

常规气象参数估算南极泰山站近地面大气光学湍流强度

吴晓庆 田启国 金鑫淼 姜鹏 青春 蔡俊 周宏岩

Estimating optical turbulence of atmospheric surface layer at Antarctic Taishan station from meteorological data

Wu Xiao-Qing Tian Qi-Guo Jin Xin-Miao Jiang Peng Qing Chun Cai Jun Zhou Hong-Yan

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 039201 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.039201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.039201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2017/V66/I3>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

随机平衡设计傅里叶振幅敏感性分析方法和拓展傅里叶振幅敏感性分析方法在陆面过程模式敏感性分析中的应用探索

[Applications of random balance design Fourier amplitude sensitivity test and extended Fourier amplitude sensitivity test in the parameter sensitivity analysis of land surface process model](#)

物理学报.2015, 64(6): 069201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.069201>

低太阳高度角条件下的天空偏振模式模拟及大气折射影响研究

[Atmospheric polarization pattern simulation for small solar elevation angles and the analysis of atmospheric effect](#)

物理学报.2016, 65(1): 014203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014203>

基于 Stokes 矢量的实时偏振差分水下成像研究

[Real-time polarization difference underwater imaging based on Stokes vector](#)

物理学报.2015, 64(22): 224203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224203>

大气湍流中部分相干光束上行和下行传输偏振特性的比较

[Comparison of polarization property of partially coherent beam between propagating along an uplink path and a downlink path in atmospheric turbulence](#)

物理学报.2015, 64(22): 224204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224204>

取向比对椭球气溶胶粒子散射特性的影响

[Influence of aspect ratio on the light scattering properties of spherical aerosol particles](#)

物理学报.2015, 64(22): 224205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224205>

# 常规气象参数估算南极泰山站近地面 大气光学湍流强度\*

吴晓庆<sup>1)†</sup> 田启国<sup>2)</sup> 金鑫淼<sup>2)</sup> 姜鹏<sup>2)</sup> 青春<sup>1)4)</sup> 蔡俊<sup>1)4)</sup> 周宏岩<sup>2)3)</sup>

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

2) (中国极地研究中心, 上海 200136)

3) (中国科学技术大学, 合肥 230026)

4) (中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 合肥 230031)

(2016年9月2日收到; 2016年10月9日收到修改稿)

选择最好的天文台址放置大口径望远镜一直是天文学家追求的目标. 天文台址的选择与近地面层湍流强度大小以及随高度递减的快慢密切相关. 与中纬度最好的天文台站相比, 南极大陆具有极低的红外天空背景辐射、极低的可降水含量、极低的气溶胶和尘埃颗粒物含量、非常小的光污染、晴天日数多, 无疑成为下一代大型光学/红外天文望远镜在地球上寻找地基站址的理想场所. 本文建立了光学湍流强度估算方法, 第一次对南极泰山站近地面大气光学湍流强度进行估算. 模式输入的气象参数是2013年12月30日至2014年2月10日移动式大气参数测量系统在南极泰山站测量的数据, 折射率结构常数  $C_n^2$  的估算结果与温度脉动仪实测的  $C_n^2$  进行了比较, 并对估算方法进行了敏感性分析. 测量结果和分析表明: 南极内陆近地面  $C_n^2$  具有明显的日变化特征, 夜晚  $C_n^2$  达  $2 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ , 比白天强, 日出和日落时刻附近出现最小值.  $C_n^2$  的模式估算和实验测量的比对表明了模式用来估算南极近地面  $C_n^2$  的可行性.  $C_n^2$  的模式估算和测量差异最大值往往出现在日出和日落时刻附近. 由于南极内陆大气大部分时间处于稳定状态, 选用不同的结构常数函数估算的  $C_n^2$  值差别不大, 0.5 m, 2.0 m 两高度温差测量精度是影响  $C_n^2$  估算值的主要因素.

**关键词:** 南极天文, 光学湍流, 估算方法, 敏感性分析

**PACS:** 92.60.hk, 92.60.Fm, 42.25.Dd

**DOI:** 10.7498/aps.66.039201

## 1 引言

地基天文观测受制于地球大气特性, 不同波段的天文观测有不同的影响因素. 影响地基光学天文望远镜性能的主要因素有: 天空背景、水汽含量、光学湍流等<sup>[1]</sup>. 地基光学望远镜的星像质量与大气光学湍流密切相关, 我们将折射率起伏主要是由温度起伏引起的湍流称为光学湍流, 量度这种折射率起伏强度的量为折射率结构常数  $C_n^2$ . 天空背景、水汽

含量和光学湍流与高度和温度有关. 较高的海拔高度、非常低的气温、十分稳定的大气条件都极大地降低了这些因素对地基望远镜的影响. 与地球上其他天文台站 (Mauna kea, Paranal, San Pedro Martir, Roque de los Muchachos) 相比<sup>[2]</sup>, 南极大陆具有极低的红外天空背景辐射、极低的可降水含量、极低的气溶胶和尘埃颗粒物含量、非常小的光污染、晴天日数多, 无疑成为下一代大型光学/红外天文望远镜在地球上寻找地基站址的理想场所. 目前, 近地面层  $C_n^2$  数据的获得主要有两种方法: 一是

\* 国家自然科学基金 (批准号: 41275020, 41576185, 11503023)、中国极地研究中心极地科学青年创新基金 (批准号: CX20130201)、上海市自然科学基金 (批准号: 14ZR1444100) 和中国极地环境综合考察与评估项目 (批准号: CHINARE-2013-02-02, CHINARE-2014-02-03) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xqwu@aiofm.ac.cn

用各种仪器进行测量, 即通过测量温度起伏、光强起伏、到达角起伏、雷达回波信号等, 在均匀各向同性湍流的假定下得到  $C_n^2$ . 在 20 世纪 90 年代中期, 澳大利亚新南威尔士大学和法国 Nice 大学采用塔载微温传感器 [3] 首次对 South Pole 的近地面湍流和湍流廓线进行了测量. 与此同时研制出主要配备声雷达和小型光学望远镜的无人值守的天文选址观测系统 AASTO (Automated Astrophysical Site Testing Observatory) [4] 和 AASTINO (Automated Astrophysical Site Testing International Observatory) [5], 分别对 South Pole 和 Dome C 进行系统观测. 2008 年, 我国科学家已在南极 Dome A 建立了包括声雷达、专业望远镜、气象塔等设备的天文观测站 PLATO (Plateau Observatory), 已收集了该地区宝贵的大气参数资料 [6,7]. 另一种是基于 Monin-Obukhov 相似理论, 建立大气边界层湍流模式, 通过测量常规气象参数来估算  $C_n^2$  [8,9]. 本文分析了移动式大气参数测量系统在泰山站测量的湍流数据, 建立了光学湍流强度估算方法, 首次对南极泰山站近地面大气光学湍流强度进行估算. 模式输入的气象参数分别来自 2013 年 12 月 30 日至 2014 年 2 月 10 日移动式大气参数测量系统在南极泰山站测量的气象数据. 将  $C_n^2$  的估算结果与温度脉动仪实测的  $C_n^2$  进行了比较, 并对估算方法进行了敏感性分析.

## 2 常规气象参数估算近地面光学湍流强度方法

折射率结构常数  $C_n^2$  与温度、湿度以及温湿相关项的结构常数之间的关系为 [10]

$$C_n^2 = \frac{A_T^2}{T^2} C_T^2 + \frac{A_q^2}{q^2} C_q^2 + 2 \frac{A_T A_q}{Tq} C_{Tq}, \quad (1)$$

其中  $T$  是气温,  $q$  是绝对湿度; 系数  $A_T, A_q$  是与波长、气温、气压、绝对湿度有关的常数;  $C_T^2, C_q^2, C_{Tq}$  分别是温度结构常数、湿度结构常数和温湿相关项结构常数.

取  $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ , (1) 式可表示为

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

其中  $A = 79.0 \times 10^{-6} P/T^2$ ,  $B = -56.4 \times 10^{-6}$ .

根据相似理论, 各结构常数 ( $C_T^2, C_q^2, C_{Tq}$ ) 与高度 ( $z$ ) 以及各特征尺度 ( $t_*, q_*$ ) 的组合可表示成

稳定度参数 ( $z/L$ ) 的无量纲结构常数函数 ( $f_T, f_q, f_{Tq}$ ) [11],

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

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

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

温湿度相关系数  $r_{Tq} = \frac{C_{Tq}}{\sqrt{C_T^2 C_q^2}}$ , 其取值 0.6—1.0 之间.

无量纲结构常数函数  $f_T, f_q, f_{Tq}$  由实验确定. 文献中有许多这一函数的不同表达方式, 最具代表性的是 Wyngaard 结构常数函数 [12],

$$f_T(z/L) = \begin{cases} 4.9[1 - 7(z/L)]^{-2/3}, & z/L < 0, \\ 4.9[1 + 2.4(z/L)^{2/3}], & z/L > 0. \end{cases} \quad (4)$$

作为对比, Bataille 结构常数函数为 [13]

$$f_T(z/L) = \begin{cases} 6.3[1 - 7(z/L) + 75(z/L)^2]^{-1/3}, & z/L \leq 0, \\ 6.3[1 + 2.4(z/L) + 20(z/L)^2]^{1/3}, & z/L > 0. \end{cases} \quad (5)$$

图 1 是两种无量纲结构常数函数随稳定度参数变化的比较. 尽管两者差别不十分明显, 但选用不同的结构常数函数对估算  $C_n^2$  会产生较大影响.

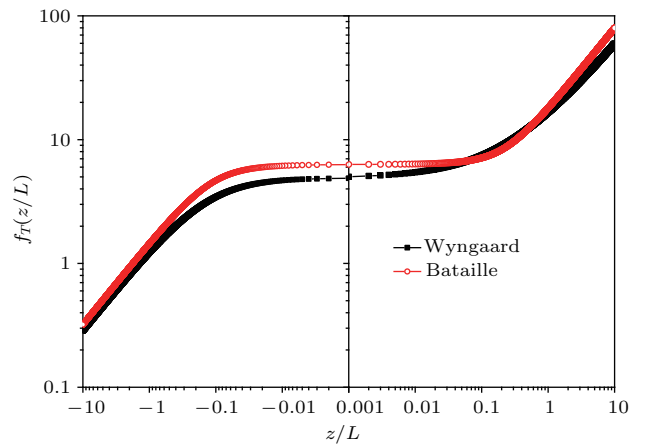


图 1 (网刊彩色) 无量纲结构常数函数

Fig. 1. (color online) The nondimensional structure parameter function.

(3) 式的特征尺度  $u_*, t_*, q_*$  以及 Obukhov 长度  $L$  都与两层气象参数有关.

$$u_* = \frac{k\Delta u}{\Psi_u \Delta \ln z}, \quad (6a)$$

$$t_* = \frac{k\Delta T}{\Psi_H \Delta \ln z}, \quad (6b)$$

$$q_* = \frac{k\Delta q}{\Psi_q \Delta \ln z}, \quad (6c)$$

$$L = \frac{T(1 + 0.61q)(\Delta V)^2 \Psi_H}{\Delta \ln z \times g(\Delta T + 0.61T\Delta q)\Psi_u^2}, \quad (6d)$$

其中,  $\Delta u = u(z_1) - u(z_2)$ ;  $\Delta T = T(z_1) - T(z_2)$ ;  $\Delta q = q(z_1) - q(z_2)$ ;  $\Psi_u, \Psi_H, \Psi_q$  分别是无量纲积分函数, 由实验确定. 采用 Dyer 和 Hicks 经验公式<sup>[14,15]</sup>: 当  $z/L < 0$  时,

$$\Psi_u = [1 - 15(z/L)]^{-1/4}, \quad (7a)$$

$$\Psi_H = [1 - 15(z/L)]^{-1/2}; \quad (7b)$$

当  $z/L > 0$  时,

$$\Psi_u = \Psi_H = 1 + 5(z/L). \quad (7c)$$

通常情况认为  $f_T(z/L) = f_{Tq}(z/L) = f_q(z/L)$ , 这样将 (3) 和 (6) 式代入 (2) 式,

$$C_n^2 = \frac{f_T(z/L)k^2[A^2(\Delta T)^2 + 2ABr_{Tq}\Delta T\Delta q + B^2(\Delta q)^2]}{z^{2/3}[\ln(z_2/z_1) - \Psi_H(z/L)]}. \quad (8)$$

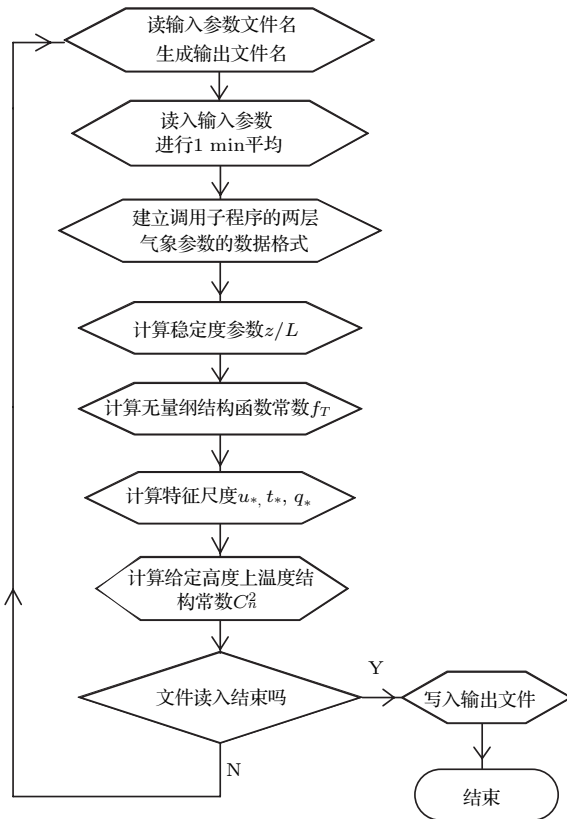


图2 模式的算法流程图

Fig. 2. The algorithm flowchart of model.

具体的算法流程图如图2所示.

### 3 模式输入的气象参数和 $C_n^2$ 估算结果

泰山站位于中国南极中山站与昆仑站之间的伊丽莎白公主地, 东经  $76^\circ 58'$ , 南纬  $73^\circ 51'$ , 海拔高度 2621 m. 移动式大气参数测量系统由 CR5000 数据采集器、CSAT3 三维超声风速计、温度脉动仪、温湿压风速风向传感器以及 485 输模块、电源模块和 3 m 高支架等组成. 测量两层气温、相对湿度、风速, 以及气压、地表面辐射温度、大气光学湍流强度  $C_n^2$  等多种大气参数. 该系统已随中国第 30 次南极科考队安装在南极建成的新站泰山站<sup>[16-18]</sup>, 用于南极天文选址. 本文分析的数据是 2013 年 12 月 30 日系统安装完成开始观测至 2014 年 2 月 10 日科考人员带回的部分数据. 在 43 天中选取 1 月 28 日至 31 日测量的常规气象参数作为代表, 进行  $C_n^2$  的估算, 并与温度脉动仪测量的  $C_n^2$  进行比对.

模式输入的气象参数主要是两层温度、湿度和风速. 首先对两高度上 ( $z_1 = 0.5$  m,  $z_2 = 2.0$  m) 的测量数据进行 1 min 的滑动平均. 将相对湿度换算成绝对湿度  $q$  ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 分别计算出两高度层常规气象参数的平均值差值,  $\Delta u = u(z_1) - u(z_2)$ ,  $\Delta T = T(z_1) - T(z_2)$ ,  $\Delta q = q(z_1) - q(z_2)$ . 由 (6d) 式计算出 Monin-Obukhov 长度  $L$ , 代入 (8) 式计算出  $C_n^2$ .

图3是2014年1月28日至31日南极泰山站  $C_n^2$  模式估算和测量值、两高度温差、两高度气温、两高度风速差、两高度风速随时间的变化, 反映出  $C_n^2$  的日变化规律, 以及与常规气象参数的相关性. 可看出如下特点: 1) 两种结构常数函数估算的  $C_n^2$  与温度脉动仪测量的  $C_n^2$  在量级和变化趋势上基本一致; 2) 在日出后和日落前半小时到一小时附近  $C_n^2$  出现最小, 模式估算和温度脉动仪现场测量都能反映这一特征, 其最小时刻与两高度温差为零的时刻相符合; 3)  $C_n^2$  与两高度上的温差  $\Delta T$  的相关性十分明显,  $C_n^2$  大小与  $\Delta T$  绝对值呈正相关, 夜晚 ( $\Delta T < 0$ , 大气稳定)  $C_n^2$  通常大于白天 ( $\Delta T > 0$ , 大气不稳定)  $C_n^2$ ; 4)  $C_n^2$  与两高度上的风速差  $\Delta V$  没有明显的相关性.

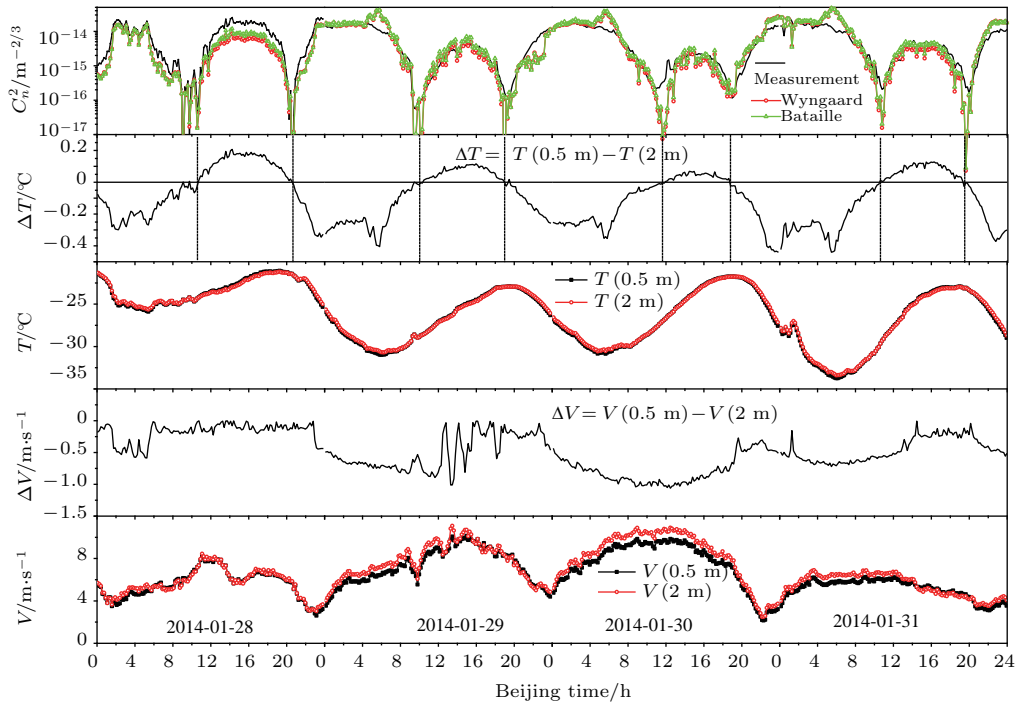


图3 (网刊彩色) 从上至下为2014年1月28日至31日南极泰山站  $C_n^2$  模式估算和测量值、两高度温差、两高度气温、两高度风速差、两高度风速随时间的变化

Fig. 3. (color online) From top to bottom,  $C_n^2$  obtained from the model and measurement, temperature difference, air temperature, wind speed difference, wind speed versus time over Taishan from 28 to 31 January 2014 in Antarctic.

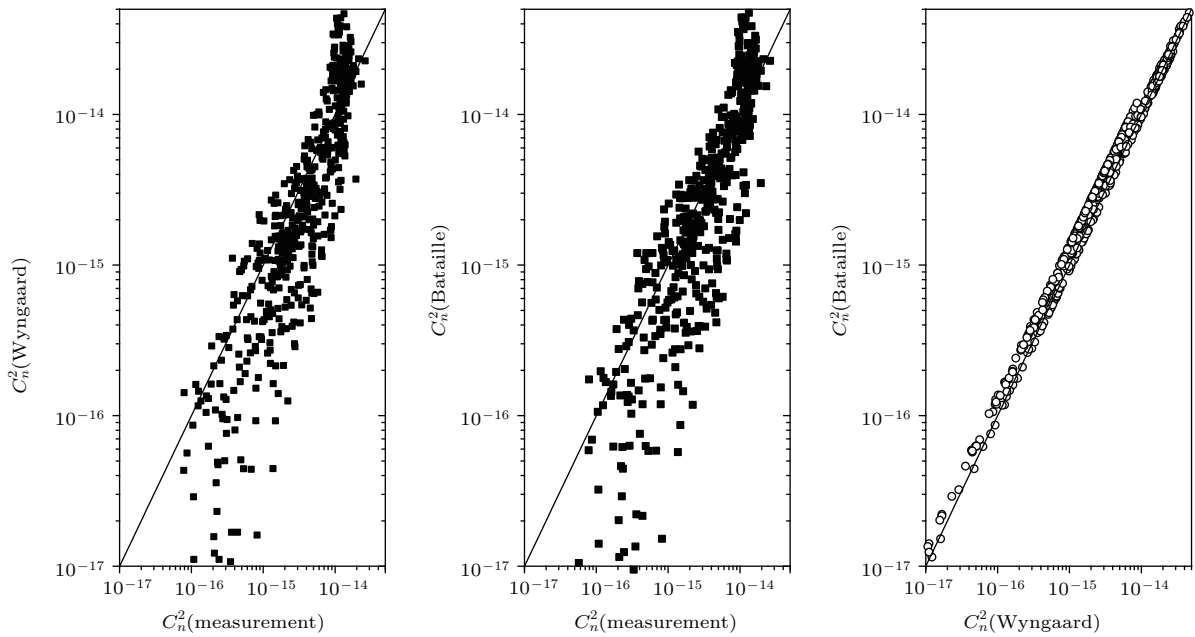


图4 模式估算与温度脉动仪测量的  $C_n^2$  的比较

Fig. 4. Comparison of  $C_n^2$  values estimated by model and measured by micro-thermometer.

表1是2014年1月28日至31日模式估算  $C_n^2$  的相对误差. 通常出现  $C_n^2$  最小值时刻点附近相对误差较大. 另一现象是连续几天在6点附近, 两高度的温差  $\Delta T$  重复出现一个向下鼓包, 对应的模式估算  $C_n^2$  有一个峰值, 而现场测量的  $C_n^2$  没有反映

这一现象, 因此该时段模式估算  $C_n^2$  的相对误差较大. 平均相对误差不到50%, 如果扣除上述因素, 模式估算  $C_n^2$  值平均相对误差在37%左右. 此外采用哪种结构常数函数估算  $C_n^2$ , 仅从图表看差别并不明显, 需要进行输入参数的敏感性分析.

表1 模式估算  $C_n^2$  值的相对误差  
Table 1. Relative error of  $C_n^2$  estimated by models.

Beijing Time/h	Wyngaard				Bataille			
	$[C_n^2(\text{model}) - C_n^2(\text{measure})]/C_n^2(\text{measure})$				$[C_n^2(\text{model}) - C_n^2(\text{measure})]/C_n^2(\text{measure})$			
	28	29	30	31	28	29	30	31
1	-0.732	0.131	0.065	-0.134	-0.748	0.150	0.117	-0.134
2	0.034	0.186	0.055	0.139	0.020	0.241	0.127	0.144
3	-0.027	0.044	0.114	0.067	-0.033	0.101	0.195	0.107
4	-0.114	0.060	0.109	0.224	-0.063	0.127	0.212	0.284
5	0.068	0.567	0.511	0.826	0.110	0.656	0.655	0.880
6	-0.827	1.765	1.834	2.634	-0.838	1.888	2.128	2.751
7	-0.863	0.108	-0.033	0.521	-0.871	0.250	0.130	0.626
8	-0.853	-0.179	-0.449	0.005	-0.863	-0.033	-0.339	0.131
9	-0.998	-0.359	-0.424	-0.276	-0.998	-0.227	-0.295	-0.157
10	-0.782	-0.178	0.218	-0.115	-0.779	0.010	0.502	0.025
11	-0.732	0.114	-0.495	-0.838	-0.635	0.438	-0.370	-0.791
12	-0.537	0.558	-0.962	0.059	-0.370	1.020	-0.951	0.392
13	-0.476	0.085	-0.508	-0.055	-0.288	0.450	-0.365	0.261
14	-0.401	-0.397	0.103	-0.363	-0.185	-0.181	0.431	-0.129
15	-0.456	0.406	0.150	-0.232	-0.260	0.873	0.488	0.045
16	-0.432	-0.259	-0.228	-0.173	-0.227	0.008	0.000	0.124
17	-0.309	-0.202	-0.678	-0.315	-0.061	0.089	-0.584	-0.069
18	-0.488	0.323	-0.607	-0.493	-0.305	0.786	-0.492	-0.317
19	-0.662	-1.000	0.400	-0.580	-0.540	-1.000	0.713	-0.430
20	-0.888	-0.623	0.941	-0.167	-0.847	-0.623	1.198	-0.111
21	-0.824	-0.230	0.179	0.953	-0.833	-0.267	0.231	0.966
22	-0.774	-0.717	-0.043	0.783	-0.788	-0.736	-0.105	0.716
23	-0.325	-0.798	0.810	0.667	-0.373	-0.810	0.716	0.590

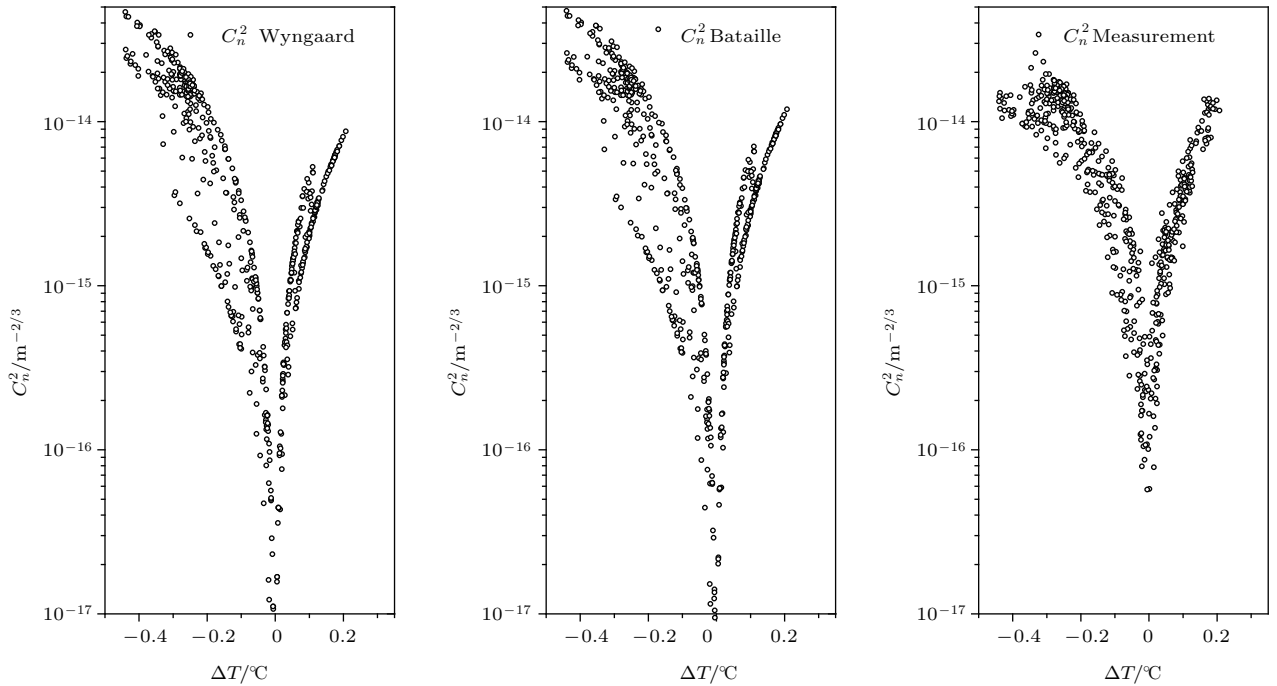


图5 模式估算和测量的  $C_n^2$  随两高度温差的变化

Fig. 5.  $C_n^2$  values estimated by model and measured by micro-thermometer versus air temperature difference from one height to another.

图 4 是  $C_n^2$  估算值与测量值, 以及  $C_n^2$  估算值之间的比较. 在  $1 \times 10^{-15} - 1 \times 10^{-14}$  范围, 模式估算值与实测值符合较好. 弱湍流时模式值小于实测值, 强湍流时模式值大于实测值. 图 5 是  $C_n^2$  估算值与测量值随两高度温差的变化. 无论是  $\Delta T > 0$  时大气处于不稳定状态下的白天, 还是  $\Delta T < 0$  时大气处于稳定状态下的夜晚,  $C_n^2$  大小与  $\Delta T$  绝对值呈正相关, 且夜晚  $|\Delta T|$  大于白天.

表 2 是泰山站近地面层  $C_n^2$  与其他站的  $C_n^2$  比较. 其他站的近地面层  $C_n^2$  值是根据文献 [3, 19] 提供的近地面层视宁度值由 (9) 式推算得到. 其中泰山站的  $C_n^2$  是由 43 天的测量数据平均得到的.

$$\varepsilon = 5.25\lambda^{-1/5} \left( \int_0^\infty C_n^2(h) dh \right)^{3/5}. \quad (9)$$

表 2 泰山站近地面层  $C_n^2$  与其他站的  $C_n^2$  比较

Table 2. Comparison of surface layer  $C_n^2$  values between Taishan station and other sites.

Site	Height range/m	$\varepsilon$ (mean) /arcsec	$C_n^2$ (mean) / $m^{-2/3}$
South Pole	7—17	0.46	$2.0 \times 10^{-14}$
La Palma	6—12	0.07	$1.4 \times 10^{-15}$
Devasthal	6—12	1.28	$1.8 \times 10^{-13}$
Taishan	2	—	$5.1 \times 10^{-15}$

#### 4 光学湍流模式的敏感性分析

为方便起见, 仅考虑近红外和可见光波段情况. 在该波段内, 折射率起伏主要是由于温度起伏

引起的. 这样估算  $C_n^2$  的敏感性分析简化为估算  $C_T^2$  的敏感性分析.

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

$C_T^2$  是高度  $z$ 、特征温度  $t_*$ 、稳定度参数  $\zeta$  ( $\zeta = z/L$ ) 的函数, 而  $\zeta$  又是  $z, t_*, u_*$  的函数.

$$dC_T^2 = \frac{\partial C_T^2}{\partial z} dz + \frac{\partial C_T^2}{\partial \zeta} d\zeta + \frac{\partial C_T^2}{\partial t_*} dt_*, \quad (11)$$

$$d\zeta = \frac{\partial \zeta}{\partial z} dz + \frac{\partial \zeta}{\partial u_*} du_* + \frac{\partial \zeta}{\partial t_*} dt_*. \quad (12)$$

将 (12) 式代入 (11) 式, 得

$$\begin{aligned} \frac{dC_T^2}{C_T^2} = & \frac{z}{C_T^2} \left( \frac{\partial C_T^2}{\partial z} + \frac{\partial C_T^2}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right) \frac{dz}{z} \\ & + \frac{u_*}{C_T^2} \left( \frac{\partial C_T^2}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial u_*} \right) \frac{du_*}{u_*} \\ & + \frac{t_*}{C_T^2} \left( \frac{\partial C_T^2}{\partial t_*} + \frac{\partial C_T^2}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial t_*} \right) \frac{dt_*}{t_*}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{dC_T^2}{C_T^2} = S_z \frac{dz}{z} + S_{u_*} \frac{du_*}{u_*} + S_{t_*} \frac{dt_*}{t_*}, \quad (14)$$

其中,  $S_z, S_{u_*}$  和  $S_{t_*}$  分别是相应输入参数的敏感性系数, 它们都是稳定度参数  $\zeta$  的函数, 与无量纲结构常数函数  $f_T$  选取有关; 无量纲函数  $f_T$  由实验确定. 将 (4) 式和 (5) 式分别代入 (13) 式, 得到表 3 所列的各敏感性系数.

结合 (6) 式, (14) 式为

$$\begin{aligned} \frac{dC_T^2}{C_T^2} = & S_z \frac{d(z_1 - z_2)}{z} + S_{u_*} \frac{d(u_1 - u_2)}{u_1 - u_2} \\ & + S_{t_*} \frac{d(T_1 - T_2)}{T_1 - T_2}. \end{aligned} \quad (15)$$

表 3 敏感性系数  $S_z, S_{u_*}$  和  $S_{t_*}$

Table 3. The sensitivity coefficients  $S_z, S_{u_*}$  和  $S_{t_*}$ .

	Wyngaard	Bataille
$S_z$	$\begin{cases} -\frac{2}{3} \frac{1-14\zeta}{1-7\zeta} & (\zeta < 0) \\ -\frac{2}{3} \frac{1}{1+2.4\zeta^{2/3}} & (\zeta > 0) \end{cases}$	$\begin{cases} -\frac{1}{3} \left[ 2 + \frac{(-7+150\zeta)\zeta}{1-7\zeta+75\zeta^2} \right] & (\zeta < 0) \\ -\frac{1}{3} \left[ 2 - \frac{(7+40\zeta)\zeta}{1+7\zeta+20\zeta^2} \right] & (\zeta > 0) \end{cases}$
$S_{u_*}$	$\begin{cases} -\frac{2}{3} \frac{14\zeta}{1-7\zeta} & (\zeta < 0) \\ -\frac{2}{3} \frac{4.8\zeta^{2/3}}{1+2.4\zeta^{2/3}} & (\zeta > 0) \end{cases}$	$\begin{cases} -\frac{2}{3} \frac{14\zeta}{1-7\zeta} & (\zeta < 0) \\ -\frac{2}{3} \frac{4.8\zeta^{2/3}}{1+2.4\zeta^{2/3}} & (\zeta > 0) \end{cases}$
$S_{t_*}$	$\begin{cases} 2 + \frac{2}{3} \frac{7\zeta}{1-7\zeta} & (\zeta < 0) \\ 2 + \frac{2}{3} \frac{2.4\zeta^{2/3}}{1+2.4\zeta^{2/3}} & (\zeta > 0) \end{cases}$	$\begin{cases} 2 - \frac{1}{3} \frac{(7-150\zeta)\zeta}{(1-7\zeta+75\zeta^2)} & (\zeta < 0) \\ 2 + \frac{1}{3} \frac{(7+40\zeta)\zeta}{(1+7\zeta+20\zeta^2)} & (\zeta > 0) \end{cases}$

图6为由Wyngaard公式和Bataille公式计算的敏感性系数. 一般来说, 若敏感性系数 $S$ 很大(不管是正还是负), 它将使输入参数的测量误差放大, 导致 $C_T^2$ 的估算值有很大的不确定性. 若敏感性系数 $S$ 为零, 则估算值与输入参数的测量误差无关. 换句话说, 输入参数与估算值没有多大关系. 因此, 理想的敏感性系数应接近1或-1. 从图6可看出, 相比较而言, 两高度温差的测量误差导致的对 $C_T^2$ 估算值不确定性贡献最大, 在大气稳定条件下高度参数对估算结果不敏感. 两种公式计算的敏感性系数 $S_z, S_{u_*}$ 几乎相同, 在 $z/L > 0$ 的大气稳定条件下,

两种公式 $S_{t_*}$ 也几乎相同, 只是在 $z/L < 0$ 的大气不稳定条件下, 两种公式计算的 $S_{t_*}$ 才有所差别.

在两层高度、气温、风速相对误差分别为5%, 20%, 20%的条件下,

$$\begin{aligned} \frac{d(z_1 - z_2)}{z_1 - z_2} &= 5\%, \\ \frac{d(u_1 - u_2)}{u_1 - u_2} &= 20\%, \\ \frac{d(T_1 - T_2)}{T_1 - T_2} &= 20\%, \end{aligned}$$

由(15)式计算的模式估算不确定度的理论分析结果见图7.

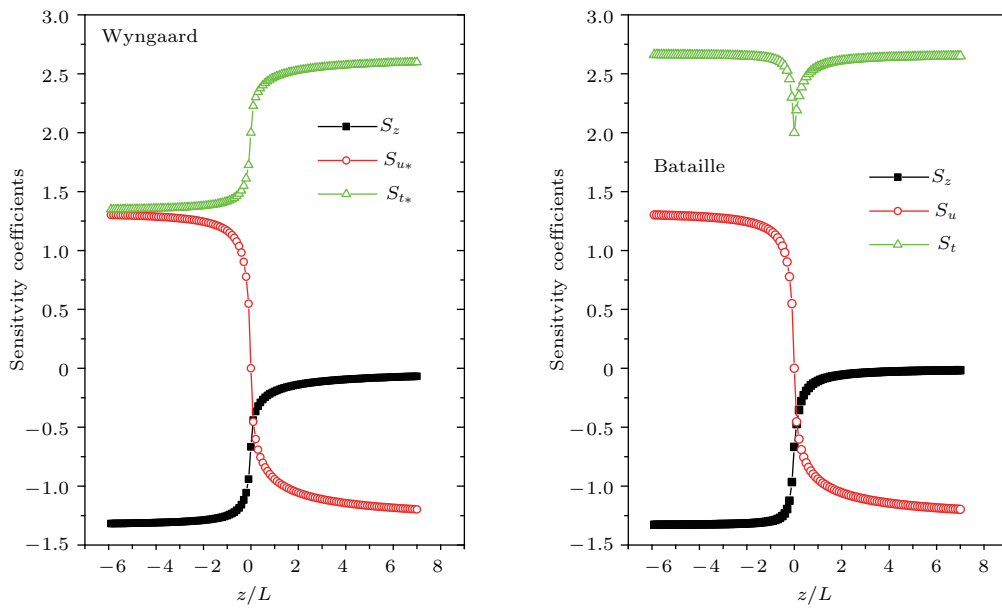


图6 (网刊彩色) 利用Wyngaard公式和Bataille公式计算得到的敏感性系数( $S_z, S_{u_*}$ 和 $S_{t_*}$ )

Fig. 6. (color online) The sensitivity coefficients  $S_z, S_{u_*}$  and  $S_{t_*}$  from nondimensional structure parameter function according to Wyngaard and Bataille equations.

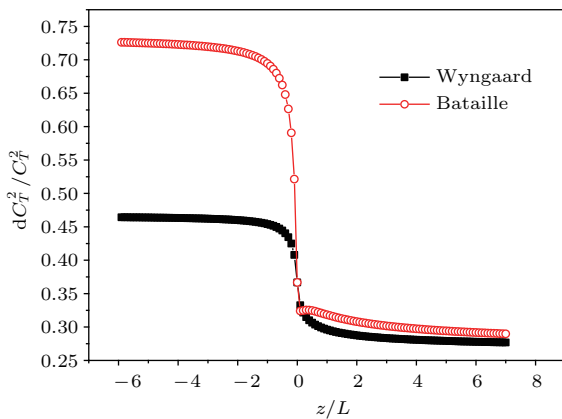


图7 (网刊彩色) 不同大气稳定度下模式估算不确定度  
Fig. 7. (color online) The uncertainty of  $C_T^2$  estimated by model under different stability parameters.

当模式输入参数测量误差确定(两层高度、气温、风速相对误差分别为5%, 20%, 20%)时, 在大气稳定条件下, 两种相似性函数不确定度相当, 均在30%左右; 在大气不稳定条件下, 选用Wyngaard无量纲结构常数函数估算 $C_T^2$ 的不确定度约47%, 而Bataille公式估算 $C_T^2$ 的不确定度不超过75%.

## 5 讨论与结论

在晴朗的天气情况下, 由于受太阳辐射、地面摩擦等因素的影响, 造成了近地面大气风速和温度在垂直方向上的不均匀分布, 在一定条件下形成了近地面湍流. 辐射过程最显著的特点是日变化, 因



此近地面湍流则以日变化为主要特征. 对陆地而言, 白天由于太阳辐射, 地表温度高于气温, 热量向上传递, 近地面大气层结不稳定, 湍流充分发展, 湍流很强, 中午可达最大值. 夜间由于辐射冷却, 地表温度低于气温, 热量通向下传递, 近地面大气层结稳定, 湍流不易发展, 因而平均湍流强度相对较低. 但下垫面为冰雪的南极内陆地区, 由于海拔高、空气稀薄、高纬度、冰雪表面对太阳辐射的反射等因素, 使得白天地表太阳辐射增温强度低于夜晚辐射冷却降温强度, 与陆地相反近地面层 0.5 m, 2.0 m 两高度气温差强度夜晚强于白天, 表现出夜晚湍流强度大于白天湍流强度. 当然, 下垫面无论是陆地或是冰雪, 在日出后一小时、日落前一小时左右, 太阳辐射和地表辐射逐渐平衡, 地温和气温趋于一致, 大气层结处于中性, 对湍流的产生和发展没有影响, 绝大多数情况下湍流是一天中最弱的. 本文建立的光学湍流强度方法, 准确反映了南极泰山站近地面光学湍流日变化特征.

模式输入数据中最敏感性参数是气温差, 气温差值的大小决定了湍流强弱.  $C_n^2$  的模式估算和测量差异最大值往往出现在大气层结处于中性状态. 模式算法认为, 当气温差值为零时,  $C_n^2$  的估算值非常小. 而实际情况考虑到测量仪器的噪声, 以及影响湍流的其他因素在模式中没有反映出来, 因此在中性状态下测量的  $C_n^2$  不一定非常小. 针对这种差异, 一方面在模式满足普适性和方便使用的前提下尽可能完善模式. 另一方面, 由于弱湍流对光电系统影响很小, 这种  $C_n^2$  的模式估算和测量差异在一定程度上也可以忍受.

在确定的模式输入参数测量误差下, 选用不同的结构常数函数对估算  $C_n^2$  的不确定度会产生很大影响, 由于南极内陆大气大部分时间处于稳定状态, 选用不同的结构常数函数估算的  $C_n^2$  值差别不大, 0.5 m, 2.0 m 两高度温差测量精度是影响  $C_n^2$  估算值的主要因素.

目前中纬度最好的天文台站整层视宁度为 0.5—1 arcsec<sup>[2]</sup>. 泰山站近地面层 2 m 高  $C_n^2$  平均值为  $5.1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ , 比 Devasthal 站和 South Pole 要弱, 比 La Palma 略强. 如果考虑  $C_n^2$  随高度的递减关系, 泰山站在 6—12 m 高度内的  $C_n^2$  值应

该与 La Palma 相当. 当然泰山站能否作为优良的天文台址, 除需要考虑近地面层  $C_n^2$  是否主要集中在几十米高的范围内, 还要对其他因素进行综合评估.

## 参考文献

- [1] Hou J L 1994 *Prog. Astron.* **12** 127 (in Chinese) [侯金良 1994 天文学进展 **12** 127]
- [2] Lawrence J S, Ashley M C B, Tokovinin A, Travouillon T 2004 *Nature* **431** 278
- [3] Marks R D, Vernin J, Azouit M, Briggs J W, Burton M G, Ashley M C B, Manigault J F 1996 *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **118** 385
- [4] Storey J W V, Ashley M C B, Burton M G 1996 *PASA* **13** 35
- [5] Lawrence J S, Ashley M C, Burton M G, Storey J W 2003 *Astronomy in Antarctica, 25th Meeting of the IAU Sydney, Australia, 18 July, 2003* p2
- [6] Yuan X Y, Cui X Q, Gong X F, Wang D, Yao Z Q, Li X N, Wen H K, Zhang Y J, Zhang R, Xu L Z, Zhou F, Wang L F, Shang Z H, Feng L L 2010 *Proc. SPIE* **7733** 77331
- [7] Liu G R, Yuan X Y 2009 *Acta Astronom. Sin.* **50** 224 (in Chinese) [刘根荣, 袁祥岩 2009 天文学报 **50** 224]
- [8] Andreas E L 1988 *J. Opt. Soc. Am. A* **5** 481
- [9] Wu X Q, Zhu X T, Huang H H, Hu S X 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 0701004 (in Chinese) [吴晓庆, 朱行听, 黄宏华, 胡顺星 2012 光学学报 **32** 0701004]
- [10] Hill R J 1978 *Radio Sci.* **13** 953
- [11] Fairall C W, Larsen S E 1986 *Bound.-Layer Meteor.* **34** 287
- [12] Haugen D A 1973 *On Surface Layer Turbulence, Workshop on Micrometeorology* (Boston: American Meteorological Society) pp101–149
- [13] Bataille P 1992 *Analyse du Comportement d'un Systeme de Télécommunications Optique fonctionnant a 0,83 μm Dans la Basse Atmosphere* (Rennes: Université de Rennes1)
- [14] Dyer A J 1974 *Bound.-Layer Meteor.* **7** 363
- [15] Hicks B B 1976 *Q. J. R. Meteor. Soc.* **102** 535
- [16] Tian Q G, Chai B, Wu X Q, Jiang P, Ji T, Jin X M, Zhou H Y 2015 *Polar Sci.* **27** 125 (in Chinese) [田启国, 柴博, 吴晓庆, 姜鹏, 纪拓, 金鑫淼, 周宏岩 2015 极地研究 **27** 125]
- [17] Tian Q G, Chai B, Wu X Q, Jiang P, Ji T, Jin X M, Zhou H Y 2015 *Chin. J. Polar Res.* **26** 140
- [18] Wu X Q, Tian Q G, Jiang P, Chai B, Qing C, Cai J, Jin X M, Zhou H Y 2015 *Adv. Polar Sci.* **26** 305
- [19] Pant P, Stalin C S, Sagar R 1998 *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **136** 19

# Estimating optical turbulence of atmospheric surface layer at Antarctic Taishan station from meteorological data\*

Wu Xiao-Qing<sup>1)†</sup> Tian Qi-Guo<sup>2)</sup> Jin Xin-Miao<sup>2)</sup> Jiang Peng<sup>2)</sup> Qing Chun<sup>1)4)</sup>  
Cai Jun<sup>1)4)</sup> Zhou Hong-Yan<sup>2)3)</sup>

1) (*Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Chinese Academy of Science, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China*)

2) (*Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China*)

3) (*University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

4) (*Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China*)

( Received 2 September 2016; revised manuscript received 9 October 2016 )

## Abstract

Turbulence intensity in the near-surface layer and its decrease rate with height are closely related to the quality of potential sites. Astronomers have been pursuing a perfect astronomical site to place the large-aperture telescopes. Compared with the best mid-latitude sites, Antarctic plateau inevitably becomes an ideal site for building the next-generation large optical and infrared telescopes, which is because of its low infrared sky emission, low atmospheric precipitable water vapour content, low aerosol and dust content of the atmosphere, and light pollution. In this paper, we establish a model of the atmospheric optical turbulence in surface layer, and use it to estimate  $C_n^2$  at Antarctic Taishan station for the first time. The meteorological parameters of the model input are the data measured by a mobile atmospheric parameter measurement system at Antarctic Taishan station from 30 December 2013 to 10 February 2014. The values of  $C_n^2$ , estimated by the model and measured by a micro-thermometer, are compared. Sensitivity analysis of the estimation method is also carried out. The measurement results and analyses show that  $C_n^2$  obtained at Taishan station has obvious diurnal variation characteristics, with well-behaved peaks in the daytime and nighttime, and minima near sunrise and sunset.  $C_n^2$  obtained in the nighttime is stronger than that in daytime, more specifically, it is on the order of  $2 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ . The comparison between model predictions and experimental data demonstrates that it is feasible to estimate  $C_n^2$  in Antarctic by using this model. The biggest differences between  $C_n^2$  values obtained from the model and measurement usually emerge at sunrise and sunset, respectively. Considering the fact that Antarctic atmosphere is in a stable state most of the time, the values of  $C_n^2$  estimated by different nondimensional structure parameter functions are nearly the same. Thus, the measurement accuracy of air temperature difference from one height to another is the main factor that affects the estimated value of  $C_n^2$ .

**Keywords:** Antarctic astronomy, optical turbulence, estimating method, sensitivity analysis

**PACS:** 92.60.hk, 92.60.Fm, 42.25.Dd

**DOI:** 10.7498/aps.66.039201

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41275020, 41576185, 11503023), the Polar Science Innovation Fund for Young Scientists of Polar Research Institute of China (Grant No. CX20130201), the Shanghai Natural Science Foundation, China (Grant No. 14ZR1444100), and the Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation and Assessment Programs (Grant Nos. CHINARE-2013-02-02, CHINARE-2014-02-03).

† Corresponding author. E-mail: [xqwu@aiofm.ac.cn](mailto:xqwu@aiofm.ac.cn)