

长距离光传播路径中大气相干长度的测量研究

康丽^{1,2}, 朱文越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: 基于大口径闪烁法和差分到达角起伏法开展了间距为 3.95 km 近水平路径的大气相干长度测量实验。测量结果表明: 在同路径的上下行光传播方向上, 闪烁法测量相干长度的相关系数为 0.94, 而到达角起伏法测量相干长度的相关系数为 0.79。路径权重的理论分析揭示了闪烁法对路径中部的湍流敏感, 且路径权重函数关于路径中部呈对称分布; 到达角起伏法对接收端附近的湍流敏感, 其路径权重函数从发射端到接收端呈单调递增趋势。因此, 实际的长距离光传输实验中, 在不能确定路径中湍流强度分布的情况下, 采用闪烁法测量路径上的湍流效应更适宜。

关键词: 大气相干长度; 大气湍流; 闪烁; 到达角起伏

中图分类号: T427.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1918-05

Measurement of atmospheric coherence length of optical propagation along long distance path

Kang Li^{1,2}, Zhu Wenyue¹

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

Abstract: Atmospheric coherence length over a nearly horizontal and 3.95 km path was experimental studied by the large aperture scintillation and differential image motion measure angle-of-arrival fluctuation methods. For two direction (up and down) of the same path, the experiment results show that the correlation coefficient of the large aperture scintillation method is 0.94, while the correlation coefficient of differential image motion measure angle-of-arrival fluctuation method is 0.79. Analysis of path weight function reveals that scintillation is most sensitive to the eddy in the center of the path and its path weight function is symmetrical in the measured path; however, DIMM is most sensitive to the eddy near the receiver and its path weight function is increased monotonically along with measured path from transmitter to receiver. Therefore, the scintillation maybe more appropriate for measuring turbulent effects when light propagate along long distance path whose turbulence intensity distribution is indistinct.

Key words: atmospheric coherence length; atmospheric turbulence; scintillation; angle-of-arrival fluctuation

收稿日期: 2014-10-11; 修订日期: 2014-11-12

作者简介: 康丽(1989-), 女, 硕士生, 主要从事激光大气传输特性方面的研究。Email: klwo113528@163.com

导师简介: 朱文越(1976-), 男, 研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事大气光学特性和激光大气传播方面的研究。

Email: zhuwenyue@aiofm.ac.cn

0 引言

大气相干长度 r_0 是表达光束在大气湍流中传输的空间相干程度及大气动态扰动综合强度的参数,此概念是 Fried 在研究波前相位起伏的结构函数 $D_\phi(r)$ 时提出的^[1],其值越小,表明大气湍流的动态扰动越剧烈。因此,对大气相干长度进行测量是研究湍流大气对激光传输影响和自适应光学校正的一个必不可少的环节。

目前大气相干长度的主要测量方法有三种:其一,通过测量大气中光束波前的到达角起伏获得 r_0 的差分像运动法;其二,沿光传播路径布点测量局域的折射率结构常数 C_n^2 并积分得到 r_0 的湍流路径积分法;其三,利用光闪烁效应测量光传播路径中等效平均的 $\overline{C_n^2}$ 再积分得到 r_0 的光强闪烁法。在进行长距离路径上大气相干长度的测量时,湍流积分法需要大量布置单点测量设备,不仅使用效率低下,且在某些特殊场合(如水面)难以开展工作,因此基于光传输理论的差分像运动测量法和光强闪烁法是进行长程测量时的有效方法。汪建业等^[2]利用光强闪烁和到达角起伏两种方法同时测量了 1 km 水平路径的大气相干长度,并定性地分析了两种方法测量结果之间产生偏差的原因。翁宁泉等^[3]对比了利用湍流廓线法和到达角起伏法测量距地面高度 120 m、斜程 3 km 路径的大气相干长度,指出高度权重因子是两种方法测量结果存在差异的一个重要原因。为了探究光强闪烁法和差分到达角起伏法在长距离近水平路径光传输测量中的适用性,文中分别用两套大口径闪烁仪和两套大气相干长度仪测量了间距 3.95 km 的近水平大气相干长度 r_0 ,并从两种测量方法的原理出发,定量地分析了路径权重对测量 r_0 产生的影响。

1 测量原理

在弱起伏条件下,平面波和球面波的大气相干长度 r_0 分别为^[4]:

$$r_0 = [0.423 k^2 \int_0^L C_n^2(z) dz]^{-3/5}, \text{平面波} \quad (1)$$

$$r_0 = [0.423 k^2 \int_0^L C_n^2(z) (z/L)^{5/3} dz]^{-3/5}, \text{球面波} \quad (2)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$ 是波长为 λ 的光波波数; L 为光传输距

离; C_n^2 为折射率结构常数。从公式(1)、(2)可以看出:大气相干长度 r_0 可以通过折射率结构常数的路径积分得到。

光波在大气中传输时,大气湍流引起接收端的光强起伏,即闪烁效应。实验中采用的大口径闪烁仪(LAS)是德国 Scintec 公司生产的 BLS450,其发射端是波长为 880 nm 的非相干 LED 面光源,接收端采用与发射端相同直径的大口径接收系统。基于 T. Wang 提出的大口径非相干发射和大口径接收原理^[5],闪烁仪在一定程度上有效抑制了闪烁饱和现象。公式(3)是 LAS 测量 C_n^2 的理论基础^[4]。

$$\beta_1^2 = 16\pi^2 k^2 \int_0^L dz \int_0^\infty \sin^2\left(\frac{\kappa^2 z(L-z)}{2kL}\right) \Phi_n(\kappa) |z| \times \kappa \left[\frac{2J_1(\kappa D_s/2L)}{\kappa D_s/2L} \right]^2 \left\{ \frac{2J_1[(1-z/L)\kappa D_r/2]}{(1-z/L)\kappa D_r/2} \right\}^2 d\kappa \quad (3)$$

式中: D_s 和 D_r 分别为发射和接收口径直径; κ 为空间波数;弱湍流下的 Kolmogorov 谱为 $\Phi_n(\kappa) = 0.033 C_n^2 \kappa^{-11/3}$ 。

在假设 C_n^2 路径均匀的情况下,大气相干长度可由下式求得:

$$r_0 = [0.423 k_0^2 L C_n^2]^{-3/5} \quad (4)$$

大气相干长度仪(DIMM)是利用差分像运动法测量光束的到达角起伏方差来确定大气相干长度的^[6]。DIMM 是将信标光通过光学望远镜在接收焦平面上形成两个像,两像中心位置之差 $\Delta\rho_c$ 与 r_0 的关系为^[7]:

$$r_0 = \left\{ \frac{\{2f^2[0.36(\lambda/D)^{1/3} - 0.242(\lambda/d)^{1/3}]\lambda^{5/3}\}}{[\langle\Delta\rho_c^2\rangle - \langle\Delta\rho_c\rangle^2]} \right\}^{3/5} \quad (5)$$

实验中使用的 DIMM 系统是中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心自行研制的^[2,6],其主要技术指标如下:接收望远镜(米德望远镜 LXF-350)口径 $D=0.12$ m;望远镜焦距 $f=3.82$ m;两光学接收镜的中心间距 $d=0.24$ m;追踪光源是波长 $\lambda=550$ nm 的激光。

2 实验条件及实验结果分析

实验地点位于合肥市科学岛附近。实验中仪器放置如图 1 所示,在间距 3.95 km 的 A、B 测量点分别安装了一套 LAS 和 DIMM, A、B 两测量点距离地面的垂直距离分别为 7 m、48 m,光传播路径中的下垫面包括农田、草地、水面。为了尽量排除环境因素的影响,两种仪器的上下行光传播路径保持一致。

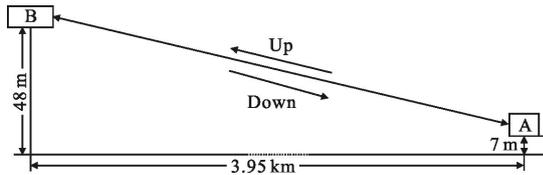


图 1 实验布局示意图

Fig.1 Sketch map of experiment layout

2.1 闪烁法测量大气相干长度

图 2 是用两套 LAS 进行 24 h 连续测量得到的大气相干长度 r_0 的日变化曲线和相关性分析结果。图中可见：两套 LAS 测量结果基本一致，相关系数达到了 0.94，表明两套 LAS 测得的结果相关性好。 r_0 日变化曲线有显著的日变化特征：白天时段(8:00~16:00)，由于太阳对地表的加热作用，形成强湍流，测得的 r_0 短；夜间时段(0:00~6:00 和 20:00~24:00)，地表向外辐射热量，大气形成上热下冷的稳定大气层结构，湍流强度弱， r_0 长；日出日落“转换时刻”，太阳辐射和地表辐射平衡，没有热量的上下传递，湍流最弱，此时的 r_0 最长。

如果定义 $\left| \frac{r_{0-up} - r_{0-down}}{r_{0-up}} \right| \times 100\%$ 为两套仪器的相对偏差，则从整体上看，两套 LAS 测得 r_0 平均相对偏差为 11.08%，且光路上行时测得的 r_0 比光路下行时测得的 r_0 长。

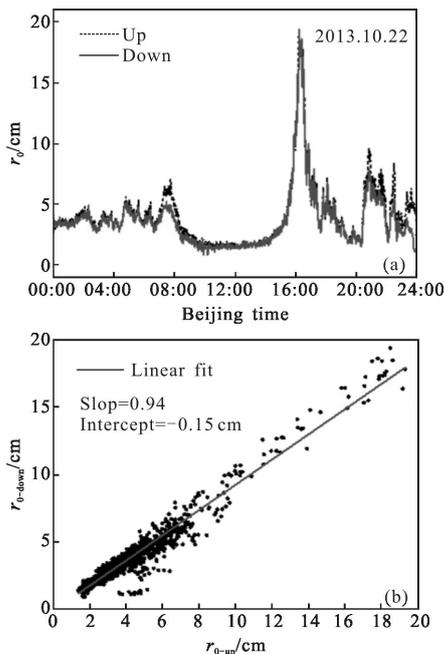


图 2 LAS 测量得到的 r_0 的日变化及其相关性分析

Fig.2 Diurnal variation of r_0 measured by LAS and analysis of correlation coefficient

2.2 到达角起伏法测量大气相干长度

图 3 是用 DIMM 进行连续测量得到的 r_0 日变化曲线及其相关性分析结果。表明 DIMM 测得上下行传播路径的 r_0 趋势一致，表现出明显的日变化特征。与 LAS 的测量结果相比，光路上行传输时的结果大于下行传输时的结果，尤其是在“转换时刻”，差异更为突出。

从整体上看，两套 DIMM 测得 r_0 的相关系数为 0.79，小于两套 LAS 测量结果的相关系数 0.94；两套 DIMM 测得 r_0 的平均相对偏差为 51.11%，约是两套 LAS 的测量结果的平均相对偏差的 5 倍。

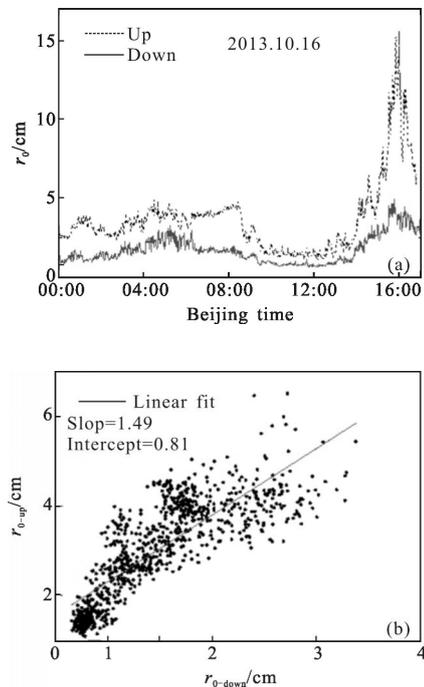


图 3 DIMM 测量得到的 r_0 的日变化及其相关性分析

Fig.3 Diurnal variation of r_0 measured by DIMM and analysis of correlation coefficient

3 路径权重对大气相干长度测量的影响

比较 LAS 和 DIMM 的实测结果可知在相同路径上 LAS 受光传播方向的影响较小。针对这样的实验结果，下面从原理出发，定量地分析路径权重对两种测量方法的影响。

3.1 路径权重对用闪烁法测 r_0 的影响

根据 Tatarskii 的湍流大气光传输理论，波长为 λ 的球面波（光波数 $k=2\pi/\lambda$ ）经过长为 L 的路径传输后，光波的闪烁指数为^[8]：

$$\beta_l^2 = 4 \times (2\pi k) L \times \int_0^1 du \int_0^\infty \sin^2 \left[\frac{u(1-u)L}{2k} \kappa^2 \right] \Phi_n(\kappa) \kappa d\kappa \quad (6)$$

式中: $u=z/L$ 为归一化路径相对位置。由于实际传播问题大多满足衍射区条件($l_0 \cdot \sqrt{\lambda L} \cdot L_0$),故采用 Kolmogorov 谱并对空间波数 κ 积分,整理可得:

$$\beta_l^2 = 2.252 k^{7/6} L^{11/6} \times \int_0^1 C_n^2(uL) [(1-u)u]^{5/6} du \quad (7)$$

假设把关于 u 的积分项中所有与 C_n^2 相乘的因子看作湍流强度的路径权重函数,则权重函数为:

$$W_{s-LAS}(u) = [(1-u)u]^{5/6} \quad (8)$$

对路径权重函数归一化得到(如图 4 所示):

$$\omega_{s-LAS} = \frac{W_{s-LAS}(u)}{\int_0^1 W_{s-LAS}(u) du} \quad (9)$$

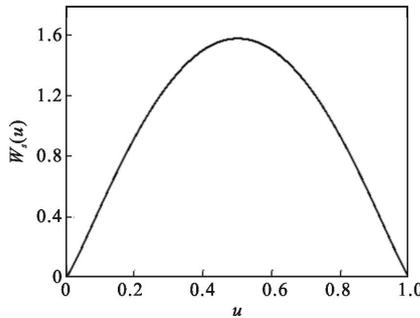


图 4 闪烁法测量 C_n^2 的归一化路径权重函数与相对位置 u 的关系
Fig.4 Relationship of normalized path weighting function of C_n^2 by scintillation measurement and relative position u

路径权重函数以路径中部对称分布,在路径的中间权重最大,说明闪烁效应对路径中部的湍流最敏感。在用 LAS 进行测量时,无论长距离近水平路径上湍流强度的分布情况如何,其路径权重的这种对称性保证了 LAS 不受光传播方向的影响。

3.2 路径权重对到达角起伏法测 r_0 的影响

在质心倾斜探测方式下,球面波在孔径上的平均到达角起伏方差为^[4]:

$$\alpha_{Gsp}^2 = 5.675 D^{-1/3} R_0 \int_0^1 C_n^2(uL) u^{5/3} du = 0.340 \left(\frac{\lambda}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} \quad (10)$$

式中: D 为孔径直径。当系统确定时,路径权重函数为:

$$W_{s-ACL}(u) = [u]^{5/3} \quad (11)$$

对权重归一化得到:

$$\omega_{s-ACL} = \frac{W_{s-ACL}(u)}{\int_0^1 W_{s-ACL}(u) du} = \frac{3}{8} u^{5/3} \quad (12)$$

图 5 给出了公式(12)的函数图像。基于到达角起伏法测量路径上的湍流效应时,路径权重从发射端到接收端呈单调递增的趋势,对接收端的湍流强度最敏感。

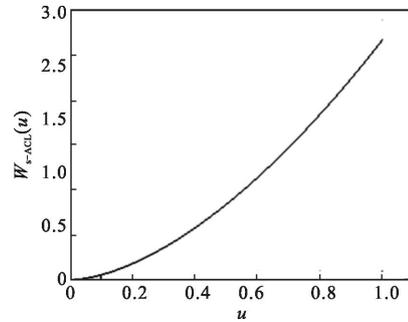


图 5 到达角起伏法测量 C_n^2 的归一化路径权重函数与相对位置 u 的关系

Fig.5 Relationship of normalized path weighting function of C_n^2 by angle-of-arrival fluctuation method and the relative position u

大气湍流强度具有显著的高度变化特征,根据合肥地区长期探空数据拟合的秋季 C_n^2 随高度变化的模式可以看出: C_n^2 随高度递减^[4]。倪志波等^[9]利用闪烁的方法得到的湍流强度廓线也表现出相似的高度变化特征。

因此,实际大气的湍流强度在长距离近水平光传播路径中非均匀分布将引起 DIMM 在相同路径的上下行光传播方向上的测量结果的差异。

4 结论与讨论

从实验结果可以看出,用 LAS 和 DIMM 测量得到的大气相干长度都可以反映大气相干长度的日变化特征,两种测量方法都有很高的工程应用价值。两套 LAS 和两套 DIMM 测得的 r_0 的相关系数分别为 0.94 和 0.79。与 DIMM 相比,LAS 在相同路径不同传播方向上的测量结果一致性好。路径权重的理论分析表明:闪烁效应主要对路径中部的湍流敏感,且路径权重关于路径中部呈对称分布;到达角起伏对接收端附近的湍流敏感,从发射端到接收端呈单调递增趋势。

实际大气中湍流强度分布是非均匀的,在进行测量时不能确定路径中湍流强度的具体分布形式。因此,长距离近水平光传输实验中采用闪烁法测量

路径上的湍流效应更适宜。

参考文献:

- [1] Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium [J]. *Opt Soc Am*, 1966, 56: 1372–1379.
- [2] Wang Jianye, Rao Ruizhong, Liu Xiaochun. Comparison of experimental study of atmospheric coherence length [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(1): 64–66. (in Chinese)
汪建业, 饶瑞中, 刘晓春. 大气相干长度的对比试验研究 [J]. *中国激光*, 2005, 32(1): 64–66.
- [3] Weng Ningquan, Wu Yi, Wang Jianye, et al. Experimental study of obtaining atmospheric coherent length from turbulence profile [J]. *High power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(3): 273–276. (in Chinese)
翁宁泉, 吴毅, 汪建业, 等. 利用湍流廓线获得斜程大气相干长度的实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(3): 273–276.
- [4] Rao Ruizhong. *Modern Atmospheric Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2012: 415–428. (in Chinese)
饶瑞中. *现代大气光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 415–428.
- [5] Wang T, Ochs G R, Clifford S F. A saturation-resistant optical scintillometer to measure [J]. *J Opt Soc Am*, 1978, 68(3): 334–338.
- [6] Wang Jianye, Liu Xiaochun, Rao Ruizhong, et al. Measurement of atmospheric coherence length in daytime and night [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(1): 1–4. (in Chinese)
汪建业, 刘晓春, 饶瑞中, 等. 大气相干长度的昼夜观测 [J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(1): 1–4.
- [7] Sarazin M, Roddier F. The ESO differential image motion monitor [J]. *Astron and Astrophys*, 1990, 227(1): 294–300.
- [8] Rao Ruizhong. *Light Propagation in the Turbulent Atmosphere* [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005: 180–183. (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: 180–183.