

低平流层下温度结构常数和温度起伏谱幂率廓线的探空测量

吴晓庆¹ 黄宏华¹ 钱仙妹¹ 汪平^{1,2} 崔朝龙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成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 两个不同空间距离上($r_1=0.5\text{ m}$, $r_2=1\text{ m}$)温度结构常数廓线 $C_T^2(h)$ 和温度起伏谱幂率廓线 $\alpha(h)$ 由探空仪获得。研制的湍流气象探空仪具有两个微温测量通道,可根据研究内容进行多种组合。除测量温度、湿度、压强、风速、风向、折射率结构常数 C_n^2 廓线、Fried 参数 r_0 、视宁度 ϵ_{FWHM} 、等晕角 θ_0 和相干时间 τ_0 等积分计算值外,还可得到高空湍流谱幂率廓线数据。谱幂率测量结果与 Zilberman 三层谱模式相比,在对流层顶以上有较大区别。这些结果对光传输、光通信、遥感和大气湍流建模等应用领域研究具有十分重要的意义。

关键词 大气光学;光学湍流;谱幂率廓线;探空

中图分类号 P412.23; P425.2+2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0501001

Thermosonde Measurement of Temperature Structure Parameter and Temperature Spectral Power-Law Exponent Profile in the Lower Stratosphere

Wu Xiaoqing¹ Huang Honghua¹ Qian Xianmei¹ Wang Ping^{1,2} Cui Chaolong¹

(¹ Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The temperature structure function $C_T^2(h)$ ($r_1=0.5\text{ m}$, $r_2=1\text{ m}$) and power-law exponent $\alpha(h)$ of the temperature fluctuation spectrum as functions of altitude are obtained by a novel thermosonde. The thermosonde provides two-channels for micro-thermal probes in different configurations. This arrangement can not only measure temperature, humidity, pressure, wind speed and direction, refractive index structure constant profile, Fried parameter, seeing, isoplanatic angle, coherence time, but also provide power-law exponent profile of the temperature fluctuation spectrum. It is found the difference between $\alpha(h)$ and Zilberman's three-layer model in the free troposphere. These results are useful for optical propagations, optical communications, remote sensing and numerical models of atmospheric turbulence.

Key words atmospheric optics; optical turbulence; spectral power-law exponent profile; thermosonde

OCIS codes 010.1330; 280.7060; 280.6780

1 引言

大气湍流对大气传输的激光产生影响较大,传输过程中存在光束漂移、抖动、扩展等一系列湍流效应,使光束质量严重下降,严重影响光电仪器的跟瞄精

度。长期以来,波在湍流大气中传播研究,都是建立在 Kolmogorov 的湍流理论基础之上。Kolmogorov 湍流模型以最简洁的数学表达方式反映出大气湍流的规律,如惯性区二阶结构函数的三分之二标度律和

收稿日期: 2013-10-16; 收到修改稿日期: 2013-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(41275020)

作者简介: 吴晓庆(1963—),男,博士,研究员,主要从事大气边界层、大气湍流测量与模式等方面的研究。

E-mail: xqwu@aiofm.ac.cn

一维湍流的负三分之五定律,是现有大气光学湍流测量和湍流效应计算的理论基础。然而实验表明, Kolmogorov 理论并不能完全描述小尺度湍流大气统计特征。Dalaudier 等^[1]用高空间分辨率的探空仪首次观测到高空温度场存在梯度很大的片状层结构。Muschinski 等^[2]证实了湿度和风速廓线也存在片状层结构,且片状层厚度不足 10 m。Beyer 等^[3]用球载微温传感器测量了 12000~18000 m 范围内温度谱幂率偏离 Kolmogorov 谱。目前非 Kolmogorov 湍流的研究^[4-9]主要是根据少量报道的飞机、高空气球观测数据,在不同的应用场景条件下,采用非 Kolmogorov 湍流谱,或者 Kolmogorov 湍流谱和非 Kolmogorov 湍流谱叠加,进行湍流效应的数值模拟。数值模拟所采用的非 Kolmogorov 湍流主要体现如下:1.5~10 km 的对流层湍流的三维谱幂率假定为 -10/3,大于 10 km 的对流层顶以上区域湍流的三维谱幂率假定为 -5,都不是 Kolmogorov 湍流谱幂率的 -11/3。至今为止,近地面至低平流层湍流谱幂率的空间分布数据及其统计特征报道较少。对自由大气中的湍流而言,其核心问题仍然是基于局地均匀和各向同性假定的 Kolmogorov 湍流理论是否适用以及其在多大范围内适用。本文采用湍流气象探空仪,实验期间除得到温度、湿度、压强、风速、风向、折射率结构常数 C_n^2 廓线、Fried 参数 r_0 、视宁度 ϵ_{FWHM} 、等晕角 θ_0 和相干时间 τ_0 等测量结果外,还得到了高空湍流谱幂率廓线和空间两点不同距离的温度结构常数,分析了空间不同距离的温度结构常数及其温度谱幂率廓线的测量结果。为将来进行湍流谱幂率随高度分布的统计特征研究、建立更加完善的波在大气中传输的湍流模型提供实验依据。

2 测量原理

根据 1941 年 Kolmogorov 湍流理论(简称 K41),

在惯性子区内,相隔距离为 r 的两点温度差的结构函数对 r 呈幂次规律变化,即湍流的标度律,表示为

$$\langle [T(\mathbf{x} + \mathbf{r}) - T(\mathbf{x})]^n \rangle \propto r^{\zeta_n}, \quad (1)$$

式中 T 为温度, \mathbf{x} 和 \mathbf{r} 为位置矢量, r 是 \mathbf{r} 的大小, $\langle \rangle$ 为系综平均, ζ_n 为 n 阶惯性区标度指数。按 K41 理论, $\zeta_n = n/3$, 即 ζ_n 是 n 的线性函数,对应的惯性区标度律为正常标度律。当 $n=2$ 时,(1)式即是著名的三分之二标度律。

与二阶温度结构函数相对应的是一维温度谱,可表示为

$$S_T(k_1) = \gamma \epsilon^{-1/3} \chi k_1^{-5/3}, \quad (2)$$

式中 γ 是 Obukhov-Corrsin 数,约为 0.4, ϵ 和 χ 分别为湍流动能耗散率和温度方差耗散率, k_1 为波数。通常波数谱 $S_T(k_1)$ 是通过 Taylor 假定由时间序列的温度脉动信号频率谱 $S_T(f)$ 得到,两者关系为

$$S_T(k_1) = \frac{V}{2\pi} S_T(f), \quad (3)$$

式中 $f = \frac{V}{2\pi} k_1$, V 是气流通过传感器速度,在竖直方向可估计为气球上升速度。

对(2)式取对数,可得

$$\lg[S_T(f)] = \lg\left[\left(\frac{V}{2\pi}\right)^{2/3} \gamma \epsilon^{-1/3} \chi\right] - \frac{5}{3} \lg f, \quad (4)$$

$S_T(f)$ 的一般可表示为

$$S_T(f) = A f^\alpha, \quad (5)$$

进而有

$$\lg[S_T(f)] = \lg A + \alpha \lg f, \quad (6)$$

式中谱幂率 α 可以线性拟合得到。

3 探空仪结构

实验中采用两种探空仪进行测量。一种是早期的将微温传感器附加在 59 型电码气象探空仪上^[10] (model I),其结构示意图如图1所示。单片机(SCM)

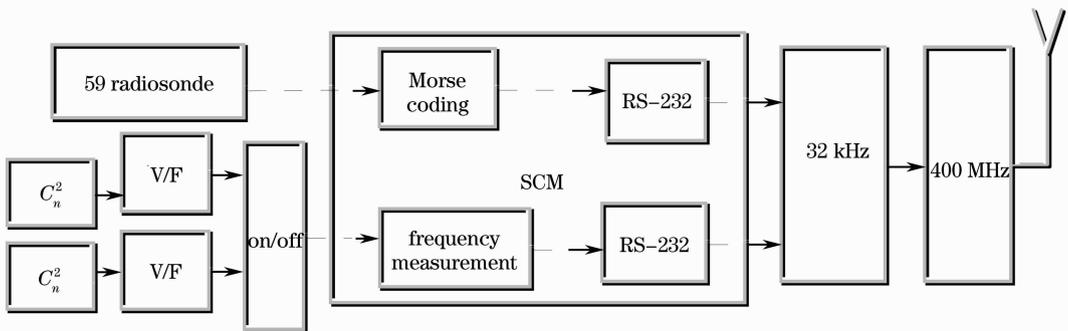


图1 59 型电码式湍流气象探空仪框图(model I)

Fig. 1 Schematic of 59 radiosonde turbulence meteorological thermosonde (model I)

AT 89C52 完成数字化莫尔斯码译码、温度脉动测量通道的选通以及对经压频变换电路(V/F)转换成的温度脉冲信号进行频率测量、温度脉动方差计算等功能。这些量形成串行数据流(Serial RS-232)经32 kHz副载波和400 MHz载波的二次调制方式发送出去。一次探空可以得到温度、湿度、气压、 C_n^2 和时间序列的温度脉动信号等数据,但缺少风速和风向。另一种是改进型的将微温传感器附加在GPS电子气象探空仪上(model II),其结构框图如图2所示,单片机

AT 89C52 对商用的GPS接收芯片测量的GPS定位数据、温湿压和湍流数据,进行数据统一格式处理和编码,调制400 MHz发射机。地面接收机接收到探空仪超高频(UHF)信号,通过变频、放大、解调、译码等一系列处理后,由终端处理软件输出高精度、高空间分辨率的 C_n^2 、温度、湿度、气压、风速、风向等数据。但采用该探空仪测量结果与model I相比,缺少时间序列的温度脉动信号数据。

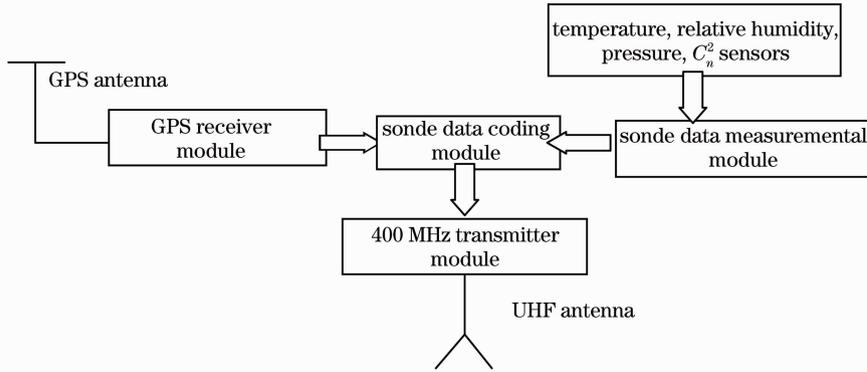


图2 GPS电子式湍流气象探空仪框图(model II)

Fig. 2 Schematic of GPS turbulence meteorological thermosonde (model II)

由于探空仪有两路温度脉动测量通道,因此可根据研究内容进行多种组合:

- 1) 两个通道同时接一个双点温度脉动传感器(pair),可以得到一条 $C_n^2(h)$ 廓线;
- 2) 两个通道分别接一个双点温度脉动传感器(pair/pair),通过测量两个不同空间距离上(如 $r_1=0.5\text{ m}, r_2=1\text{ m}$)的温度结构函数,得到两条 $C_n^2(h)$ 廓线;
- 3) 一个通道接单点温度传感器,另一个通道接双点温度传感器(single/pair),这样探空仪除得到一条 $C_n^2(h)$ 廓线外,还发送采样频率为40 Hz的原始数据,通过测量高空单点温度脉动信号,可以进行高空温度谱特性研究。

本文研制的微温传感器测量 C_T^2 的统计平均时间为5 s,噪声(温差均方差)为 $0.002\text{ }^\circ\text{C}$,带宽为 $0.05\sim 20\text{ Hz}$ 。探空仪循环时间为6 s,升速小于 4 m/s ,垂直分辨率约为24 m。这样每24 m可得到 $C_n^2(h)$ 、气压 $P(h)$ 、气温 $T(h)$ 和相对湿度 $R_H(h)$ 值。探空仪有效载荷为1 kg,距气球50 m,这是为了避免气球上升时可能产生扰动的影响。

4 实验结果和讨论

2008年6月15日至6月29日期间,本课题组在吉林长春市共施放model I型湍流气象探空仪

11个,其中探空高度达到20 km以上6次,因充气不足、水电池供电不足、接收天线受障碍物影响等因素使得探空高度在20 km以下有5次。表1是探空测量记录。2013年4月6日至4月23日。在中国科学院云南天文台丽江观测站高美古2.4 m光学望远镜附近,共施放13个探空气球,取得11份有效探空数据。除1次探空高度偏低外,其余10次探空高度均超过25 km。4份资料由59型电码式探空仪(model I)获得,7份资料由GPS电子式探空仪(model II)得到。表2为高美古探空测量记录。

图3为探空仪测量折射率结构常数 C_n^2 廓线的一次实例。测量时间为2013年4月6日中午,用与微温探头阻值相近、温度系数很小的固定电阻替代微温探头接入一路温度脉动测量通道,测量探空系统噪声。实验表明,探空系统噪声相应的等效 C_n^2 小于 $2\times 10^{-18}\text{ m}^{-2/3}$ (用Raw C_n^2 表示)。实验期间探空得到的 $r_0, \epsilon_{\text{FWHM}}, \theta_0$ 和 τ_0 等测量结果可参见文献[11]。此处重点分析空间不同距离的温度结构常数 C_T^2 及其温度谱幂率廓线的测量结果。其中, $C_n^2 = (79\times 10^{-6}\text{ P}/T^2)^2 G_T^2$, P, T 为气压和气温。在长春探空实验中,空间不同距离的温度结构常数测量2次,温度谱幂率廓线测量1次。高美古探空实验,空间不同距离的温度结构常数测量7次,温度谱幂率廓线测量4次。

表 1 长春探空测量记录

Table 1 Launch and termination times for all balloons in Changchun

Balloon number	Release date	Release time	Termination altitude time	Release altitude (above MSL) /m	Termination altitude /m	Thermosonde model	Thermosonde layout
1	2008-06-15	16:06:54	17:12:00	238	17000	I	Pair
2	2008-06-16	04:15:10	06:13:54	238	27000	I	Pair
3	2008-06-16	15:31:32	16:33:49	238	9000	I	Pair
4	2008-06-17	04:34:35	06:11:00	238	16000	I	Pair
5	2008-06-22	15:22:59	16:54:40	238	23000	I	Pair
6	2008-06-23	04:23:21	05:44:17	238	21000	I	Pair
7	2008-06-25	15:10:04	16:32:02	238	11000	I	Pair fixed resistors
8	2008-06-26	15:06:57	16:26:20	238	22000	I	Pair
9	2008-06-28	16:14:22	18:16:45	238	25000	I	Single/pair
10	2008-06-28	21:07:10	02:52:16	238	24500	I	Pair/pair
11	2008-06-29	10:29:06	12:11:18	238	13000	I	Pair/pair

表 2 高美古探空测量记录

Table 2 Launch and termination times for all balloons in Gaomeigu

Balloon number	Release date	Release time	Termination altitude time	Release altitude (above MSL) /m	Termination altitude /m	Thermosonde model	Thermosonde layout
1	2013-04-06	11:11:37	12:36:15	3227	30148	II	Pair fixed resistors
2	2013-04-07	01:28:44	04:44:06	3227	31421	II	Pair/pair
3	2013-04-07	16:35:10	17:50:19	3227	28280	I	Single/pair
4	2013-04-07	22:20:52	23:37:37	3227	28212	I	Single/pair
5	2013-04-08	01:32:37	03:16:35	3227	28714	II	Pair/pair
6	2013-04-13	23:06:21	00:55:11	3227	31678	II	Pair/pair
7	2013-04-14	02:27:14	02:58:30	3227	11615	I	Single/pair
8	2013-04-14	05:17:34	07:14:08	3227	32467	II	Pair/pair
9	2013-04-14	20:42:57	22:44:46	3227	30829	I	Single/pair
10	2013-04-21	01:00:17	02:52:16	3227	30473	II	Pair/pair
11	2013-04-23	21:07:49	22:54:27	3227	31383	II	Pair/pair

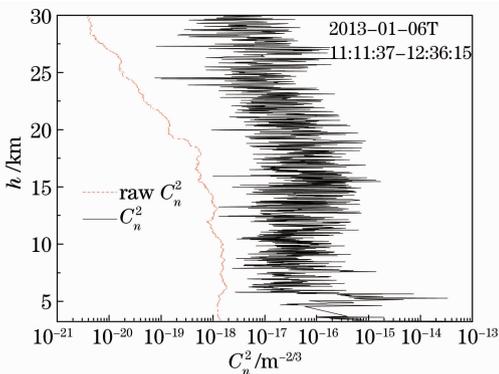


图 3 探空仪测量 C_n^2 的一次实例

Fig. 3 Example of C_n^2 measured by thermosonde

4.1 空间不同距离的温度结构常数

在有限数量一次探空测量两个不同距离的温度结构常数实验中,选取了实验条件相近的两次探空进行比较。图 4 和图 5 的测量时间分别是 2013 年

4 月 8 日 01:32:37 和 4 月 23 日 21:07:49,两微温探头间的距离分别为 0.5 m 和 1 m,两对传感器在水平面呈垂直分布。可以看出,一次探空同时测量的两个温度结构常数相关程度非常高,但量级差别很大。图 4 是两结构常数有较大差别的实例。图 5 是两结构常数基本一致的实例。 C_T^2 和 C_n^2 随高度变化趋势明显不同。在边界层和低对流层,气压和气温平方的比值随高度递减相对缓慢, C_T^2 随高度变化趋势基本决定了 C_n^2 的趋势。在对流层顶以上区域,气压和气温平方的比值随高度递减迅速,即使该区域 C_T^2 总趋势随高度增加,强度甚至大于近地面层,但 C_n^2 总趋势随高度仍是下降。

按 Kolmogorov 湍流理论,在惯性区结构常数大小与空间距离和方位无关。图 4 中出现结构常数大小有差异的可能原因是:1)因标定原因,两微温传

感器间存在系统偏差;2)微温探头间的空间距离没有处于湍流惯性区范围;3)因两传感器呈垂直分布,探空仪升空过程中的旋转、振动、以及太阳辐射等原因对两传感器的影响有差异;4)高空湍流呈各向异性。

除第一种情况在实验前做好定标工作便于排除外,仅凭有限数据准确地判断偏离可能的原因有一定难度。但图 5 测量结果大致可以判断高空湍流外尺度范围且湍流呈现各向同性的特征。

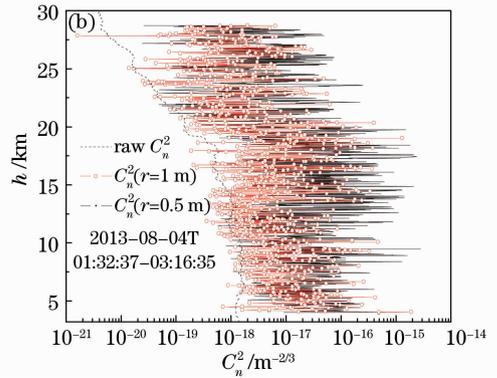
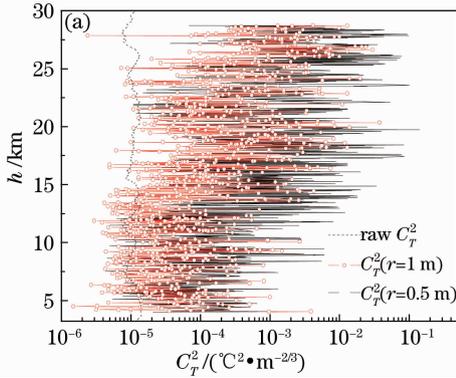


图 4 空间不同距离的(a)温度结构常数和(b)折射率结构常数有较大差别的实例

Fig. 4 Examples of (a) difference C_T^2 and (b) difference C_n^2 measured at the different spatial distances

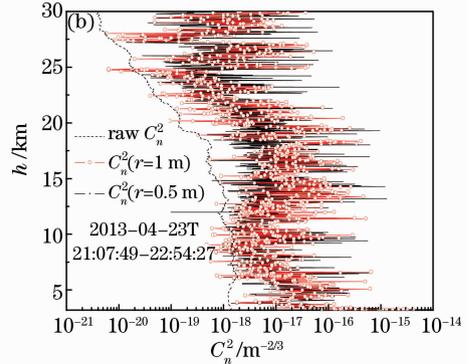
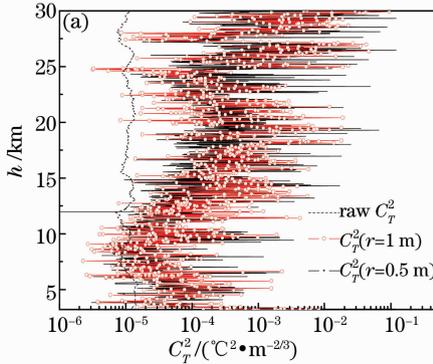


图 5 空间不同距离的(a)温度结构常数和(b)折射率结构常数基本一致的实例

Fig. 5 Examples of (a) approximate C_T^2 and (b) approximate C_n^2 measured at the different spatial distances

4.2 温度谱幂率廓线

图 6 和图 7 是测量得到的温度谱幂率和 C_T^2 廓线。其中图 6 测量数据为 2008 年 6 月 28 日 16:14:

22-18:16:51 于长春的结果,图 7 测量数据为 2013 年 4 月 14 日 20:42:57-22:44:46 于高美古。从图可以看出谱幂率和 C_T^2 存在某种形式的相关。图 6

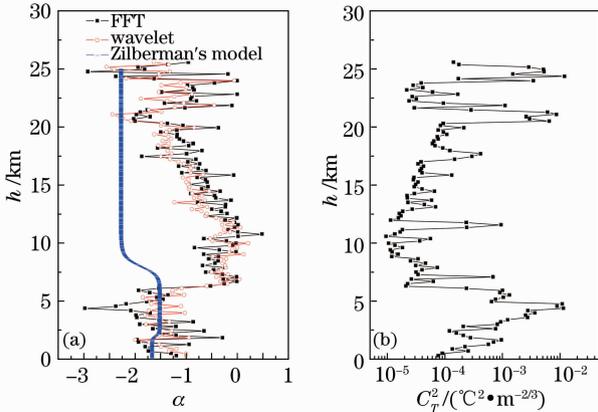


图 6 谱幂率和 C_T^2 廓线

Fig. 6 Profiles of spectral power-law exponent $\alpha(h)$ and $C_T^2(h)$ in Changchun

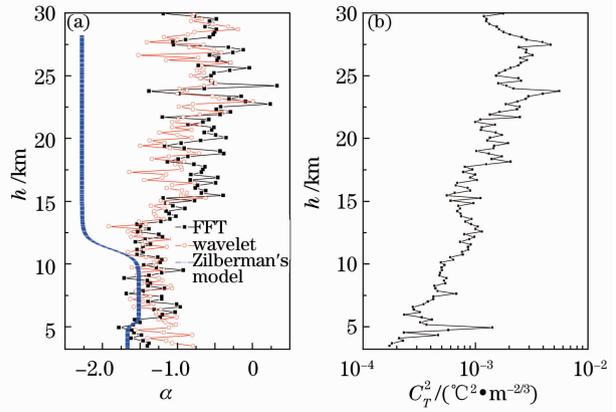


图 7 谱幂率和 C_T^2 廓线

Fig. 7 Profiles of spectral power-law exponent $\alpha(h)$ and $C_T^2(h)$ in Gaomeigu

中可以看出在 5 km 以下的强湍流区域,一维温度谱幂率在 $-5/3$ 附近起伏,而在接近 10 km 左右的低背景湍流区,谱幂率接近零,不同尺度间的局地级串过程非常微弱。而图 7 中 C_n^2 随高度变化没有图 6 剧烈,相应的谱幂率随高度变化比较平缓,但偏离 $-5/3$ 。实验期间长春对流层顶距地面高度约为 12 km,而高美古对流层顶距地面高度超过 14 km。两次测量结果均表明谱幂率与 Zilberman 三层谱模式相比,在对流层顶以上有较大区别。

5 结 论

利用研制的湍流气象探空仪,一次探空除测量温度、湿度、压强、风速、风向、 C_n^2 廓线,以及 r_0 、 ϵ_{FWHM} 、 θ_0 和 τ_0 等积分参量外,还得到了高空湍流谱幂率廓线数据。突破了同类型探空仪在 Kolmogorov 湍流假定成立条件下,测量高空光学湍流强度 C_n^2 及其高度积分值的限制,进行了高空非 Kolmogorov 湍流特征研究。探空得到的高空湍流谱幂率廓线数据及其空间不同距离的结构常数等数据,为在观测实验基础上建立真实大气湍流谱模式、满足不同场景下湍流效应计算提供了可靠方法。

参 考 文 献

1 F Dalaudier, C Sidi, M Crochet, *et al.*. Direct evidence of "Sheets" in the atmospheric temperature field [J]. *J Atmos Sci*, 1994, 51(2): 237–248.

2 A Muschinski, C Wode. First in situ evidence for coexisting submeter temperature and humidity sheets in the lower free troposphere [J]. *J Atmos Sci*, 1998, 55(18): 2893–2906.

3 J T Beyer, M C Roggemann, L J Otten, *et al.*. Experimental estimation of the spatial statistics of turbulence induced index of refraction fluctuations in the upper atmosphere [J]. *Appl Opt*, 2003, 42(6): 909–921.

4 B E Stribling, B M Welsh, M C Roggemann. Optical propagation in non-Kolmogorov atmospheric turbulence [C]. *SPIE*, 1995, 2471: 181–196.

5 A Zilberman, E Golbraikh, N S Kopeika. Propagation of electromagnetic waves in Kolmogorov and non-Kolmogorov atmospheric turbulence: three-layer altitude model [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(34): 6385–6391.

6 N S Kopeika, A Zilberman, E Golbraikh. Generalized atmospheric turbulence: implications regarding imaging and communications [C]. *SPIE*, 2010, 7588: 758808.

7 W Du, L Tan, J Ma, *et al.*. Temporal-frequency spectra for optical wave propagating through non-Kolmogorov turbulence [J]. *Opt Express*, 2010, 18(6): 5763–5775.

8 Huang Yongping, Zeng Anping. Propagation properties of Hermite-Gaussian beams in non-Kolmogorov turbulence [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(7): 818–823.
黄永平, 曾安平. 厄米-高斯光束在非 Kolmogorov 大气湍流中的传输性质[J]. *光子学报*, 2012, 41(7): 818–823.

9 Tao Rumao, Si Lei, Ma Yanxing, *et al.*. Propagation of truncated partially coherent cosh-Gaussian beam in non-Kolmogorov turbulence [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0502008.
陶汝茂, 司磊, 马阎星, 等. 截断部分相干双曲余弦高斯光束在非 Kolmogorov 湍流中的传输[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0502008.

10 Qin Yuzhen, Wu Xiaoqing, Li Duoyang, *et al.*. Design and capability analysis of meteorologic radiosonde for turbulence [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(2): 166–170.
秦余贞, 吴晓庆, 李多扬, 等. 湍流气象探空仪的研制及其性能分析[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(2): 166–170.

栏目编辑: 王晓琰