

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2013.01.003

闽西地区秋冬季节近地面大气折射率 结构常数特性分析

吕炜煜¹, 苑克娥^{1*}, 谈斌², 魏合理¹, 魏旭², 封双连², 姚东升², 邵士勇¹, 胡顺星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 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 分析了闽西地区近地面部分高度的折射率结构常数在部分月份的变化特点, 结果表明: 该地区的近地面折射率结构常数日变化具有较明显的局地特征; 白天近地面折射率结构常数高度分布特点符合“-2/5”规律, 夜间近地面折射率结构常数高度分布特点符合“-1/3”规律; 在 10~12 月中, 由于云量的影响, 11 月的湍流强度最弱, 10 月湍流强度最强; 同高度条件下, 晴天的折射率结构常数约是阴天的折射率结构常数 2 倍以上。

关键词: 大气湍流; 折射率结构常数; 日变化; 月变化; 激光工程

中图分类号: TN012; P427.1 文献标识码: A 文献编号: 1673-6141(2013)01-0018-08

Analysis of Near-Surface Characteristics of Refractive Index Structure Parameter in Autumn and Winter of Western Fujian Areas

LÜ Wei-yu¹, YUAN Ke-e^{1*}, TAN Bin², WEI He-li¹, WEI Xu², FENG Shuang-lian²,
YAO Dong-sheng², SHAO Shi-yong¹, HU Shun-xing¹

(1 Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine
Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2 Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The statistical methods are used to analyze the data of refractive index structure parameter of surface layer in October, November and December in a mountainous area of west Fujian Province. The results show that the daily variations of refractive index structure parameter of surface layer in the area have obvious

收稿日期: 2011-12-26; 修改日期: 2012-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41005015)、中科院创新基金 (Y03AG31141)、安徽省自然科学基金 (11040606M40) 资助

* 通信联系人. E-mail: keyuan@aiofm.ac.cn

local area characteristics. The turbulence strength of November is weaker than that of October or December. The behavior of refractive index structure parameter in daytime decreases with the height increase and agrees with “-2/5” rule. The behavior of refractive index structure parameter at night decreases with the height increase and agrees with “-1/3” rule. The turbulence strength of October is the strongest in the three months. On the condition of same heights, the refractive index structure parameter in sunny day is about two times than the refractive index structure parameter in cloudy. In the end, the effects of atmospheric turbulence of surface layer on laser engineering on the condition of ceterain assumptions are provided.

Key words: atmospheric turbulence; refractive index structure parameter; daily variation; monthly variation; laser engineering

1 引 言

光波在湍流大气中传播时, 大气湍流引起折射率的起伏使得光波的波阵面发生畸变, 破坏了光波的相干性, 产生了闪烁、漂移、扩展与抖动等现象, 这对许多光学工程如激光大气传输、自由空间光通讯、天文观测等带来了严重影响^[1-3]。准确可靠地分析大气湍流的影响需要对大气湍流的特性进行多方面的测量, 而对大气湍流特性的测量包括对湍流强度、湍流特征尺度等参量实施测量, 其中大气湍流强度是光波大气传输中重要的研究课题。大气折射率结构常数 C_n^2 作为湍流强度的重要表征, 是评估激光大气传输效果的重要参量^[4-8]。因此通过开展局地条件下近地面 C_n^2 的测量工作, 可以了解在一定地理条件下近地面大气湍流强度的变化特征, 并就这些变化特征对特定波长的激光在一定大气传输距离上产生的可能结果有较为客观和准确的预估。

本文通过分析闽西地区秋冬季节近地面 C_n^2 的测量数据, 指出在该地区近地面 C_n^2 的基本日变化、月变化特征, 并就实验期间近地面 C_n^2 随高度分布的规律进行初步探讨, 给出晴天、阴天条件下近地面 C_n^2 的区别特征及不同测量高度 C_n^2 昼夜频数分布特点, 在基本了解测量区域 C_n^2 变化特性的基础上, 给出一定假设条件下该地区近地面大气湍流特性对激光工程影响的分析。

2 测量原理与仪器设置

在局地均匀各向同性条件下, C_n^2 满足

$$C_n^2 = \frac{\langle [n(x) - n(x+r)]^2 \rangle}{r^{2/3}}, \quad (1)$$

式中, n 为大气折射率, x 为位置矢量, r 为空间两点距离, $\langle \rangle$ 表示系综平均。假定湍流温度场满足 Kolomogrov 假设, 则在惯性区内温度结构常数 C_T^2 满足

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

大气折射率的起伏主要由温度起伏引起, 其他参数如气压、湿度等起伏的影响可以忽略, C_T^2 和 C_n^2 的关系满足

$$C_n^2 = (0.79 \times 10^{-6} \frac{P}{T^2})^2 C_T^2. \quad (3)$$

通过 C_T^2 和 C_n^2 的关系可知: 对局域大气湍流光学性质开展有效研究的手段之一就是通过对湍流温度场的起伏特性来研究湍流折射率的起伏特性, 即通过测出惯性区两点温差的变化, 然后对样本数进行平均, 在求得 C_T^2 的基础上求得 C_n^2 。所以在实际测量过程中采用温度脉动仪来获取 C_T^2 , 温度脉动仪使用的是两个相距一定距离、直径为 $10 \mu\text{m}$ 的铂丝电阻, 测量两点间的温度差 ($T_1 - T_2$), 经温度脉动传感器电路放大、滤波, 输出 $0 \sim 5 \text{ V}$ 的电压信号。温度脉动传感器得到的信号, 由单片机控制, 经模数 (A/D) 转换成



图 1 测量装置实物图

Fig.1 Atmospheric parameter measure system

数字量送入采样频率为 100 Hz 的单片机,对采集的信号进行方差运算,运算结果进行纠错编码,数码通过串行口,通过网线传送至控制计算机。频率带宽为 0.01~30 Hz,系统噪声 0.002 °C,平均时间 15 s,测量高度为 1.5 m、4.0 m、5.0 m,在测量 C_n^2 的同时使用 Vaisala 的气象变送器 WXT520 获取 1.5 m 高度的温度、湿度、气压、风向、风速等要素。这样通过直接测量 C_n^2 ,就可由式 (3) 计算得到 C_n^2 。图 1 是整个测量系统的实物图。

3 统计分析

测量地区位于闽西地区,测量时间为 10~12 月,测量数据的基本情况如表 1 所示。

表 1 测量数据情况

Table 1 The brief of measured data

测量月份	1.5 m(条)	4.0 m(条)	5.0 m(条)	合计(条)
10	132452	129143	131776	403371
11	148737	161527	161590	471854
12	170123	171435	171549	513107

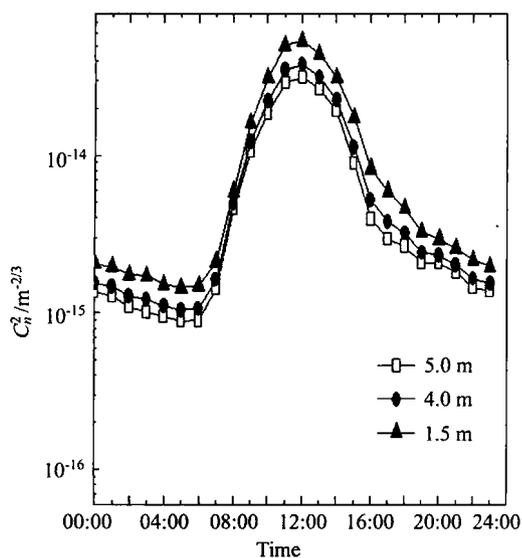


图 2 不同高度折射率结构常数日变化图

Fig.2 Daily variation of C_n^2 at different heights

3.1 不同高度的日变化

图 2 给出三个测量高度折射率结构常数在测量时间段内日变化的 1 h 平均情况,可以看出 C_n^2 随高度增加呈缓慢下降趋势, C_n^2 最小值一般出现在 05:00,而这是测量区域的日出前时段,午后的 C_n^2 随时间表现出递减趋势,这种递减趋势一直持续到第二日凌晨 05:00,该种变化特点与干旱地区的近地面 C_n^2 变化特点不同,干旱地区的近地面 C_n^2 典型日变化曲线具有两个时段的极小值,极小值一般出现在日出和日落前^[9],这种时段称为转换时段,并且日出和日落前的转换时段平均值一般小于日出后的转换时段,但在闽西山区,通常意义上所说的转换时段只具备一个。对于不同地区, C_n^2 转换时段的特点是不同的,文献 [3]

中既列出与干旱地区类似的 C_n^2 表现特征, 也给出不同于近海面地区 C_n^2 的变化特征, 文献 [10] 中海边夏、冬季节的 C_n^2 转换时段的表现特征与本文测量区域的转换时段特征相似。这反映出不同高度的 C_n^2 在具有自身日变化特点的同时, 转换时段受到地理环境的影响表现出不同的特征。

3.2 随高度变化情况

一般而言, 近地面 C_n^2 随高度增加呈减小趋势, 对于固定区域, 近地面 C_n^2 的平均变化特征应该说是固定的, 对于 C_n^2 随空间变化的分布, 一般要结合一定的环境参数开展 (如风速), 限于条件, 只从高度来考虑, 文献中提及的高度模式满足式 (4) 和式 (5)^[9,11]

白天

$$C_n^2(h) = C_n^2(0)h^{-4/3}, \quad (4)$$

夜间

$$C_n^2(h) = C_n^2(0)h^{-2/3}. \quad (5)$$

但上述模式是在干旱地区获取, 近地面性质不同, 近地面 C_n^2 随高度变化情况未必表现相同, 特别是在下垫面潮湿地表植被较好的地区^[8]。根

据实际测量数据的统计, 在测量区域, 白天和夜晚近地面 C_n^2 随高度分布满足式 (6) 和式 (7)

白天

$$C_n^2(h) = C_n^2(0)h^{-2/5}, \quad (6)$$

夜间

$$C_n^2(h) = C_n^2(0)h^{-1/3}. \quad (7)$$

比较式 (6) 与式 (4) 以及式 (7) 与式 (5), 结果表明: 在测量区域, 近地面 C_n^2 随高度变化与干旱地区相比, 测量区域的近地面 C_n^2 随高度的增加该参数减小得较为缓慢, 并且近地面 C_n^2 昼夜的差别不如干旱地区明显。这也说明测量区域近地面 C_n^2 随高度分布的模式表明测量地点的湍流在垂直输送能量方面不如干旱地区表现强烈, 这是由于测量区域的下垫面水汽充沛, 而水汽的热通量远远大于干空气的热通量, 本因日落前空气与地表之间的能量传递达到平衡, 却因水汽持续放出热量, 造成平衡被打破, 并且测量地点的周围环境相对密闭以及地表植被较好, 也是造成日落转换时段不易出现的原因。

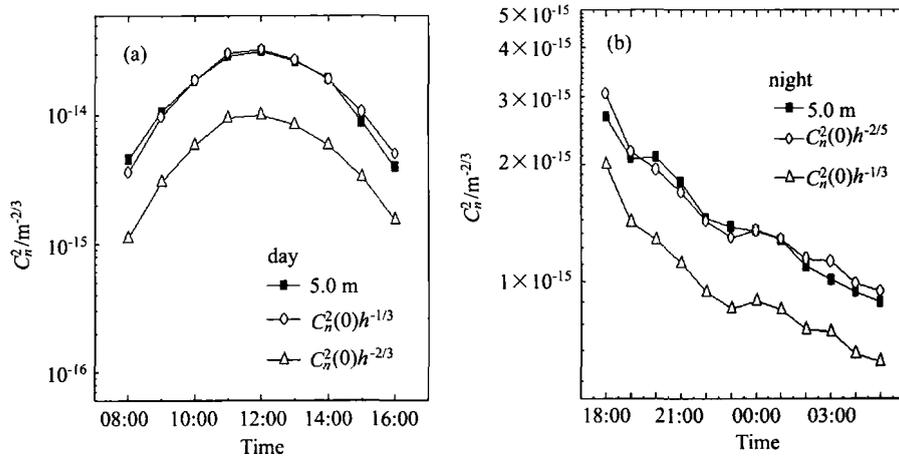


图 3 5.0 m 白天 (a) 和夜间 (b) 折射率结构常数模式图

Fig.3 Day variation(a) and night variation(b) of different C_n^2 mode at 5.0 m

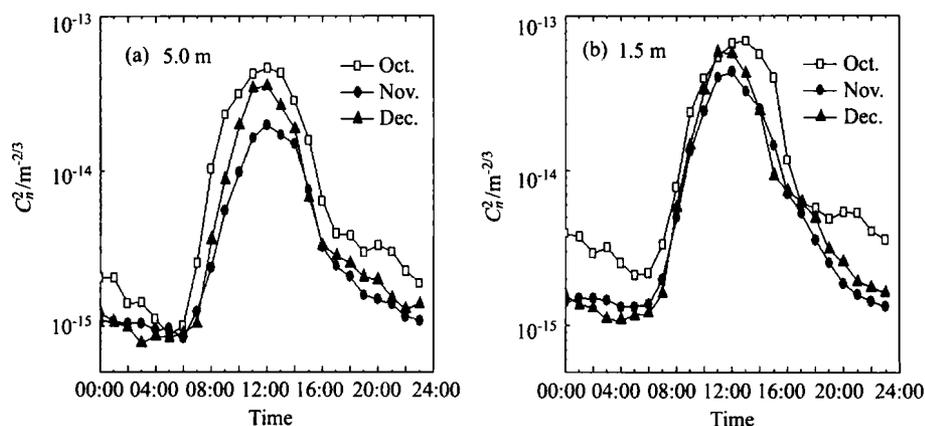


图4 5.0 m(a) 和 1.5 m(b) 折射率结构常数逐月日变化图

Fig.4 Average daily variation of C_n^2 at 5.0 m(a) and 1.5 m(b)

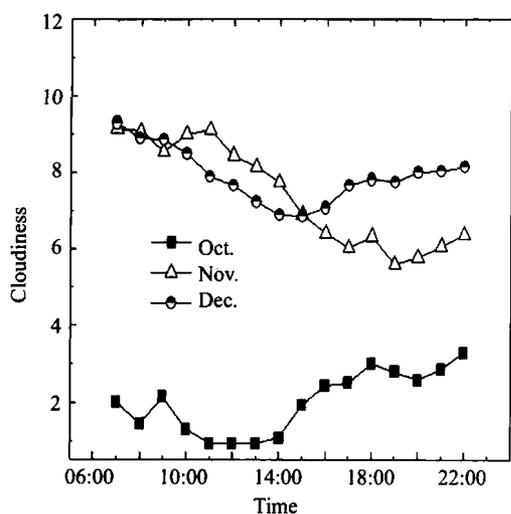


图5 云量逐月日变化图

Fig.5 Average daily variation of cloudiness

图3给出的是5.0 m高度处白天及夜间的 C_n^2 小时变化情况以及以1.5 m为零点按照公式(4)~(7)得到的5.0 m C_n^2 变化情况,可以看出由干旱地区的模式计算所得结果与实际测量结果还是有比较大的差距,但是式(6)和(7)所得结果与实际测量结果相差很小,其中白天差别最小值为 $2.72 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$,差别最大值为 $1.77 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 。夜间差别最小值为 $3.45 \times 10^{-18} \text{ m}^{-2/3}$,差别最大值为 $3.87 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 。其中,白天差别的大值体现在清晨和黄昏时段。4.0 m高度处白

天及夜间的 C_n^2 也有类似性质。

3.3 C_n^2 随月份变化情况

在只考虑晴天的情况下,由于日地关系的变化,太阳对地辐射会随月份不同而变化,因而造成地表通过湍流对大气的热量传递会有所不同。因此,近地面 C_n^2 在不同月份的变化情况会有所不同,一般越接近冬季, C_n^2 的平均值越小^[8]。但在海边,却不一定是上述情形^[10]。图4给出5.0 m和1.5 m处折射率结构常数逐月日变化情况。

从图4中可以看出,在白天,5.0 m处11月的 C_n^2 是三个月份中最小的,10月的 C_n^2 最大,1.5 m处的变化情况与5.0 m处的基本类似,只是1.5 m处11月的 C_n^2 与12月相比更为接近。出现该种现象的原因可能与云量有关,由于云量对太阳辐射影响明显,间接影响了地表的辐射,造成地表向大气输送热量降低,促使湍流强度变小。图4中11月 C_n^2 的平均值小于12月的平均值所出现的时间段主要集中在08:00~16:00,而图5中给出三个月的平均云量情况反映出11月08:00~16:00的云量多于12月的相同时间段的云量,这个时间段恰是太阳对地辐射的主要时间,16:00后由于天顶角增大,太阳辐射对地急剧减少,云虽然能

影响大气和地表热量交换, 起到保温作用, 但其作用已不如白天明显, 这就可解释夜晚 11 月 C_n^2 与 12 月的 C_n^2 在夜间相差不大的现象。

3.4 晴天、阴天特征

上文中定性地对云量对 C_n^2 日变化特征的影响进行了讨论, 为了进一步研究在测量区域云量对近地面 C_n^2 的影响程度, 针对晴天、阴天条件, 将所获取 C_n^2 的资料进行平均, 获知不同测量高度在晴天、阴天条件的具体变化特点。

图 6 给出 5.0 m、1.5 m 的 C_n^2 在晴天、阴天条件的变化情况, 晴天条件下的 C_n^2 要明显大于阴天条件下的 C_n^2 , 其中 5.0 m 晴天条件下的 C_n^2 约为阴天条件下的 C_n^2 的 2.5 倍, 1.5 m 晴天条件下的 C_n^2 约为阴天条件下的 C_n^2 的 2.1 倍。晴天 C_n^2 平均值约为 (5.0 m: $1.17 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, 1.5m: $1.76 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$), 阴天 C_n^2 平均值约为 (5.0 m: $4.59 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, 1.5 m: $8.32 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$)。在 5.0 m 高度上, 晴天与阴天条件下转换时刻的 C_n^2 相差不大, 而且在白天 5.0 m 处的 C_n^2 在晴天、阴天条件下的

对比要比 1.5 m 明显。

3.5 频数统计

将折射率结构常数的数值区间按一定间隔分成若干区间, 分析在各区间间隔内该种量级出现频数多少, 可以了解在测量地各种量级的折射率结构常数出现的概率。该种统计方法可避免在求 C_n^2 算数平均过程中, 因量级大的成分作用效果大造成算数平均结果偏大而忽略了有些量级小的成分所占概率即使略大但在平均过程中仍然起不到支配作用。

通过对测量数据进行频数统计, 得出各高度 C_n^2 累积概率变化情况。图 7 反映出各高度白天和夜间折射率结构常数的累积概率分布特征, 对于夜间, 三层高度 $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 以下的量级占绝大多数, 大于 75%。白天 $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 占有比例明显增加。白天 $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 以下的量级所占比例不到 60%, 而夜间 $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 以下的量级所占比例约 80%。这说明在测量区域, 中弱湍流占据主要成分。

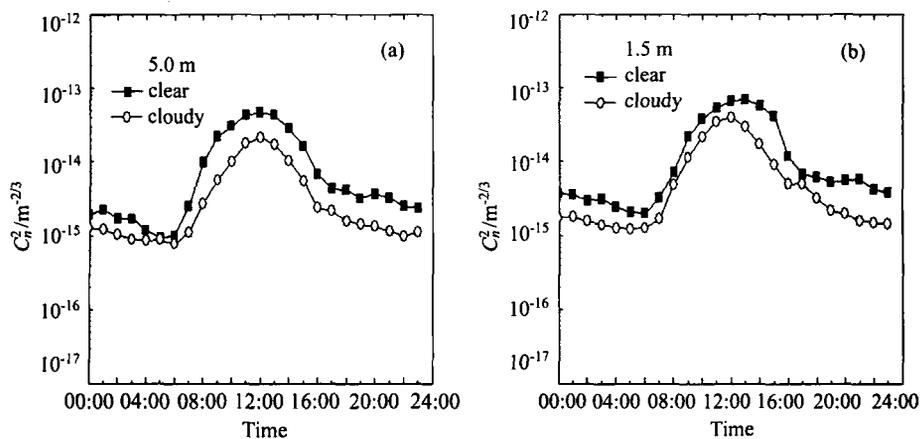


图 6 不同高度折射率结构常数日变化图

Fig.6 Daily variation of at different heights

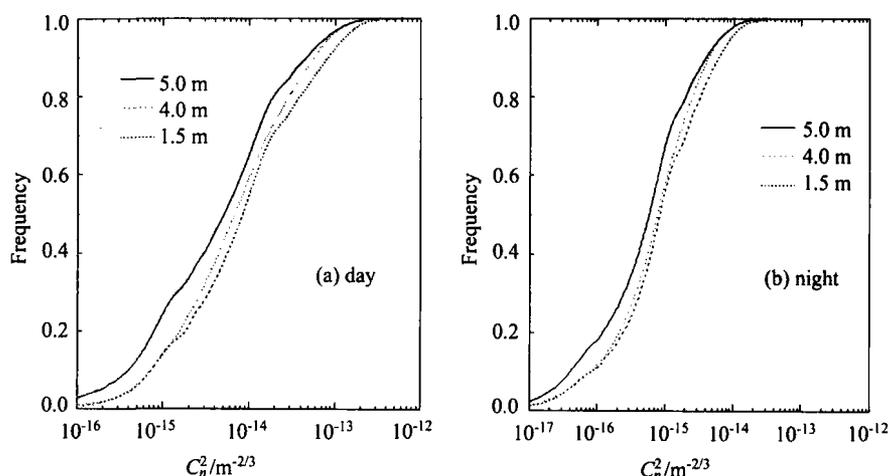


图7 三层高度白天 (a) 和夜间 (b) 累积概率布图

Fig.7 Cumulative probability distribution of C_n^2 at different heights(day (a); night (b))

4 结 论

通过分析闽西地区 10~12 月的近地面 C_n^2 变化特点, 可以得到如下结论:

测量区域的近地面 C_n^2 具有其自身的日变化特征, 其湍流强度以中弱为主, 并且日变化特征与干旱地区明显不同, 这也说明对于特定地理条件下, 地表的物理属性对近地面折射率结构常数随高度分布特征起重要作用; 云量作为影响辐射的因素其对 C_n^2 作用主要体现在白天。

闽西地区的近地面折射率结构常数变化特点进一步说明在不同地理环境条件下近地面 C_n^2 变化的复杂性, 由此会对激光工程可行性分析、光学系统设计以及激光工程使用效能的评估带来影响, 所以需全面了解激光工程应用地区的大气光学特性, 综合分析各种可能的大气状态对激光传输效果的影响, 才能作出客观、准确的评价。

致谢: 感谢肖黎明、翁宁泉、吴晓庆三位老师的宝贵意见和丁长江同志为测量工作做出的周密细致的付出!

参考文献:

- [1] Rao Ruizhong. *Light Propagation in the Turbulent Atmosphere* [M]. Hefei: Hefei Science and Technology Press, 2005(in Chinese).
饶瑞中. 光在湍流大气中的传播 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005.
- [2] Lü Weiyu, Yao Dongsheng, Zhu Wenyue, et al. Spatial distribution of atmospheric refractive index structure parameter about the dome [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(7): 1079-1083(in Chinese).
吕炜煜, 姚东升, 朱文越, 等. 圆屋附近大气折射率结构常数的空间分布 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(7): 1079-1083.
- [5] Rao Ruizhong. *Modern Atmospheric Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2012(in Chinese).
饶瑞中. 现代大气光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [4] Huang Yinbo, Wang Yingjian. Effect of the measurement errors of atmospheric parameters on the laser propagation effects [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(5): 720-724(in Chinese).

- 黄印博, 王英俭. 激光传输大气参量测量精度要求的数值分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(5): 720-724.
- [5] Pries T. High energy laser meteorology (HELMET) [C]. *Proc. SPIE*, 1990, 1221: 254-293.
- [6] Harada L K, Naiman A E, Carlson L W. Sensitivity of HEL far field intensity calculations to choice of turbulence models and parameters [C]. *Proc. SPIE*, 1990, 1221: 317-326.
- [7] Wang Yingjian. *Some Study on the Laser Propagation in the Atmosphere and Its Phase Compensation* [D]. Hefei: Doctorial Dissertation of Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1996(in Chinese).
王英俭. 激光大气传输及其位相补偿的若干问题探讨 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士论文, 1996.
- [8] Wu Xiaoqing, Ma Chengsheng, Wang Yingjian, et al. Long-term measurements and statistics study on refractive index structure parameter of surface layer [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(4): 551-556(in Chinese).
- 吴晓庆, 马成胜, 王英俭, 等. 近地面折射率结构常数的长期测量和统计分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(4): 551-556.
- [9] Smith F G. *Atmospheric Propagation of Radiation* [M]. Bellingham: SPIE Press, 1993.
- [10] Zhu Wenyue, Ma Xiaoshan, Rao Ruizhong. Optical turbulence effects on electro-optical sensors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 354-358(in Chinese).
朱文越, 马晓珊, 饶瑞中. 大气光学湍流对光电探测器性能的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(3): 354-358.
- [11] Zhang Yixin, Chi Zeying. *Light Wave Propagation and Imaging in Atmosphere* [M]. Beijing: Industry of National Defence Press, 1997(in Chinese).
张逸新, 迟泽英. 光波在大气中的传输与成像 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.

作者简介: 吕炜煜 (1974-), 江苏南通人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为激光和红外辐射传输应用研究。