

一个新的海边光学湍流外尺度和 C_n^2 的廓线模式

蔡俊 李学彬 詹国伟 武鹏飞 徐春燕 青春 吴晓庆

A new model for the profiles of optical turbulence outer scale and C_n^2 on the coast

Cai Jun Li Xue-Bin Zhan Guo-Wei Wu Peng-Fei Xu Chun-Yan Qing Chun Wu Xiao-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 014206 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171324

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171324>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[梯度倾斜相关测量水平 \$C_n^2\$ 和横向风速廓线的理论与仿真研究](#)

Simulation research and theoretical study on measurement of atmospheric optical turbulence and wind profile using the correlation of gradient-tilt

物理学报.2017, 66(10): 104207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.104207>

[大气 SO₂ 柱总量遥感反演算法比较分析及验证](#)

Comparison and validation of band residual difference algorithm and principal component analysis algorithm for retrievals of atmospheric SO₂ columns from satellite observations

物理学报.2016, 65(8): 084204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084204>

[双孔差分闪烁法测量大气湍流的理论与实验研究](#)

Theoretical and experimental study of atmospheric turbulence measurement using two-aperture differential scintillation method

物理学报.2016, 65(7): 074205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074205>

[近地面大气光学湍流外尺度的实验研究](#)

Experimental investigation of the outer scale in atmospheric optical turbulence near the ground

物理学报.2015, 64(22): 224216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224216>

[近地面大气光学湍流空间相关特性的实验研究](#)

Spatial correlation experimental analysis of atmospheric optical turbulence in the near ground layer

物理学报.2015, 64(11): 114212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114212>

一个新的海边光学湍流外尺度和 C_n^2 的廓线模式*蔡俊¹⁾²⁾ 李学彬¹⁾ 詹国伟³⁾ 武鹏飞¹⁾ 徐春燕¹⁾²⁾ 青春¹⁾²⁾ 吴晓庆^{1)†}

1) (中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气光学重点实验室, 合肥 230031)

2) (中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 合肥 230026)

3) (广东省茂名市气象局, 茂名 525000)

(2017年6月8日收到; 2017年10月12日收到修改稿)

2016年12月13日至2017年1月2日期间, 在茂名博贺海洋气象科学实验基地, 采用自行研制的湍流气象探空仪, 获取了30份海边温、湿、压、风速、风向和 C_n^2 等探空数据. 基于HMNSP99外尺度模式, 利用海边的探空数据拟合得到一个茂名大气光学湍流外尺度经验公式. 同时对实验测得的高空湍流廓线数据进行统计平均, 然后基于Hufnagel-Valley模式拟合得到符合海边湍流廓线规律的统计平均模式 (C_n^2 sea model). 根据Tatarski高空湍流参数化方案, 将用茂名外尺度公式估算的 C_n^2 分别与探空测量的 C_n^2 以及用其他外尺度模式估算的 C_n^2 进行了比较. 对其进行统计性分析发现, 利用新拟合的茂名外尺度公式、HMNSP99, Dewan以及Coulman等外尺度模式计算的 $\log_{10}(C_n^2)$ 与实测值的整体相关系数分别为0.924, 0.848, 0.763和0.651, 在变化趋势和量级上都表现出较好的一致性; 以上四种外尺度模式估算结果的误差都很小, 其整体平均绝对误差和平均相对误差分别为0.514和2.963%, 0.627和3.612%, 0.943和5.439%, 0.766和4.417%, 新拟合的外尺度模式的误差最小. 进一步验证了新的海边外尺度和 C_n^2 廓线模式的可靠性和有效性, 此外还发现高空大气光学湍流的发生与风切变和温度梯度具有十分密切的关系, 为光电工程在海边场景应用所需的大气光学湍流廓线模式提供支持.

关键词: 海边, 湍流廓线, 参数化, 外尺度

PACS: 42.68.-w, 42.68.Bz, 47.27.E-

DOI: 10.7498/aps.67.20171324

1 引言

在湍流大气中传输的光波, 由于受大气折射率随机起伏的影响, 会出现光强起伏、相位改变、光束漂移、闪烁、到达角起伏等各种效应^[1,2]. 对于近海面, 随着温湿度等的变化, 海上折射环境的变化会导致光电系统出现“超折射”或“欠折射”现象, 使得探测距离小于或大于正常视距, 在很大程度上影响目标的识别跟踪^[3]. 海边高空光学湍流强度信息可以用来指导自适应光学系统的设计, 从而大大降低湍流的影响, 改善光电系统的成像质量和性能,

满足工程实际应用以及提高目标识别的精度. 而湍流强度通常难以进行大范围的实时测量, 因此建立大气湍流强度与常规气象参数之间的关系成为大气光学湍流参数化的重要研究课题.

目前国内外对高空大气光学湍流参数化方案的研究开展了大量的工作. 1966年, Fried^[4]估算了 C_n^2 的平均廓线. 随后Wyngaard等^[5], Hufnagel^[6]以及Beland和Brown^[7]分别给出了大气边界层、自由大气层和平流层的 C_n^2 表达式. 这些由观测数据拟合出的平均廓线模式代表的是大气光学湍流的统计平均结果, 无法反映湍流层强度的细节变化以及精细结构. 因此, 基于Tatarski的湍流估

* 国家自然科学基金(批准号: 41576185)和中科院科技创新基金(批准号: CXJJ)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xqwu@aiofm.ac.cn

算模式, 通过常规气象参数计算大气折射率结构常数的各种模式陆续发展起来. Coulman等^[8]通过标准的气象探空数据和以高度为函数的外尺度值估算折射率结构常数得到了比较理想的效果. Dewan等^[9]根据空间分辨率为300 m的探空数据, 建立了含有水平风梯度的外尺度模式. 在不引入外尺度参量的情况下, Vanzandt等^[10]对大气精细结构进行统计处理, 并提出了一种随机模型, 但是Coulman等^[8]发现这种随机模型的预报结果与实际观测值的一致性并不是很好. Masciadri等^[11]基于非静力学气象模式和数值地形模式, 仿真得到了高空湍流廓线的三维空间分布. 孙刚等^[12]利用探空数据得到了合肥地区四季以及昼夜大气光学湍流强度的统计廓线. 青春等^[13]将气象数值预报模式(The Weather Research and Forecasting model, WRF)用于模拟云南高美古天文观测站大气湍流廓线, 与实测结果基本一致. 在海边开展的高空光学湍流测量和外尺度模式研究还比较有限, Beland等^[14]在夏威夷的AMOS (Air Force Maui Optical Station) 观测站通过高分辨率的气球探空测量, 采用算术平均和多项式拟合建立了AFGL AMOS (Air Force Geophysics Laboratory AMOS) 模式. Miller和Zieske^[15]以及James等^[16]对在该观测站获取的大量夜间观测资料进行分段拟合建立了SLC (Submarine Laser Communication) 夜间光学湍流模式. 吴晓庆等^[17]通过高精度的温湿度探空仪, 对东海进行了探空观测, 并将 C_n^2 廓线与边界层湍流模式进行了比较. 上述研究并没有涉及海边大气光学湍流外尺度模式研究. 此外Dewan等诸多外尺度模式都是在分析大量实验观测数据基础上提出来的符合实验观测地点外尺度特征的半经验半理论模式, 虽然被广泛的使用, 但是其在海边条件下的适用性及估算精度都有待进一步的研究. 所以建立符合海边气象特征与湍流变化特征的外尺度和 C_n^2 模式是一项很有意义的工作.

本文利用自行研制的湍流气象探空仪于2016年12月至2017年1月在广东茂名海边得到30份探空数据, 采用具有代表性的外尺度模式和Tatarski光学湍流参数化方案对海边外尺度及高空大气光学湍流廓线进行估算, 同时提出符合海边湍流变化特征的外尺度模式和 C_n^2 廓线模式, 为光电工程在海边场景应用所需的大气光学湍流廓线模式提供支持.

2 湍流气象探空仪及其测量原理简介

自行研制的湍流气象探空仪由GPS定位模块、温湿压测量模块、微温传感器、数据测量与转换板、发射板、电池组等组成. 图1是湍流气象探空仪电路框图. 数据测量与转换板有两个模拟输入端口、两个数字输入端口和一个数字输出端口. 其中的两个模拟输入端口接入两路微温脉动信号, 经两路ADS1110 A/D变换器, 转换为数字信号, 用来获取温度结构常数 C_n^2 ; 两路数字输入端口接入GPS模块和测量温湿压模块的数字信号, 获取探空位置信息(如高度, 经纬度等)以及风速、风向、气温、湿度和气压的廓线数据. 各输入端口的数字信号经数据测量与转换板进行数据格式和波特率的统一编码, 输出二进制二进码十进数(BCD)探空码, 然后发送给与其上一个数字输出端口相连接的发射板. 发射板将数字输出端统一编码后的探空数据进行FSK (frequency-shift keying) 调制, 包括调制速率、频偏、发射频率、输出功率等参数, 从而得到我们所需要的全部探空数据. 其中微温传感器的频率响应范围为0.1—30 Hz, 微温传感器测量的最小温度起伏标准差不大于 $0.002\text{ }^\circ\text{C}$, 信号输出为 $0\text{--}+5\text{ V}$. 可以粗略估算一下常规气象参数测量误差对 C_n^2 的影响, 通常探空传感器测温精度小于 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$, 测压精度在1 hPa左右. 因此, C_n^2 测量值相对误差在近地面层($30\text{ }^\circ\text{C}$, 1000 hPa)不到1%, 在低平流层(28 km, $-49\text{ }^\circ\text{C}$, 15 hPa)不到10%. 对于具有量级变化的 C_n^2 而言, 这一影响是很小的.

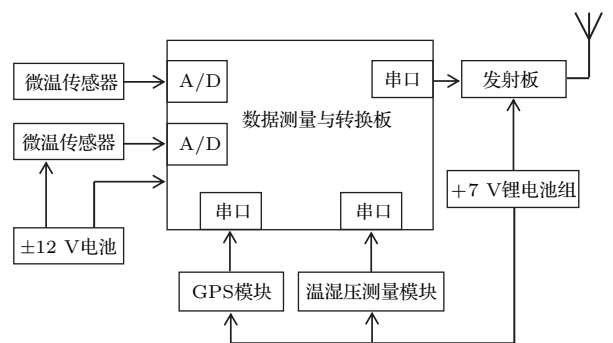


图1 湍流气象探空仪电路框图

Fig. 1. The circuit diagram of turbulent meteorological sounding instrument.

对于局地均匀各向同性湍流, 温度结构常数 C_T^2 与相距为 r 的空间两点温差的方差具有如下关系:

$$C_T^2 = \langle [T(\mathbf{x}) - T(\mathbf{x} + \mathbf{r})]^2 \rangle r^{-2/3},$$

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

式中, \mathbf{x} 和 $\mathbf{x} + \mathbf{r}$ 是位置矢量; T 为气温, 单位为 K; $\langle \rangle$ 表示系综平均; l_0 和 L_0 分别为湍流内尺度和湍流外尺度.

在可见光和近红外波段, 折射率起伏主要由温度起伏引起, 湿度的贡献很小. 因此折射率结构常数 C_n^2 可直接由气温 T , 大气压强 P 和温度结构常数 C_T^2 计算得到

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

式中大气压强 P 的单位为 hPa.

采用一对相距 1 m、直径 10 μm 、电阻 20 Ω 的铂丝作为微温探头, 将空间两点气温的变化感应为电阻值的变化, 通过不平衡电桥转化为电压的变化, 从电压放大器输出的电压变化 ΔV 对应一定的气温变化 ΔT , 因此

$$\Delta V = A \cdot \Delta T, \quad (3)$$

式中 A 是标定系数. 通过测量空间两点的气压变化, 经 (3) 式计算得到两点的温差, 再由 (1) 式计算得到 C_T^2 , 最后由 (2) 式求得折射率结构常数 C_n^2 .

3 高空光学湍流参数化

3.1 Tatarski 光学湍流参数化方案

大气折射率结构常数 C_n^2 是衡量大气湍流强弱的重要参量, 根据局地均匀各向同性理论, Tatarski^[18] 得到利用常规气象参数和湍流外尺度估算大气折射率结构常数的关系式为

$$C_n^2 = \alpha L_0^{4/3} M^2, \quad (4)$$

式中 α 是常数, 取值 2.8; L_0 是湍流外尺度. M 是位势折射率梯度, 其表达式为

$$M = \frac{\partial N}{\partial h} = -\frac{79 \times 10^{-6} P}{T^2} \frac{\partial \theta}{\partial h}, \quad (5)$$

式中 N 是大气折射率, h 是海拔高度, θ 是位温, 单位是 K. 位温与气温 T 之间的关系为

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.286}. \quad (6)$$

将常规的气象参数和外尺度模式值代入 (4) 式即可得到 C_n^2 的模式估算值.

在 Tatarski 高空湍流估算模式的所有输入参数中, 除了湍流外尺度 L_0 , 其他的参量都能够通过载有传感器的探空气球直接测量得到. 由此可见, 选取合适的外尺度模式对于对估算精度有着十分重要的影响. 目前应用比较广泛的外尺度模式有 Dewan 外尺度模式, HMNSP99 (Holloman Spring 1999) 外尺度模式, Coulman 外尺度模式.

3.1.1 Dewan 外尺度模式

Dewan 等^[9] 通过大量的实验观测, 根据烟羽运动轨迹得到了高分辨率垂直风切变, 分别提出了对流层和平流层外尺度的经验公式

$$L_0^{4/3} = 0.1^{4/3} \times 10^Y, \quad (7)$$

$$Y = \begin{cases} 1.64 + 42S, & \text{troposphere,} \\ 0.506 + 50S, & \text{stratosphere,} \end{cases} \quad (8)$$

$$S = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial h} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial h} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (9)$$

式中 Y 是风切变量 S 的一元线性函数; u, v 分别是水平径向风速和横向风速.

3.1.2 HMNSP99 外尺度模式

Jackson 和 Reynolds^[19] 利用 1999 年 6 月在新墨西哥霍罗曼空军基地获得的探空数据推导出外尺度与风切变量以及温度梯度之间的关系式, 该模式与 Dewan 模式类似, 只是在 Y 函数中加入了温度梯度

$$Y = \begin{cases} 0.362 + 16.728S - 192.347 \frac{dT}{dh}, & \text{troposphere,} \\ 0.757 + 13.819S - 57.784 \frac{dT}{dh}, & \text{stratosphere.} \end{cases} \quad (10)$$

3.1.3 Coulman 外尺度模式

Coulman 等^[8] 分析了在法国和美国等地用大气闪烁仪 SCIDAR (Scintillation Detection and Ranging) 技术探空测量的大量 C_n^2 和气象参数数据, 分段拟合得到高空湍流外尺度随高度变化的经验公式

$$L_0(h) = \begin{cases} 3.21\left(\frac{h}{1000}\right)^{-0.11} - 2.4616, & h \leq 2000 \text{ m}, \\ \frac{4}{1 + \left(\frac{h - 8500}{2500}\right)^2}, & 2000 \text{ m} \leq h \leq 17000 \text{ m}, \\ 0.307 - 0.0324\left(\frac{h}{1000} - 17\right) + 0.00167\left(\frac{h}{1000} - 17\right)^2 + 0.000476\left(\frac{h}{1000} - 17\right)^3, & h \geq 17000 \text{ m}. \end{cases} \quad (11)$$

Dewan 外尺度模式包含了与湍流密切相关的风切变因子, 虽然分别给出了对流层和平流层的经验公式, 但是在二者过渡的对流层顶位置不够平滑, 常出现比较大的跳变. HMNSP99 外尺度模式在 Dewan 模式的基础上增加了温度梯度因子, 更多地包含了可能促使湍流发生的因子, 但在对流层顶位置也存在和前者一样的问题, 且二者都不含有其他可能和湍流有关的影响因子. Coulman 外尺度模式形式比较简单, 使用方便, 是根据多个台址实测数据总结的经验模式, 但它仅仅只是高度的函数, 不包含实时气象参数的输入, 缺乏对不同大气条件的区分能力, 普适性有限.

3.2 海边外尺度和 C_n^2 模式的建立

从 2016 年 12 月 13 日到 2017 年 1 月 2 日, 用自行研制的气象探空仪在茂名博贺海洋气象科学实验基地 (21°27'N, 111°18'E) 进行探空测量. 观测站位于广东省西南部, 南濒南中国海. 期间, 在海边共释放了 30 个探空气象气球. 探空仪温度脉动传感器的响应频率为 0.1—30 Hz, 统计平均时间为 5 s, 气球的上升速度为 4 m/s. 用一根 50 m 长的绳子将探空仪系在气象气球上, 这是为了避免气球在上升过程中产生的扰动对探空测量准确度的影响. 一次探空测量能够获得垂直分辨率为 20 m 的风速、风向、气温、大气压强、相对湿度和大气折射率结构常数等数据廓线.

3.2.1 海边外尺度模式的建立

研究表明^[20], 高空风切变和温度梯度与光学湍流的产生有着密切的关系, 因此将外尺度模式与高空风切变和温度梯度建立联系更能够满足实际需要. 本文基于同时加入了风切变和温度梯度因子的 HMNSP99 外尺度模式, 根据本次海边探空实验获取的数据中, 选取接收信号良好、最大观测高

度至少达到 28 km 的 15 条探空数据进行统计分析. 以 (10) 式为基础拟合得到了符合海边气候和环境特征的 Y 函数,

$$Y_{\text{New}} = \begin{cases} 0.439 + 18.281S - 163.556\frac{dT}{dh}, & \text{troposphere} \\ 0.613 + 4.554S - 65.479\frac{dT}{dh}, & \text{stratosphere.} \end{cases} \quad (12)$$

进而由 (7)、(9) 和 (12) 式可得到一个新的茂名外尺度经验公式.

3.2.2 海边 C_n^2 模式的建立

将上一节得到的茂名外尺度经验公式运用到 Tatarski 湍流参数化方案中可以得到一个新的海边 C_n^2 模式. 同时以 Hufnagel-Valley 模式为基础, 对选取的 15 条数据进行统计平均, 可重新拟合得到一个符合海边湍流廓线变化的统计平均模式, 不妨称为海边 C_n^2 经验模式 (C_n^2 sea model)

$$C_n^2 = 3.82 \times 10^{-32} h^{20.1} e^{-\frac{h}{0.73}} + 2.17 \times 10^{-15} e^{-\frac{h}{0.0136}} + 2.8 \times 10^{-16} e^{-\frac{h}{2.94}}, \quad (13)$$

式中高度 h 的单位是 km. 该统计模式可以反映海边湍流强度最一般的变化规律. 模式的表达式共包含三项, 其中第一项表示在对流层顶经常出现的强湍流层状况, 第二项表示边界层中的湍流状况, 第三项表示自由大气中湍流的状况^[12].

4 模式估算值与实验观测值对比分析

在选取的接收良好、探测高度达到 28 km 以上的 15 条数据中, 着重分析了表 1 中所列举的 6 条探空测量记录.

表1 茂名海边探空记录

Table 1. Record of balloon soundings in Maoming used in the study.

Balloon number	Launch date	Launch time	Termination altitude/km
1#	Dec. 17, 2016	17:59:52	33.7
2#	Dec. 23, 2016	17:50:08	31.5
3#	Dec. 26, 2016	18:19:09	28.4
4#	Dec. 27, 2016	09:08:19	35.5
5#	Dec. 29, 2016	18:22:07	28.6
6#	Jan. 1, 2017	17:47:32	31.0

4.1 海边外尺度模式与实验观测结果对比

为了便于比较分析, 引入参量 L_{Obs} 作为实测的外尺度, 由(4)和(5)式可得

$$L_{Obs} = \left\{ C_n^2 / \left[2.8 \left(\frac{79 \times 10^{-6} P}{T^2} \right)^2 \left(\frac{\partial \theta}{\partial h} \right)^2 \right] \right\}^{3/4}. \quad (14)$$

根据海边一次探空所观测到的大气压强, 气温和大气折射率结构常数, 利用(14)式和(6)式就可以计算出实测的外尺度, 再由(7)、(9)和(12)式即可利用新拟合的茂名外尺度经验公式计算得到海边外尺度的模式估算值.

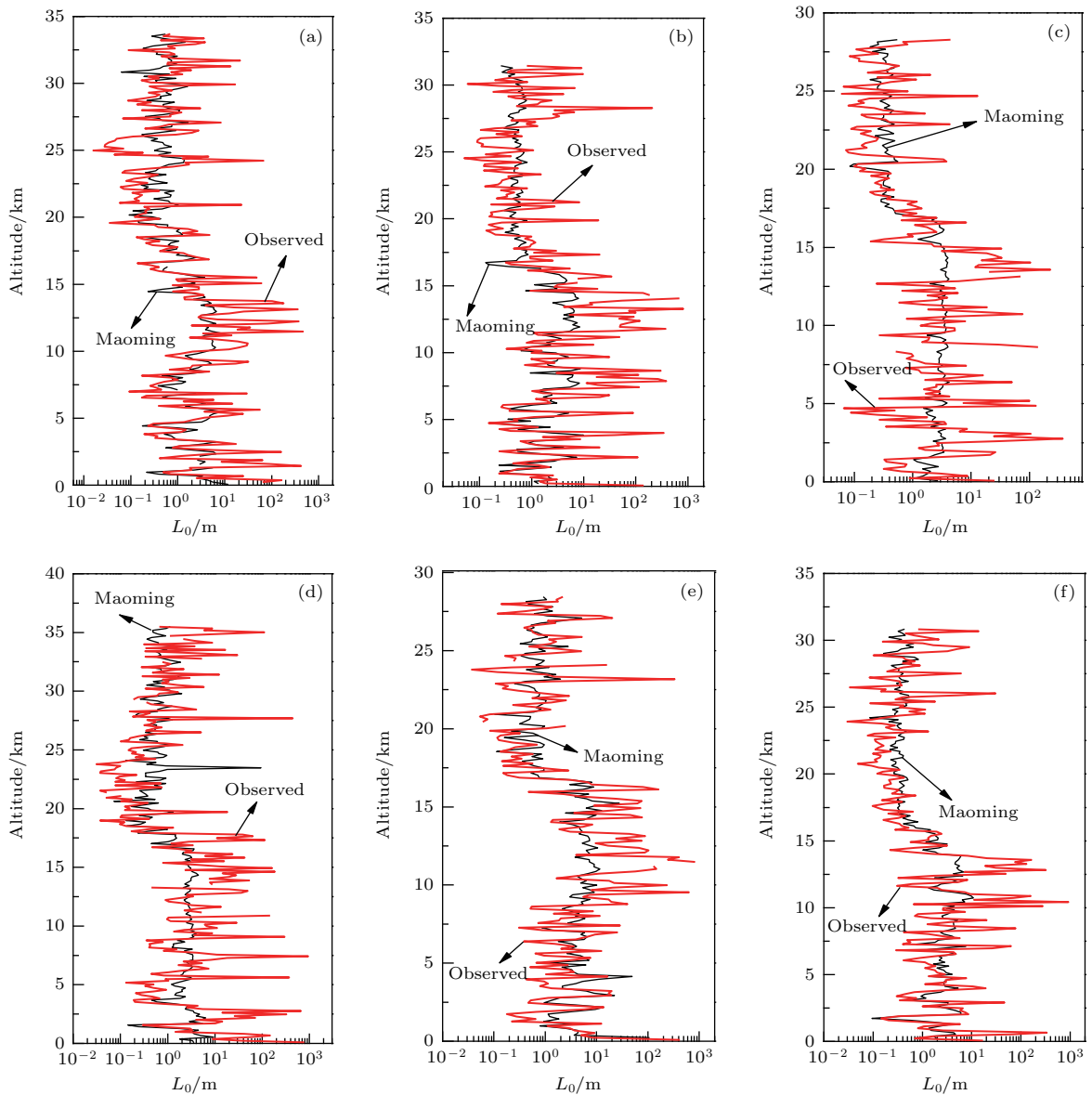


图2 实测的和模式估算的外尺度廓线 (a)—(f) 分别表示1#—6#探空气球

Fig. 2. Comparison of observed and estimated outer scale profiles. The panels (a)–(f) represent 1#–6# balloon launches respectively.

图2所示为茂名外尺度经验公式估算的外尺度和(14)式计算的实测的外尺度随高度的分布廓线,图2(a)—(f)分别对应为选取的1#—6#气象气球.可以看出,外尺度的实测值与估算值变化趋势基本一致;对流层的外尺度通常大于平流层;外尺度的实测值总体上大于模式估算值,且起伏较大;除个别高度层外,茂名外尺度经验公式估算的外尺度一般不超过10 m.总体而言,外尺度的模式估算值与实测值具有较好的一致性,在对流层顶过渡到低平流层区域,二者都有一个急剧变小的特征,此外估算值也能反映外尺度的细节变化,这为将新拟合的茂名外尺度经验公式用于估算海边大气折射率结构常数提供了依据.

4.2 茂名外尺度经验公式估算的 C_n^2 与实验观测结果对比

依据1#—6#气象气球获取的探空数据,利用前文描述的高空湍流参数化方案,将新拟合的茂名外尺度经验公式用于估算 C_n^2 ,并将结果与探空仪的实测值进行比较.图3—图8分别展示了1#—6#探空气球观测的海边的风切变廓线,温度

梯度廓线,利用茂名外尺度经验公式估算的大气折射率结构常数 C_n^2 廓线,实测的 C_n^2 廓线以及基于Hufnagel-Valley模式拟合的 C_n^2 sea model廓线.

如图3—图8所示,13 km以下的风切变和温度梯度起伏整体较小,对应的湍流强度波动也很小,整体比较平稳;而15 km以上的风切变和温度梯度震荡比较剧烈,起伏明显,相应的湍流波动较大,常出现强湍流薄层,整个高度上的湍流间歇性明显.在某些高度上,风切变和温度梯度均出现峰值,且波动明显,与之对应的是伴随着强湍流薄层的出现,这种现象伴随着整个探空测量过程.显而易见,高空湍流的发生与风切变和温度梯度有着直接的关系,这也与文献[19]的工作是一致的.因此,我们选取的同时包含风切变量和温度梯度的HMNSP99外尺度模式是符合湍流发展机理的.

从图3—图8中可以看到,利用新拟合的茂名外尺度公式估算的大气折射率结构常数与实测值无论在量级上还是在整体变化趋势上都较为一致,模式估算值能很好地捕捉到高空湍流变化的细节.而 C_n^2 sea model也基本上能够反映海边高空湍流变化的最一般规律.

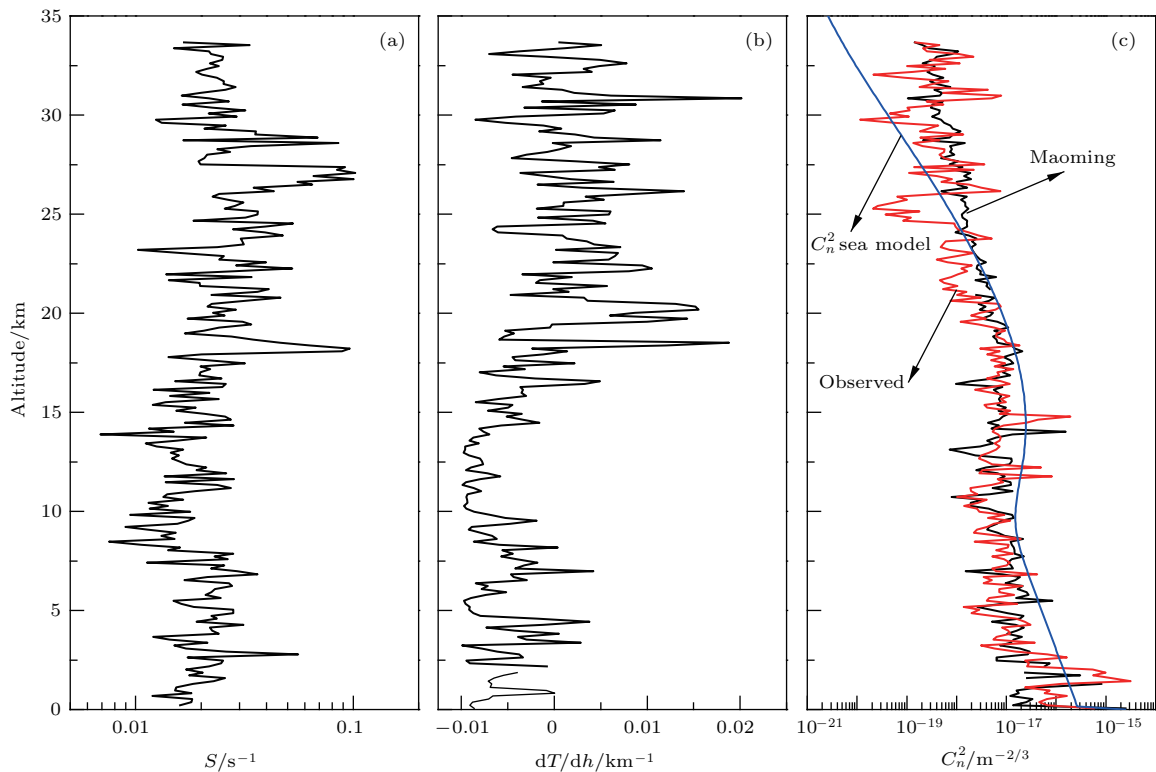


图3 1#探空气球 (a)风切变; (b)温度梯度; (c)大气折射率结构常数廓线

Fig. 3. Profiles of (a) wind shear, (b) temperature gradient, (c) the refractive index structure parameter (C_n^2) for 1# balloon sounding.

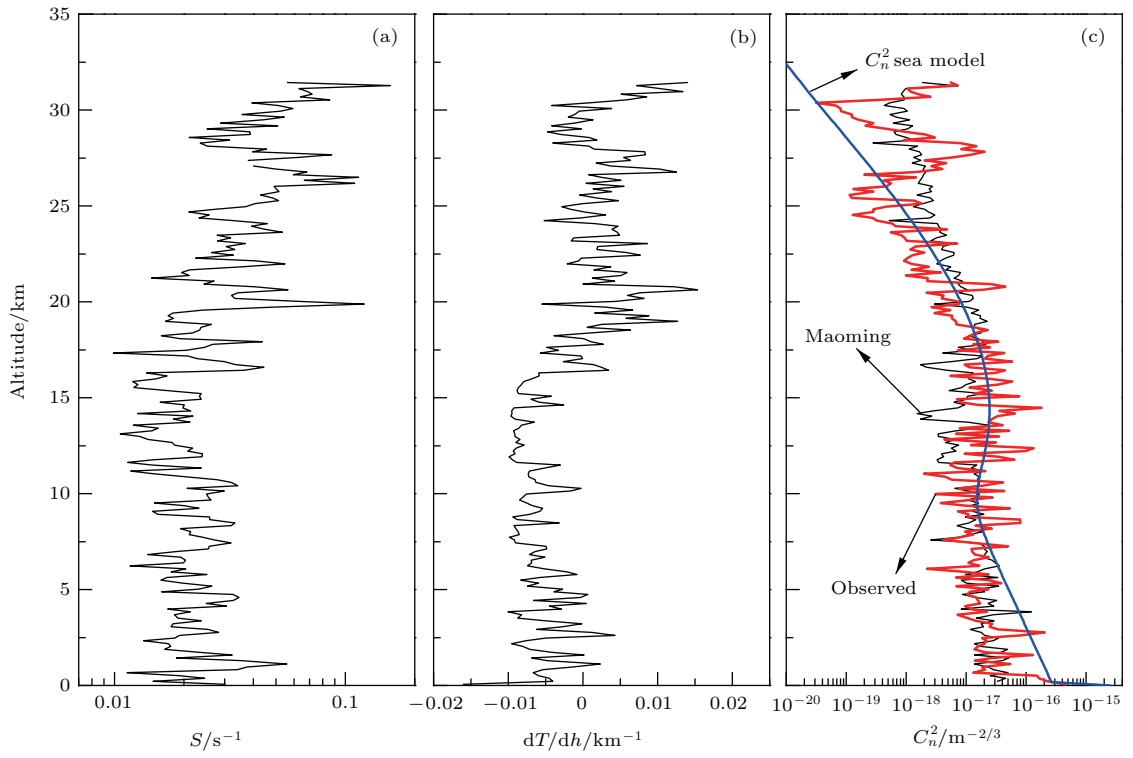


图4 同图3 (2# 探空气球)

Fig. 4. Same as Fig. 3, but for 2# balloon sounding.

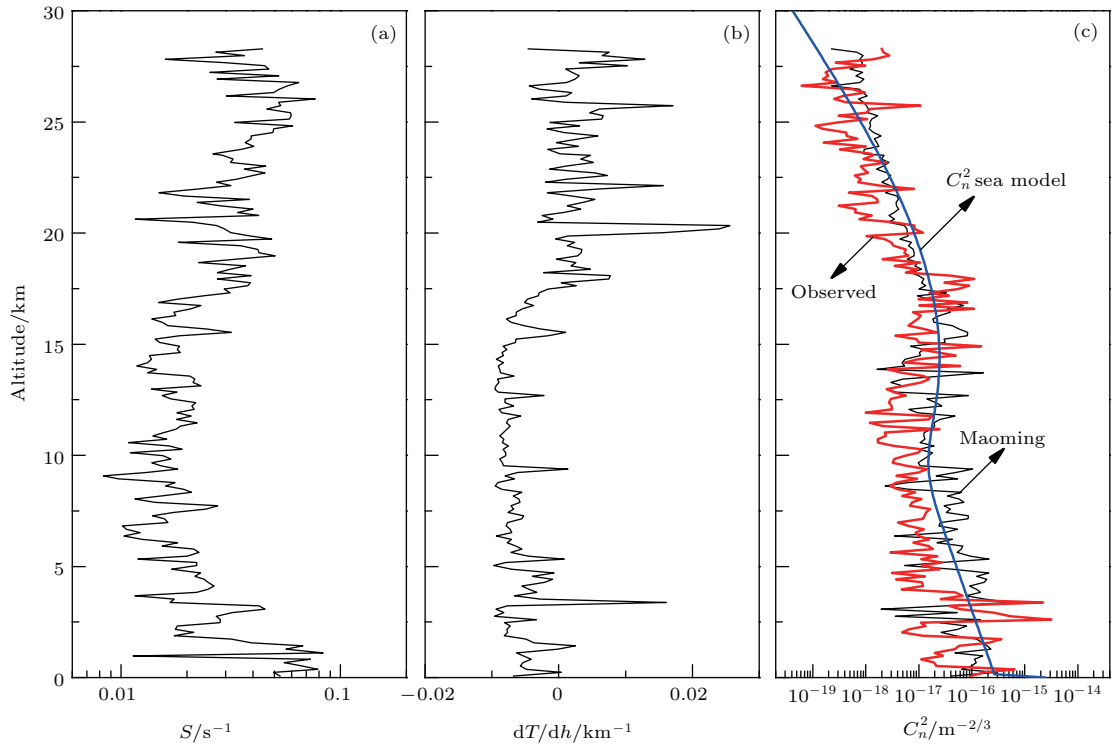


图5 同图3 (3# 探空气球)

Fig. 5. Same as Fig. 3, but for 3# balloon sounding.

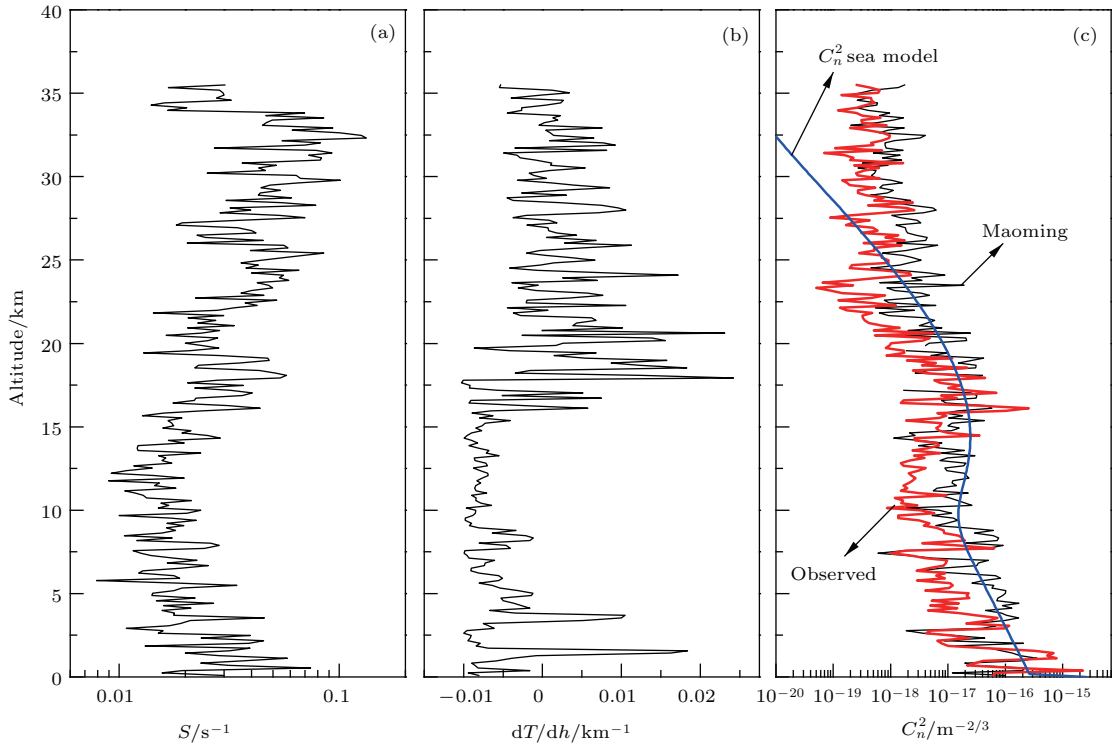


图6 同图3 (4# 探空气球)

Fig. 6. Same as Fig. 3, but for 4# balloon sounding.

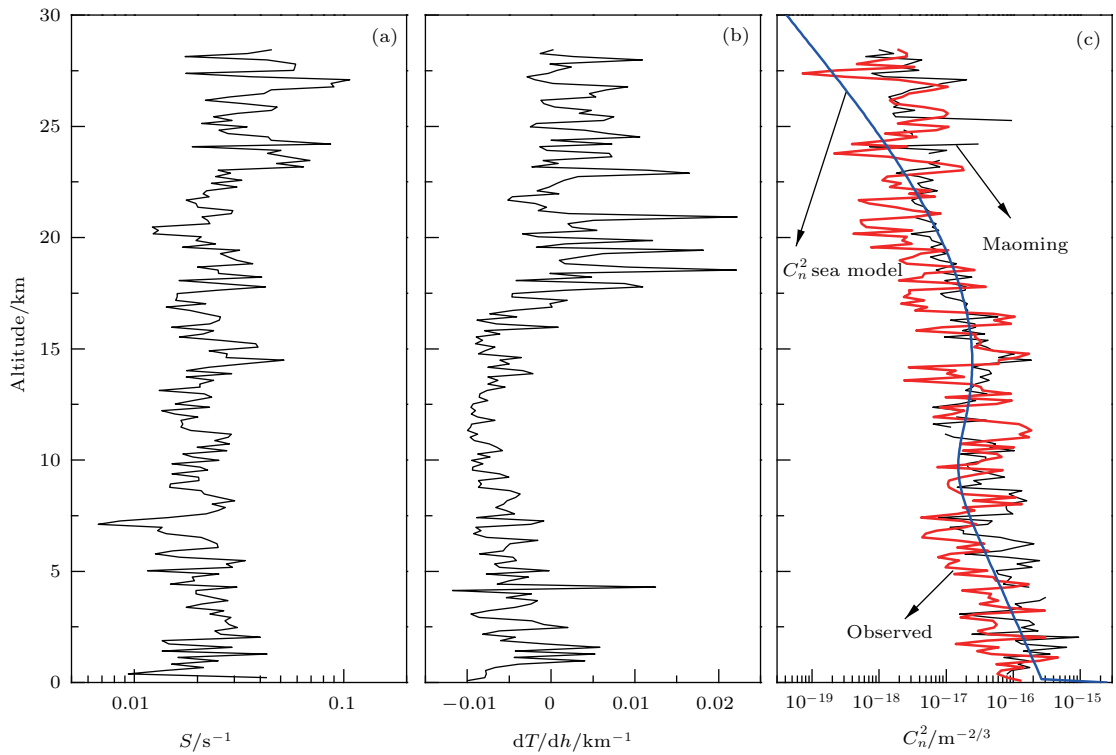


图7 同图3 (5# 探空气球)

Fig. 7. Same as Fig. 3, but for 5# balloon sounding.

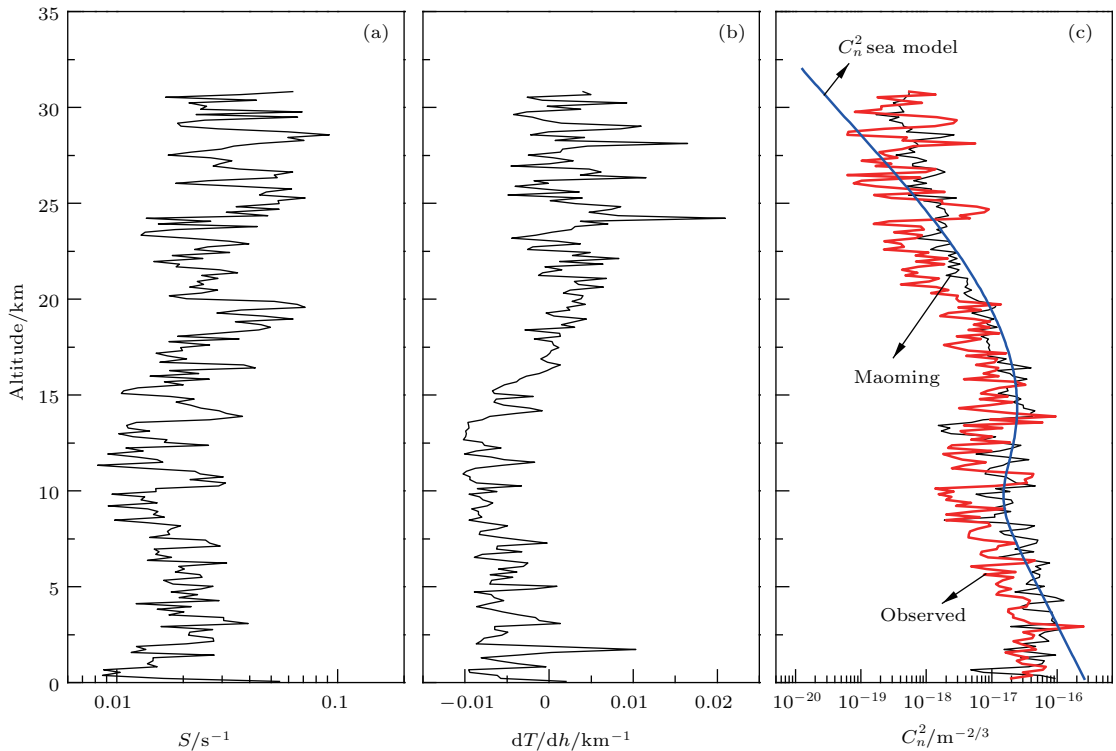


图8 同图3 (6# 探空气球)

Fig. 8. Same as Fig. 3, but for 6# balloon sounding.

5 各模式估算值之间对比分析

5.1 各湍流外尺度模式估算值的对比分析

前文已经介绍了Dewan外尺度模式, HMNSP99外尺度模式和Coulman外尺度模式, 同时初步拟合得到了具有海边湍流特征的茂名外尺度经验公式. 如图9所示, 为根据这四种外尺度模式得到的外尺度估算值, 为便于比较, 实测的外尺度也一并展示在图中, 图9(a)—(f)分别对应为选取的1#—6#气象气球. Coulman外尺度模式由于不含有气象参数, 仅仅是高度的函数, 故其廓线是一条较为平滑的曲线, 它的最大值出现在8.5 km处附近, 约为4 m. 与其他模式差异较大. 在对流层, Dewan, HMNSP99和茂名外尺度经验公式变化趋势基本一致. 而在低平流层, Dewan外尺度模式估算值明显大于其他模式的估算值, 起伏也大. 总体上, HMNSP99和茂名外尺度经验公式值展现出较好的一致性, 只是在某些高度上存在一定差异.

5.2 各 C_n^2 模式估算值的对比分析

将上述的四种外尺度模式分别用于估算海边大气折射率结构常数 C_n^2 , 其廓线如图10所示,

图10(a)—(f)分别对应为选取的1#—6#气象气球. 可以看到, 茂名外尺度经验公式估算结果的起伏最小, Coulman模式和Dewan模式的起伏较大. Dewan模式的估算值整体更大一些, 而Coulman模式的估算值整体更小一些. 与外尺度的变化特征相似, 在17 km处的对流层顶附近, C_n^2 值也有一个急剧变小的变化特征. 但从 C_n^2 的量级和总体变化趋势来看, 利用四种外尺度模式的估算结果较为一致, 符合得较好.

为了更加直观地分析和更加便于比较, 文中采用平均值 (AVG)、偏差 (BIAS)、均方根误差 (RMSE)、相关系数 (R_{xy})、平均绝对误差 (MAE) 和平均相对误差 (MRE) 六个统计量对 $\log_{10}(C_n^2)$ 进行统计分析, 并以此来评估这四种模式估算结果的真实可靠度.

$$AVG = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \text{ or } \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i, \quad (15)$$

$$BIAS = \bar{X} - \bar{Y}, \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}, \quad (17)$$

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (18)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|X_i - Y_i|}{n}, \quad (19)$$

$$MRE = \frac{MAE}{\left| \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right|} \times 100\%, \quad (20)$$

其中 n 为空间序列的个数, X_i 表示第 i 个高度上 $\log_{10}(C_n^2)$ 的观测值, Y_i 表示第 i 个高度上 $\log_{10}(C_n^2)$ 的模式估算值, \bar{X} 和 \bar{Y} 分别表示观测值和估算值的平均值.

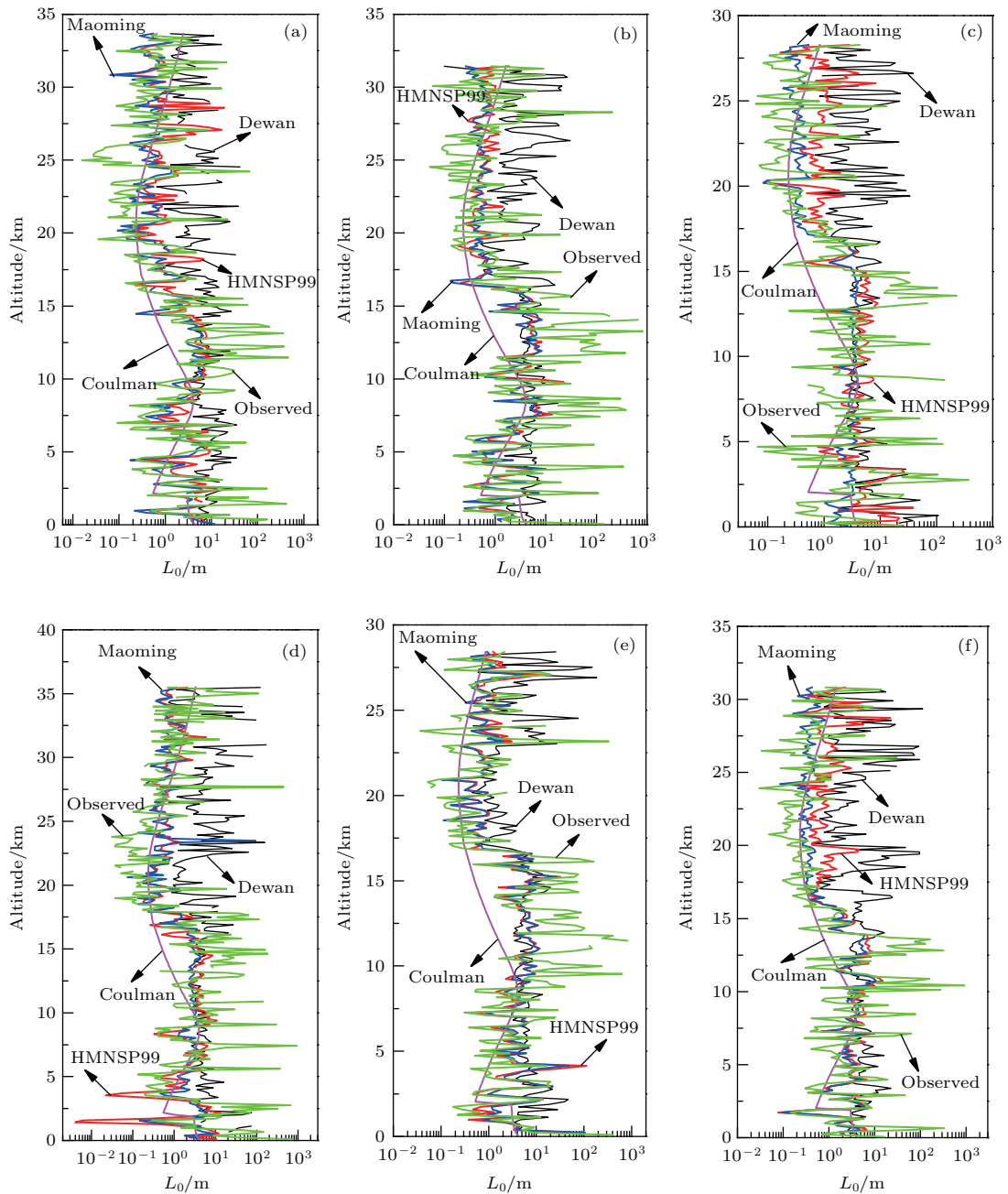


图9 四种外尺度模式估算值的比较 (a)–(f) 分别表示 1#–6# 探空气球

Fig. 9. Comparison of outer scales estimated by four models. The panels (a)–(f) represent 1#–6# balloon launches respectively.

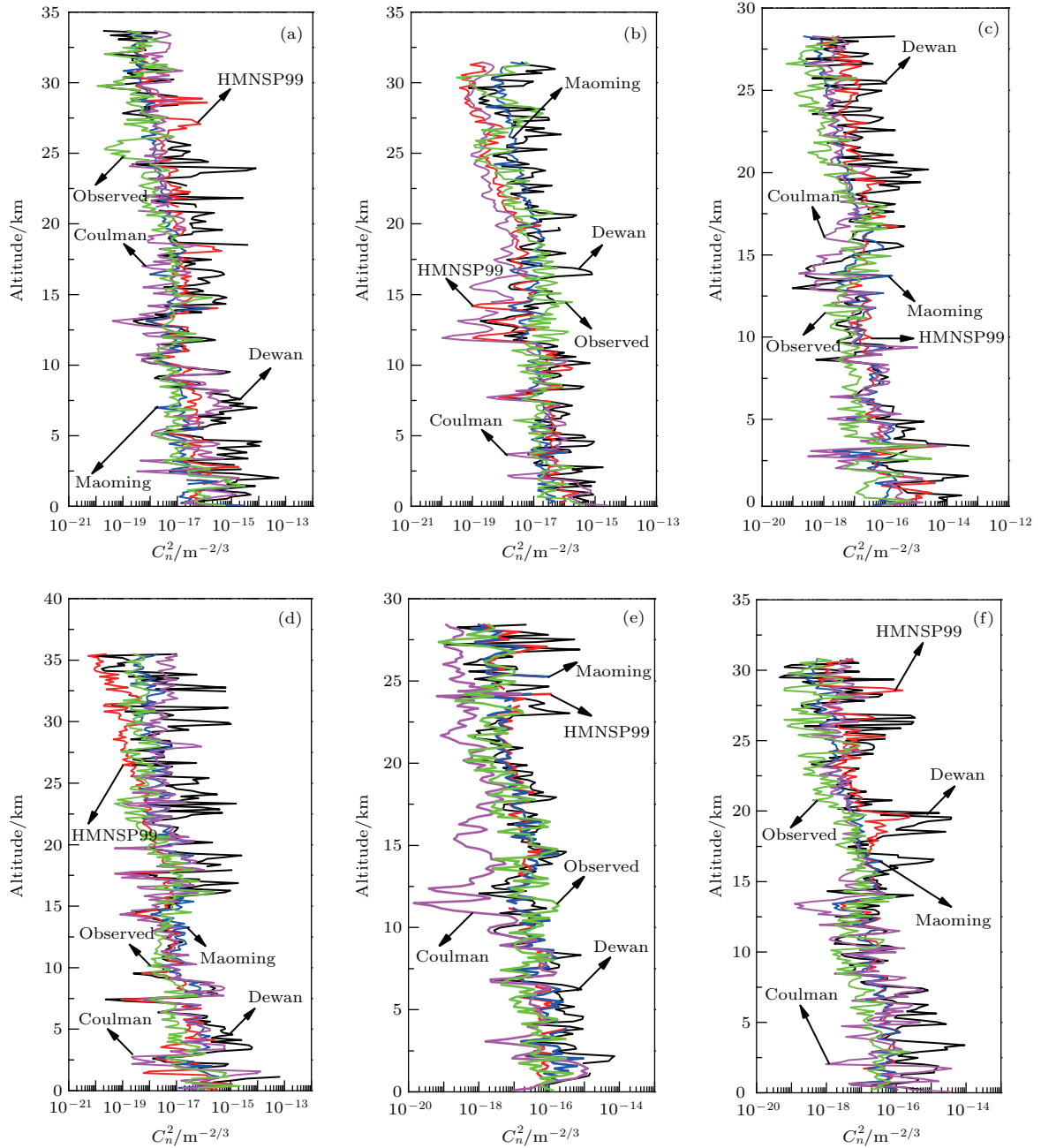


图 10 利用四种外尺度模式估算的 C_n^2 的比较 (a)–(f) 分别表示 1#–6# 探空气球

Fig. 10. Comparison of C_n^2 estimated by four outer scale models. The panels (a)–(f) represent 1#–6# balloon launches respectively.

对于 1#–6# 探空气球, 利用四种外尺度模式估算的 $\log_{10}(C_n^2)$ 的 *AVG*, *BIAS*, *RMSE*, R_{xy} ,

MAE 和 *MRE* 见表 2—表 7, 表 8 为 6 个探空气球的整体统计分析.

表 2 四种外尺度模式估算 1# 探空气球 $\log_{10}(C_n^2)$ 的统计分析

Table 2. Statistical analysis for estimation of $\log_{10}(C_n^2)$ by using four outer scale models for 1# balloon sounding.

Balloon number	Parameterization	<i>AVG</i>	<i>BIAS</i>	<i>RMSE</i>	R_{xy}	<i>MAE</i>	<i>MRE</i>
1#	Dewan	-16.658	0.872	1.335	0.664	1.067	6.093%
	HMNSP99	-17.045	0.485	0.856	0.650	0.671	3.819%
	Maoming	-17.396	0.134	0.625	0.719	0.480	2.736%
	Coulman	-17.183	0.347	0.890	0.585	0.721	4.112%

表3 同表2(2# 探空气球)

Table 3. Same as Table 2, but for 2# balloon sounding.

Balloon number	Parameterization	AVG	BIAS	RMSE	R_{xy}	MAE	MRE
2#	Dewan	-16.849	0.337	0.922	0.485	0.769	4.473%
	HMNSP99	-17.500	-0.314	0.845	0.615	0.642	3.732%
	Maoming	-17.174	0.012	0.610	0.624	0.499	2.901%
	Coulman	-17.721	-0.535	1.078	0.545	0.846	4.921%

表4 同表2(3# 探空气球)

Table 4. Same as Table 2, but for 3# balloon sounding.

Balloon number	Parameterization	AVG	BIAS	RMSE	R_{xy}	MAE	MRE
3#	Dewan	-16.541	0.721	1.237	0.451	1.002	5.804%
	HMNSP99	-16.669	0.593	0.873	0.620	0.724	4.195%
	Maoming	-16.949	0.313	0.680	0.694	0.566	3.277%
	Coulman	-17.087	0.175	0.826	0.511	0.662	3.838%

表5 同表2(4# 探空气球)

Table 5. Same as Table 2, but for 4# balloon sounding.

Balloon number	Parameterization	AVG	BIAS	RMSE	R_{xy}	MAE	MRE
4#	Dewan	-16.877	0.764	1.347	0.512	1.082	6.118%
	HMNSP99	-17.802	-0.161	0.762	0.728	0.593	3.360%
	Maoming	-17.210	0.431	0.671	0.804	0.571	3.236%
	Coulman	-17.182	0.459	0.911	0.584	0.804	4.559%

表6 同表2(5# 探空气球)

Table 6. Same as Table 2, but for 5# balloon sounding.

Balloon number	Parameterization	AVG	BIAS	RMSE	R_{xy}	MAE	MRE
5#	Dewan	-16.546	0.398	0.931	0.498	0.750	4.424%
	HMNSP99	-16.754	0.190	0.610	0.613	0.467	2.757%
	Maoming	-16.701	0.243	0.619	0.666	0.411	2.512%
	Coulman	-17.565	-0.621	1.156	0.463	0.894	5.277%

表7 同表2(6# 探空气球)

Table 7. Same as Table 2, but for 6# balloon sounding.

Balloon number	Parameterization	AVG	BIAS	RMSE	R_{xy}	MAE	MRE
6#	Dewan	-16.601	0.814	1.191	0.578	0.959	5.510%
	HMNSP99	-16.857	0.558	0.809	0.647	0.655	3.760%
	Maoming	-17.131	0.284	0.552	0.813	0.458	2.629%
	Coulman	-17.088	0.327	0.815	0.532	0.668	3.834%

表8 同表2(6个探空气球)
Table 8. Same as Table 2, but for all 6 balloon soundings.

Balloon number	Parameterization	AVG	BIAS	RMSE	R_{xy}	MAE	MRE
All 6	Dewan	-16.873	0.598	0.874	0.763	0.943	5.439%
	HMNSP99	-17.352	0.119	0.525	0.848	0.627	3.612%
	Maoming	-17.236	0.235	0.371	0.924	0.514	2.963%
	Coulman	-17.331	0.140	0.633	0.651	0.766	4.417%

1#—6#探空气球观测到的 $\log_{10}(C_n^2)$ 的平均值分别为-17.530, -17.186, -17.262, -17.641, -16.944和-17.415, 所有6个探空气球观测的 $\log_{10}(C_n^2)$ 的平均值为-17.471. 可以看到, Dewan模式的平均值最大, 除了表6所描述的5#探空气球, 对于其他的5个探空气球, 利用茂名外尺度经验公式估算得到的 $\log_{10}(C_n^2)$ 的BIAS, RMSE和 R_{xy} 都比另外三个外尺度模式更好. 对于5#探空气球, 虽然HMNSP99外尺度模式的BIAS和RMSE表现得更好, 但是茂名外尺度经验公式的相关系数要更好一些. 对于选取的这6个探空气球, 新拟合的外尺度公式估算的 $\log_{10}(C_n^2)$ 与实测值的相关系数都是最高的. 在表8中可以发现相同的情况, 采用新拟合的外尺度公式计算的 C_n^2 与实测值的整体相关系数达到了0.924. 同时可以发现, 四个模式的平均绝对误差绝大多数都小于1, 而平均相对误差基本上都小于5%, 其中用新拟合的茂名外尺度经验公式估算的 $\log_{10}(C_n^2)$ 的误差都是最小的. 从误差分析的角度来看, 该误差已能满足我们对估算精度的要求. 这样就从统计分析的角度验证了我们的结果, 进一步证明了模式估算结果是真实可靠的. 不仅表明四种外尺度模式都可以用来估算大气折射率结构常数, 还发现利用新拟合的茂名外尺度经验公式估算的效果最好.

6 结 论

用自行研发的探空仪对海边的高空光学湍流进行了连续的观测, 海边的高空光学湍流强度基本上分布在 10^{-14} — $10^{-20} \text{ m}^{-2/3}$ 之间, 均值为 $10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ 左右. 大气光学湍流通常在近地面最强, 然后随着高度呈指数递减. 在稳定的大气背景条件下, 对流层顶和低平流层附近常常会出现较强的湍流薄层, 这通常是强对流天气、冷暖空气交汇、

重力波等扰动源在温度分层和垂直风切变等不稳定条件下发展成湍流^[21]. 而海边高空的强对流和冷暖空气交汇等现象更加剧烈和明显, 从而促使湍流的发生.

根据海边的探空数据, 基于同时含有风切变量和温度梯度两个因子的HMNSP99外尺度模式和Hufnagel-Valley模式重新拟合各得到一个符合海边气候特征和湍流变化规律的外尺度模式和湍流廓线统计平均模式, 结合Tatarski高空湍流参数化方案, 将之用于估算海边高空湍流. 并将模式估算结果分别与实际观测值以及其他三种外尺度模式估算值进行对比. 研究发现, 风切变和温度梯度与高空湍流的发生关系密切, 新的外尺度和 C_n^2 模式能够较好地完成海边光学湍流预报工作. 利用新拟合的海边外尺度经验公式得到的折射率结构常数的平均绝对误差(MAE)和平均相对误差(MRE)分别为0.514和2.963%, 明显小于另外三种外尺度模式的估算误差, 其与观测值的相关度最高可以达到0.813, 最低的也有0.624, 且与实验观测值的整体相关系数高达0.902, 远高于Dewan模式的0.763, HMNSP99模式的0.848和Coulman模式的0.651.

重新拟合的符合海边气象变化规律的外尺度模式和高空湍流估算模式主要是根据本次实验和有限的探空资料提出来的. 需要长期经验的积累和大量实测数据的不断校正, 才能得到更加普适的, 具有一般规律的海边高空湍流参数化方案. 虽然模式估算值能够获得湍流强度的细节变化, 但是在捕捉高空湍流廓线的精细结构上还是稍有偏差. 可以引入更加合理的、包含其他可能促使湍流发生的因子的外尺度模式, 以及使用响应和采集频率更高的传感器, 获得更高分辨率的探空资料, 都有助于我们提高模式估算的精度.

参考文献

- [1] Song Z F 1990 *Applied Atmospheric Optics* (Beijing: China Meteorological Press) pp67–70 (in Chinese) [宋正方 1990 应用大气光学基础 (北京: 气象出版社) 第 67—70 页]
- [2] Hutt D L 1999 *Opt. Eng.* **38** 1288
- [3] Kunz G J, Moerman M M, Eijk A M J V, Dosshammel S M, Tsintikidis D 2004 *Proc. SPIE* **5237** 81
- [4] Fried D L 1966 *J. Opt. Soc. Am.* **56** 1380
- [5] Wyngaard J C, Izumi Y, Stuart A, Collins J R 1971 *J. Opt. Soc. Am.* **61** 1646
- [6] Hufnagel R E 1974 *Topical Meeting on Optical Propagation Through Turbulence* Boulder, Colorado, July 9–11, 1974 p2453
- [7] Beland R R, Brown J H 1988 *Phys. Scr.* **37** 419
- [8] Coulman C E, Vernin J, Coqueugniot Y, Caccia J L 1988 *Appl. Opt.* **27** 155
- [9] Dewan E M, Good R E, Beland R, Brown J 1993 *A Model for C_n^2 (Optical Turbulence) Profiles Using Radiosonde Data* (Phillips Laboratory, Hanscom AFB MA) Technical report No. PL-TR-93-2043
- [10] Vanzandt T E, Gage K S, Warnock J M 1981 *Twentieth Conference on Radar Meteorology* Boston, 1981 p129
- [11] Masciadri E, Vernin J, Bougeault P 1999 *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **137** 185
- [12] Sun G, Weng N Q, Xiao L M 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 183 (in Chinese) [孙刚, 翁宁泉, 肖黎明 2008 强激光与粒子束 **20** 183]
- [13] Qing C, Wu X Q, Li X B, Zhu W Y, Rao R Z, Mei H P 2015 *Chin. J. Lasers* **42** 0913001 (in Chinese) [青春, 吴晓庆, 李学彬, 朱文越, 饶瑞中, 梅海平 2015 中国激光 **42** 0913001]
- [14] Beland R R, Brown J H, Good R E, Murphy E A 1988 *Optical Turbulence Characterization of AMOS, 1985* (US Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB MA) Technical report No. AFGL-TR-88-0153
- [15] Miller M G, Zieske P L 1979 *Turbulence Environment Characterization* (Rome Air Development Center, Griffiss AFB NY) Technical report No. RADC-TR-79-131
- [16] Jams R R, Rockway J W, Stoots L B, Julian A J, Hanson D W 1981 *Submarine Laser Communications Evaluation Algorithm* (Naval Ocean Systems Center) Technical report No. NOSC-TR-673
- [17] Wu X Q, Ma C S, Yuan R M, Zeng Z Y, Wang Y J 2003 *Chin. J. Quantum Electron.* **20** 375 (in Chinese) [吴晓庆, 马成胜, 袁仁民, 曾宗泳, 王英俭 2003 量子电子学报 **20** 375]
- [18] Tatarski V I 1961 *Wave Propagation in A Turbulent Medium* (New York: McGraw-Hill) pp46–51
- [19] Ruggiero F H, Debenedictis D A 2002 *DOD High Performance Computer Users Group Conference* Austin, Texas, January 13–14, 2002 p11
- [20] Qing C, Wu X Q, Li X B, Huang H H, Cai J 2015 *High Power Laser and Particle Beams* **27** 061009 (in Chinese) [青春, 吴晓庆, 李学彬, 黄宏华, 蔡俊 2015 强激光与粒子束 **27** 061009]
- [21] Wu X Q, Qian X M, Huang H H, Wang P, Cui C L, Qing C 2014 *Acta Astronom. Sin.* **55** 144 (in Chinese) [吴晓庆, 钱仙妹, 黄宏华, 汪平, 崔朝龙, 青春 2014 天文学报 **55** 144]

A new model for the profiles of optical turbulence outer scale and C_n^2 on the coast*

Cai Jun¹⁾²⁾ Li Xue-Bin¹⁾ Zhan Guo-Wei³⁾ Wu Peng-Fei¹⁾ Xu Chun-Yan¹⁾²⁾
 Qing Chun¹⁾²⁾ Wu Xiao-Qing^{1)†}

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

2) (Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

3) (Maoming Meteorological Bureau of Guangdong Province, Maoming 525000, China)

(Received 8 June 2017; revised manuscript received 12 October 2017)

Abstract

Atmospheric optical turbulence severely restricts the performances of electro-optical systems. The turbulent atmosphere causes the intensity of a light beam to fluctuate or scintillate, leads the light beam to wander and makes the images randomly displace, which directly relates to the refractive index structure parameter C_n^2 . Therefore the knowledge of C_n^2 is essential to evaluate and to predict the effects of optical turbulence on electro-optical imagery systems. During the period from December 13, 2016 to January 2, 2017, 30 sets of sounding data, which include temperatures, humidities, pressures, wind speeds, wind directions and atmospheric refractive index structure parameters, are obtained by using a self-developed meteorological radiosonde for turbulence at Marine Meteorological Science Experiment Base at Bohe of Maoming. On the basis of the HMNSP99 outer scale model, an atmospheric optical turbulence outer scale formula of Maoming is obtained by fitting the sounding data. At the same time, the experimental data of the turbulence profiles are statistically averaged, and then based on the Hufnagel-Valley model, a statistical model is obtained, which is appropriate to the variation of the turbulence profile on the coast. According to Tatarski turbulence parameterization and the Maoming outer scale formula, the new estimated C_n^2 values are compared with their experimental observations and the results from other already defined models, respectively. Statistical analysis shows that the overall correlation coefficients of $\log_{10}(C_n^2)$ between observed values and estimated values by using the new fitting Maoming outer scale formula, the HMNSP99 model, the Dewan model and the Coulman model are 0.924, 0.848, 0.763 and 0.651, respectively. Also, both the trends and magnitudes for these four outer scale models are consistent with each other. The errors of the above four outer scale models are very small: their overall average absolute errors and average relative errors are 0.514 and 2.963%, 0.627 and 3.612%, 0.943 and 5.439%, 0.766 and 4.417%, respectively, and the error of the Maoming outer scale model is smallest. The reliabilities and validities of the new outer scale and C_n^2 models are further verified. In addition, it is found that the occurrence of upper air optical turbulence is closely related to wind shear and temperature gradient. The results support the prediction of the atmospheric optical turbulence profile required for electro-optical engineering on the coast.

Keywords: coast, turbulence profile, parameterization, outer scale

PACS: 42.68.-w, 42.68.Bz, 47.27.E-

DOI: 10.7498/aps.67.20171324

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41576185) and the Science and Technology Innovation Foundation of the Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. CXJJ).

† Corresponding author. E-mail: xqw@aiofm.ac.cn