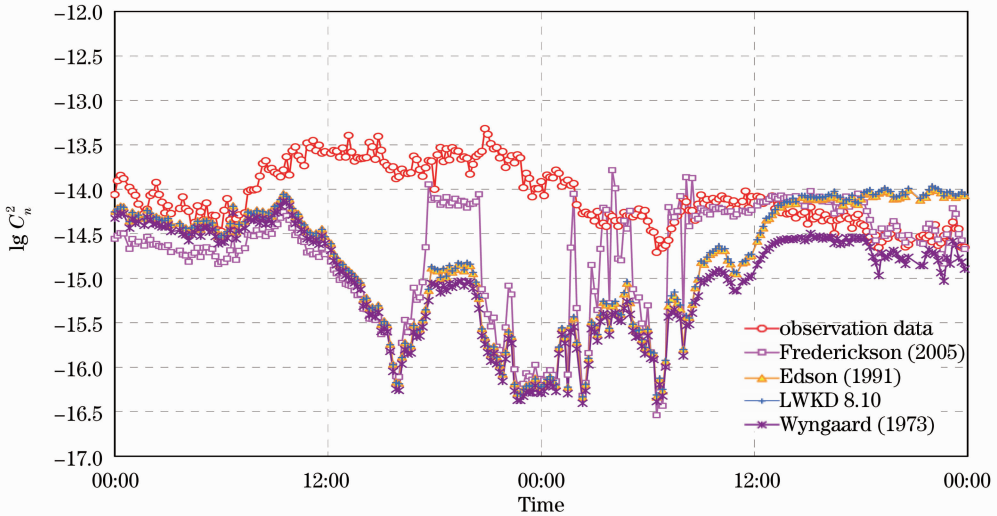


图2 四种 $C_n^2$ 模型的计算结果

Fig. 2 Results calculated by four different models of  $C_n^2$

由图2中可知, 四种模型计算结果在时间序列的两端吻合较好, 而中部偏差较大。除了在11月4日12:00之后, Edson(1991)、LWKD 8.01的计算值高于实测值以外, 其他时间总体上低于实测值。与图1中ASTD时间变化序列对比可见, 11月3日12:00之后, ASTD接近0 °C, 所有模型的计算值出现下降趋势, 期间略有震荡, 明显偏离实测值。仅在11月3日12:00之前和4日12:00之后,  $|T_{ASTD}|$ 出

现较大值, 模型计算结果与实测值趋势吻合。分析可见,  $C_n^2$ 受海气温差的影响显著, 两者存在较强的相关性。

图3展示了模型计算值与实测值的差值随ASTD的散点图。图3中可见, 所有模型的计算偏差受海气温差影响明显, 且均呈“V”形分布。在近中性层结下( $T_{ASTD} = 0$  °C)偏差最大, 随着 $|T_{ASTD}|$ 的增大偏差逐渐减小。相比较而言, Wyngaard(1973)、Edson

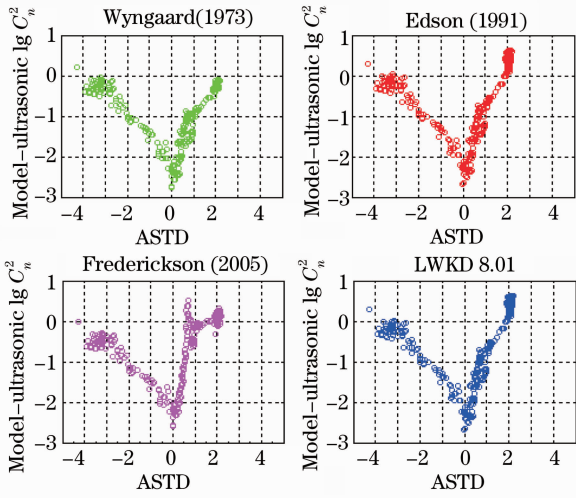


图 3 模型计算值与实测值的差值随海气温差的变化

Fig. 3 Difference between the model calculated and measured values versus ASTD

(1991)、LWKD 8.01 在  $T_{ASTD} = -3\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -4\text{ }^{\circ}\text{C}$  附近偏差值接近零,而 Frederickson(2005)略低于测量值。当 ASTD 接近  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,所有模型计算值达到最小,大大低估了实际的湍流强度,其中 Wyngaard(1973)的计算值最小,与实测值相差接近3个数量

级,Edson(1991)与 LWKD 8.01 接近,Frederickson(2005)偏差最小。当  $T_{ASTD} > 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,Frederickson(2005)的结果最好,而 Wyngaard(1973)低估了  $C_n^2$ 。此外,Edson(1991)与 LWKD 8.01 在  $T_{ASTD} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  附近明显高估了  $C_n^2$ 。

为了更加量化各参数方案的优劣,按照不同海气层结稳定度状态,分别计算模型的相对偏差(Error)<sup>[14]</sup>和归一化标准差(NSEE)<sup>[15]</sup>。

如表 1 所示,当大气层结相对稳定时( $T_{ASTD} \geq 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),Frederickson(2005)明显优于其他方案,偏差最小,LWKD 8.01 的偏差较大,四种模型都略高估了  $C_n^2$ ;不稳定层结下,模型计算结果均小于测量值,其中 Frederickson(2005)的偏差较大,LWKD 8.01 偏差最小;在中性和近中性环境下,各模型的偏差明显大于其他层结状态。其中 Wyngaard(1973)偏差达  $-0.1073$ ,Edson(1991)、LWKD 8.01 次之,而 Frederickson(2005)最小;从总体上看,所有模型均为过低估计,相比较而言,Frederickson(2005)偏差较小,LWKD 8.01、Edson(1991)与 Wyngaard(1973)次之。

表 1 模型计算值  $\lg C_n^2$  的相对偏差(Error)与归一化标准差(NSEE)

Table 1 Relative deviations (Error) of the model calculated values  $\lg C_n^2$  and normalized standard deviation (NSEE)

Error (NSEE)		Wyngaard(1973)	Edson(1991)	Frederickson(2005)	LWKD 8.01
Stable conditions (66 groups)	$T_{ASTD} \geq 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.0158 (0.0216)	0.0213 (0.0258)	0.0071 (0.0113)	0.0227 (0.0270)
	Unstable conditions (53 groups)	$T_{ASTD} \leq -2\text{ }^{\circ}\text{C}$	-0.0220 (0.0266)	-0.0192 (0.0242)	-0.0359 (0.0380)
Neutral conditions (108 groups)	$-2\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{ASTD} < 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	-0.1073 (0.1157)	-0.1020 (0.1110)	-0.0688 (0.0935)	-0.1014 (0.1105)
Total conditions		-0.0516 (0.0811)	-0.0468 (0.0781)	-0.0390 (0.0668)	-0.0456 (0.0778)

归一化标准差 NSEE 的结果表明,在稳定环境下,Frederickson(2005)最优,LWKD 8.01 最大;不稳定层结环境下,LWKD 8.01 要优于其他三者,仅为 0.0226;而中性与近中性环境下,Wyngaard(1973)误差最大,达到 0.1157,Frederickson(2005)误差最小;总体上看,Frederickson(2005)离散程度最小,LWKD 8.01 和 Edson(1991)很接近,Wyngaard(1973)最差。

综上所述,海洋大气环境的稳定度对模型计算精度具有显著的影响。Edson(1991)与 LWKD 8.01 在不稳定层结下的计算结果要优于稳定层结,其余两者则相反。总体来看,中性和近中性环境下四种模型的效果都较差,需进一步改进。

#### 4.2 新的 $f_T$ 函数形式与 $C_n^2$ 模型改进

从上述的对比可以看出,Frederickson 提出的  $C_n^2$  模型在稳定及近中性环境下的性能明显优于其他模型,其原因在于当稳定度  $z/L > 0$  时,Frederickson 给出  $f_T$  与  $z/L$  遵循  $-2/3$  幂率,这不同于其他三种参数形式。鉴于此,本文尝试通过改进  $f_T$  函数形式,提高  $C_n^2$  模型的计算精度。

由(4)式可知,无量纲参数  $f_T$  可以由温度结构常数  $C_T^2$ 、温度特征尺度  $t_*$  以及高度  $z$  确定:

$$f_T = \frac{C_T^2 z^{2/3}}{t_*^2}, \quad (10)$$

式中  $t_*$  可以利用涡动相关法由  $\overline{w'T'}$ 、摩擦速度  $u_*$  表示:

$$t_* = -\overline{w'T'}/u_* \quad (11)$$

根据(10)、(11)式可以得到

$$f_T = \frac{C_T^2 z^{2/3} u_*^2}{\overline{w'T'^2}} \quad (12)$$

由(12)式可以实现  $f_T$  的直接测量,进而得到  $f_T$  随稳定度  $z/L$  的分布。通过数据拟合获取  $f_T$  的函数形式。

图4为利用本次试验的观测数据,得到的无量纲参数  $f_T$  随稳定度  $z/L$  变化分布情况。为便于比较,图中还标示了其他4种参数方案。

图4中圆点为实验数据,光滑曲线为五种  $f_T$  函数曲线,其中的粗实线为拟合得到的新的  $f_T$  (图例为 Dalian(2009)),其函数形式如下:

$$f_T = \begin{cases} 3000(1 - 50000z/L)^{-2/3}, & z/L \leq 0 \\ 2000(1 + 8000z/L)^{-2/3}, & z/L > 0 \end{cases} \quad (13)$$

图4中可见,Dalian(2009)分布明显有别于 Wyngaard(1973)、Edson(1991)以及 LWKD 8.01 的参数形式,尤其在  $z/L > 0$  的稳定环境下, $f_T$  与稳定度  $z/L$  并不遵循  $2/3$  幂率,而更加符合  $-2/3$  幂率的分

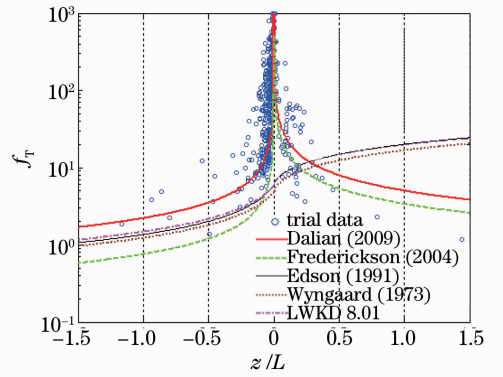


图4 无量纲  $f_T$  参数随稳定度  $z/L$  分布及拟合曲线  
Fig. 4 Dimensionless temperature structural parameter  $f_T$  plotted versus the stability  $z/L$  and fitting curve of  $f_T$  function

布。虽然 Dalian (2009) 分布类似 Frederickson (2005) 的形式,但与之不同的是相同稳定度环境下  $f_T$  的值明显要大于 Frederickson(2005)。

应用新的  $f_T$  参数方案重新计算图2中的折射率结构常数  $C_n^2$ ,如图5所示。进一步评估其相对偏差(Error)和归一化标准差(NSEE),如表2所示。

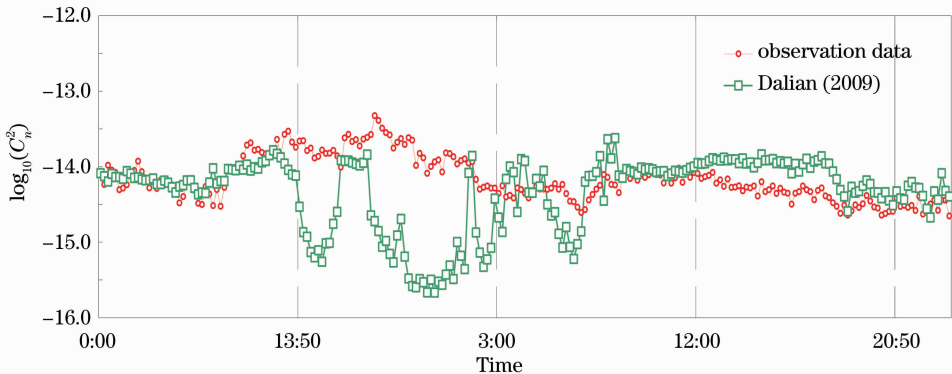


图5 采用新的  $f_T$  参数方案得到的  $C_n^2$  模型计算结果  
Fig. 5 Results calculated by  $C_n^2$  model using the new  $f_T$  function

表2 参数方案 Dalian(2009)与观测值  $\lg C_n^2$  的相对偏差 Error 和归一化标准差(NSEE)

Table 2 Relative deviations (Error) of the parameterization scheme (Dalian2009) and measured value  $C_n^2$  and normalized standard deviation (NSEE)

Dalian(2009)		Error	NSEE
Stable conditions	$T_{ASTD} \geq 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$	0.0190	0.0209
Unstable conditions	$T_{ASTD} \leq -2 \text{ }^\circ\text{C}$	-0.0028	0.0134
Neutral conditions	$-2 \text{ }^\circ\text{C} < T_{ASTD} < 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$	-0.0442	0.0709
Total conditions		-0.0162	0.0502

由图5可见,应用新  $f_T$  的模型计算结果的总体趋势与实测值是一致的,在中性和近中性大气层结环境下,计算精度在要优于其他4种模型,表2可以更加清楚指出,Dalian(2009)在不稳定层结下的标

准差仅为0.01,较之前最好的 Frederickson(2005)下降了2个百分点;中性环境下 Dalian(2009)也是最优的;仅在稳定层结下,标准差略高于 Frederickson(2005),不足0.1,这可能是由于稳定

环境下数据点较少,且相对分散影响了拟合的精度。从总体上看,Dalian(2009)明显优于所有参数方案,相对偏差较之前最好的 0.04 下降到 0.01,标准差仅为 0.05。

综上所述,新的  $f_T$  参数方案[Dalian(2009)]能够很好地计算不同稳定度环境下的湍流强度,特别是中性以及不稳定环境。另外,实验分析证明:在稳定层结环境下,传统的 2/3 幂率并不具备普适性,对于该实验海域  $f_T$  与稳定度  $z/L$  的关系更符合 -2/3 幂率。

## 5 结 论

通过海上实验,对比分析了几种近海面大气光学湍流计算模型,揭示了采用不同  $f_T$  参数方案的  $C_n^2$  模型在不同大气稳定度环境下的性能。结果表明,在中性和近中性环境下 4 种模型的误差较大。鉴于此,基于实测数据和数值拟合,提出了一个新的  $f_T$  函数形式。误差分析表明采用新的  $f_T$  参数方案的模型计算精度较其他模型有了一定的提高。

本文仅针对一次黄渤海北部海域的海上光学湍流实验进行了探索性的研究,通过新的  $f_T$  函数形式可以为  $C_n^2$  模型的改进提供一种新途径。由于实验区域以及实验条件的限制,新  $f_T$  函数的普适性,以及  $f_T$  函数对  $C_n^2$  模型提升的贡献大小,需要进一步开展更完善的实验研究。

## 参 考 文 献

- 1 C. W. Fairall, E. F. Bradley, J. E. Hare *et al.*. Bulk parameterization of air-sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm[J]. *J. Climate*, 2003, **16**(4): 571~591
- 2 J. C. Wyngaard. On surface layer turbulence[C]. Workshop on Micrometeorology, 1973. 101~149
- 3 P. A. Frederickson, 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
- 4 L. Forand. The L(W)WKD Marine Boundary Layer Model7. 09

- [R]. Québec: Defense Research Establishment Valcartier, 1997. Report R-9619
- 5 Yuan Renmin, Zeng Zongyong, Ma Chengsheng. Estimation optical turbulence by meteorology factors [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2001, **18**(1): 87~91  
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
- 6 Wu Xiaoqing, Wang Yingjian, Zeng Zongyong *et al.*. Numerical model of atmospheric optical refractive index structure parameter [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(6): 819~823  
吴晓庆, 王英俭, 曾宗泳 等. 一维大气边界层光学折射率结构常数的数值模式[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(6): 819~823
- 7 Dai Fushan, Li Youkuan. Estimation of the optical turbulence in the marine atmospheric surface layer based on meteorological data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 191~196  
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
- 8 P. A. Frederickson, S. D. Hammel, D. Tsintikidis. Improving bulk  $C_n^2$  models for over-ocean applications through new determinations of the dimensionless temperature structure parameter[C]. *SPIE*, 2007, **6708**: 670807
- 9 Rao Ruizhong. Optic Propagation in the Turbulence Atmosphere [M]. Anhui: Anhui Science and Technology Press, 2006  
饶瑞中. 光在湍流大气中的传输[M]. 安徽: 安徽科技出版社, 2006
- 10 E. L. Andreas. Estimating  $C_n^2$  over snow and sea ice from meteorological data[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, **5**(4): 481~495
- 11 Li Yunbo, Fang Zheng, Zhang Yonggang *et al.*. Refraction effects on electro-optical target characteristic in near sea surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 1~6  
李云波, 方正, 张永刚 等. 近海面异常折射对光电探测目标特征的影响分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 1~6
- 12 R. B. Stull. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Dordrech: Kluwer Academic Publishers, 1991
- 13 Yuan Renmin, Zeng Zongyong, Xiao Liming *et al.*. Comparison of some methods of measuring refractive index structure parameter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 755~761  
袁仁民, 曾宗泳, 肖黎明 等. 不同方法测量折射率结构常数的比较[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6): 755~761
- 14 Miao Manqian, Zhu Chaoqun. Study on the applicability of the surface layer similarity theory [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, **55**(2): 210~219  
苗曼倩, 朱超群. 近地层相似理论适用的分析研究[J]. *气象学报*, 1997, **55**(2): 210~219
- 15 Zhiqiu Gao, Lingen Bian, Xiuji Zhou. Measurements of turbulent transfer in the near-surface layer over a rice paddy in China[J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(D13): 4387~4399

栏目编辑: 何卓铭