

# 到达角起伏与闪烁效应测量折射率结构常数的比较

宋卢军<sup>1</sup> 倪小龙<sup>1</sup> 刘 艺<sup>1</sup> 刘 智<sup>2</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022

<sup>2</sup>长春理工大学研究生院, 吉林 长春 130022

**摘要** 在相距 890 m 的水平路径上进行了激光大气传输实验, 在弱湍流条件下, 利用到达角起伏方差与闪烁指数分别推导出大气折射率结构常数。测量结果表明: 两种方法推导的结果总体趋势一致, 但在数值上存在一定差异。然后从折射率起伏频率响应特性与内外尺度变化对测量的影响角度来定量分析差异的原因。结果表明: 高波数涡旋对闪烁法测量结果贡献大, 而低波数涡旋对到达角起伏法测量结果贡献大; 内尺度变化对闪烁法测量结果影响较大; 外尺度变化对到达角起伏法测量结果影响较大。到达角法测量结果反映了大尺度湍流场的变化, 而闪烁法测量结果反映了小尺度湍流场的变化。

**关键词** 大气光学; 大气湍流; 折射率结构常数; 到达角; 光强闪烁; 湍流内外尺度

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s101003

## Comparison of Refractive Index Structure Constant Deduced from Angle of Arrival Fluctuation and Scintillation Effects

Song Lujun<sup>1</sup> Ni Xiaolong<sup>1</sup> Liu Yi<sup>1</sup> Liu Zhi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Space and Photoelectric, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

<sup>2</sup>*Graduate School of Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

**Abstract** With the purpose of comparing the differences of refractive index structure constant measured from angle of arrival and from scintillation effects, an experiment of laser propagation in atmosphere is conducted at a distance of 890 meters in the horizontal path. Scintillation index and variance of angle of arrival fluctuations are applied respectively to deduce the refractive-index structure constant in weak turbulence. The measurement results indicate that there are some differences between the two results, but the overall trends remain the same. The reason for the differences is analyzed quantitatively from two perspectives: the frequency response characteristic of refractive index fluctuation and the effect of the change of inner and outer scales on measuring. The simulation results show that scintillation is more easily affected by large scale turbulent vortexes, but angle of arrival (AOA) fluctuation is more sensitive to small turbulent vortexes. The change of inner scale has a greater influence on the result of scintillation measuring; while the change of outer scale has a larger effect on the result of the arrival-angle fluctuations measuring. The result of the arrival-angle fluctuation measuring reflects the change of large scale turbulent fields, while the result of scintillation measuring reflects small scale turbulent fields.

**Key words** atmospheric optics; atmospheric turbulence; refractive index structure constant; angle of arrival; scintillation; turbulence scales

**OCIS codes** 010.1290; 010.1330; 290.5930

## 1 引 言

激光在大气中传输时, 由于空气密度受温度、风速、气压等影响产生无规则的起伏, 导致大气折射率随机

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-02

作者简介: 宋卢军(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事无线激光通信以及激光大气传输特性方面的研究。

E-mail: songlujuncust@163.com

导师简介: 刘 智(1971—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事固态成像及大气激光通讯方面的研究。

E-mail: liuzhiqi@126.com(通信联系人)

起伏,引起光束传输时产生一系列的湍流效应,其主要表现有光强闪烁、到达角起伏、光束漂移、光束扩展等。激光大气传输特性的研究中,大多数使用大气折射率结构常数来定量描述大气湍流的强弱。根据不同测量原理,已形成多种不同的测试方法。在无线激光通讯中,主要测试光传输路径上的平均折射率结构常数,闪烁测量法是一种通过测量激光在湍流中传输的强度闪烁来反演折射率结构常数的方法;到达角起伏测量法是一种在不考虑湍流的内尺度和外尺度效应的情况下,通过测量光波的到达角起伏方差反演大气折射率结构常数的方法;漂移效应测量法是一种通过测量光束漂移方差推导折射率结构常数的方法。文献[1]中给出了对多种测量方法对比研究结果,其中对到达角法与闪烁法测量结果存在差异进行了理论分析;文献[2]对闪烁法与漂移法进行了实验与理论分析,通过实验发现两种测量方法存在差异,并从理论上分析了两种方法存在差异的原因。本文同时采用了闪烁法和到达角法测量同一路径上的平均大气折射率结构常数,并对其进行对比分析。

## 2 测量实验原理

当光束截面直径与湍流尺度相仿时,光束经过随机变化的湍流介质后,在接收端引起光波的到达角产生随机变化,到达角起伏方差是描述到达角起伏效应强弱的一个重要的统计量。根据 Tatarskii 的光在湍流大气中的传输理论,接收孔径直径为  $D$ ,光波在湍流大气中的传输距离为  $L$ ,则在该孔径下的到达角起伏方差可表示为<sup>[3]</sup>

$$\sigma_{\beta}^2 = \pi^2 L \int_0^{\infty} d\kappa \int_0^1 \kappa^3 \Phi_n(\kappa) H(\kappa, \xi) d\xi \quad (1)$$

式中  $\xi = z/L$  为归一化距离坐标,  $\kappa$  为折射率起伏的波数,  $\Phi_n(\kappa)$  为大气折射率起伏功率谱,  $H(\kappa, \xi)$  为权重函数,当光波为平面波时,其权重函数为

$$H_p(\kappa, \xi) = \left\{ 1 + \frac{2\pi}{(\kappa f)^2} \sin^2 \left[ \frac{(\kappa f)^2}{2\pi} \right] \right\} A(D\kappa/2), \quad (2)$$

式中  $A(x) = [2J_1(x)/x]^2$  是由圆孔平均引入的 Airy 函数,  $J_1(x)$  是一阶贝塞尔函数,  $f = \sqrt{L\lambda}$  是 Fresnel 长度,  $\lambda$  为光波波数。

由于整个大气做不均匀的随机运动,对湍流运动的研究采用随机统计理论,其中功率谱密度为描述湍流场的重要统计量。一般情况下,湍流谱主要考虑 Kolmogorov 谱

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033 C_n^2(z) \kappa^{-11/3}. \quad (3)$$

当水平路径上湍流强度视为均匀分布时,则平面波到达角起伏方差表示为<sup>[4]</sup>

$$\sigma_{\beta}^2 = 2.91 C_n^2 L D^{-1/3}, \quad (4)$$

式中  $D \gg (L/k)^{1/2}$ , 根据(4)式可知,利用到达角起伏方差可以推导大气折射率结构常数,该方法通常称为到达角法。

当光束截面直径比湍流尺度大很多时,光束路径上包括许多小湍流漩涡,这些漩涡各自对光束产生影响,引起接收端光强大小的随机变化,即光强闪烁效应,对数振幅起伏方差为描述光强闪烁效应强弱的统计量。对于光强闪烁效应推导  $C_n^2$ , 在弱起伏条件下,可得到光强对数振幅起伏方差<sup>[5]</sup>

$$\sigma_{\chi}^2 = (2\pi k)^2 \int_0^L dz \int_0^{\infty} \sin^2 [P(\gamma, \kappa, z)] \Phi_n(\kappa) \kappa d\kappa, \quad (5)$$

式中  $\Phi_n(\kappa)$  为湍流谱,  $\gamma$  为球面波的传播因子,当光波为平面波时,  $\gamma = 1$ ,  $P(\gamma, \kappa, z)$  称为衍射因子。当从距离  $z = 0$  到  $z = L$  光波波数为  $k$  的平面波的衍射因子表达式为

$$P(\gamma, \kappa, z) = \frac{L - z}{2k} \kappa^2. \quad (6)$$

当  $\sigma_{\chi}^2 < 0.3$ , 即满足弱起伏条件,则闪烁指数(归一化的光强起伏方差)为

$$\beta_I^2 = \sigma_{\ln I}^2 = \exp(4\sigma_{\chi}^2) - 1 \approx 4\sigma_{\chi}^2. \quad (7)$$

当湍流谱采用 Kolmogorov 谱时,则平面波的在水平路径上利用闪烁效应反演  $C_n^2$  的表达式<sup>[6]</sup>:

$$\beta_I^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/4}. \quad (8)$$

通过测量闪烁指数就可利用(8)式反演出  $C_n^2$ , 通常称为闪烁法。

### 3 测量结果

大气折射率结构常数实验测量装置包括发射部分和接收部分, 将其放置在相距 890 m 水平链路两端, 其系统组成如图 1 所示。发射部分主要包含 808 nm 激光器、卡塞格林望远镜发射系统等。接收部分包括接收孔径直径为 200 mm 卡塞格林望远镜、滤波片、透镜、高速相机、视频采集卡, 图像处理软件等。高速相机分辨率为  $640 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ , 像元大小为  $14 \mu\text{m}$ 、帧频为 1736 Hz。实验时相机间隔 10 min 采集 15000 帧灰度图像, 计算出每一帧图像的质心坐标, 求出其到达角起伏的弧度, 再求出其到达角起伏方差  $\sigma_\beta^2$ , 利用(4)式推导出其大气折射率结构常数。并计算出每帧图像的光强大小, 求出采样时刻的光强闪烁指数  $\beta_I^2$ , 根据(8)式反演得到  $C_n^2$ 。则利用该测量系统可利用两种方法同时测量同一路径上的大气折射率结构常数。

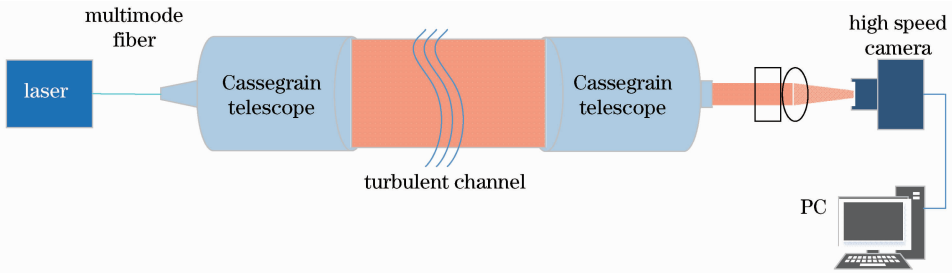


图 1 测量系统组成示意图

Fig. 1 Schematic of experimental system

图 2 为 2014 年 8 月 21 日从 8:00 至 21:00 点之间利用闪烁法与到达角法测量  $C_n^2$  的趋势图。由图可知, 两种方法的测量结果一天总体趋势基本保持一致, 中午时分大气折射率结构常数出现最大值, 傍晚时分出现最小值; 但在数值上存在一定差异, 这种差异在 11 点至 14 点与 19 点至 21 点之间更为明显。以下将定量分析存在差异的原因。

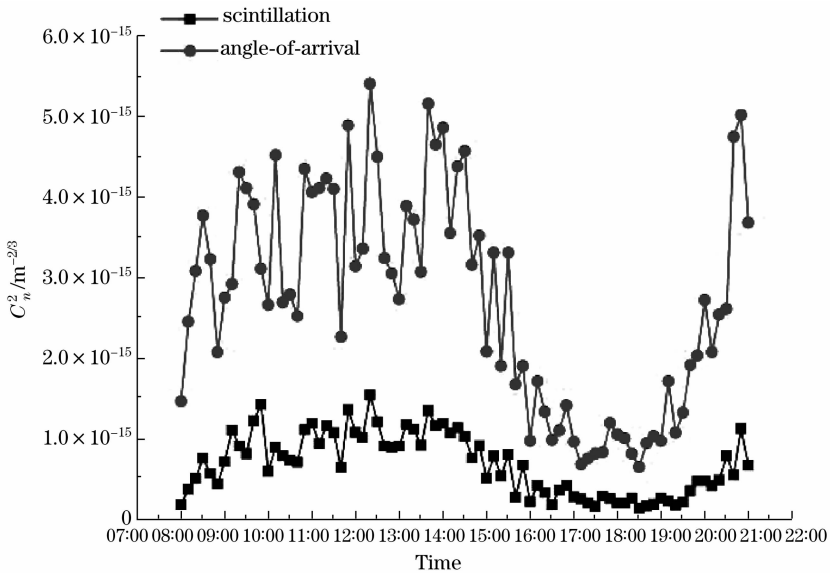


图 2 到达角起伏与闪烁效应推导的  $C_n^2$  随时间变化图

Fig. 2  $C_n^2$  versus hours in a day derived from both scintillation and angle of arrival effects

### 4 测量结果差异分析

测量结果存在差异的来源有多种因素, 这些因素主要有湍流温度谱幂率对两种测量方法的影响; 折射率起伏的功率谱幂律对  $C_n^2$  测量的影响; 不同测量方法对折射率起伏的频率响应不同; 湍流内外尺度的变化对

测量结果的影响;测量系统自身的误差以及楼的晃动引入的干扰噪声都会引起测量结果的差异。本文主要从湍流内外尺度的变化和两种测量方法对折射率起伏的频率响应两个方面分析。

#### 4.1 折射率起伏的频率响应对测量的影响

分析到达角起伏效应测量  $C_n^2$  时探测器对不同波数的湍流漩涡的响应特性时,采用归一化波数权重函数表示:

$$p_a(\kappa) = \frac{\kappa^{-2/3} H_p(\kappa, \xi)}{\int_0^\infty \kappa^{-2/3} H_p(\kappa, \xi) d\kappa}. \quad (9)$$

实验中光束传输距离为 890 m,激光波长为 808 nm,接收孔径  $D$  分别取 200、500、1000 mm 时,由(10)式计算出路径中的波数响应特性,其结果如图 3 所示。由图可知  $p_a(\kappa)$  是一个单调递减函数,  $\kappa = 0$  时有最大值,当接收孔径增大,低波数处取值增大。

分析闪烁效应测量  $C_n^2$  时探测器对不同波数的湍流漩涡的响应特性时,则有归一化波数权重函数

$$p_s(\kappa) = \frac{\kappa^{-8/3} \sin^2 \left[ \frac{(1-\xi)L}{2k} \kappa^2 \right]}{\int_0^\infty \kappa^{-8/3} \sin^2 \left[ \frac{(1-\xi)L}{2k} \kappa^2 \right] d\kappa}. \quad (10)$$

为了分析不同路径上的频率响应特性,这里  $\xi$  分别取值为 0.1、0.5、0.9,其结果如图 4 所示,其波峰取值于高波数漩涡,且随着  $\xi$  的增大峰值随之增大。

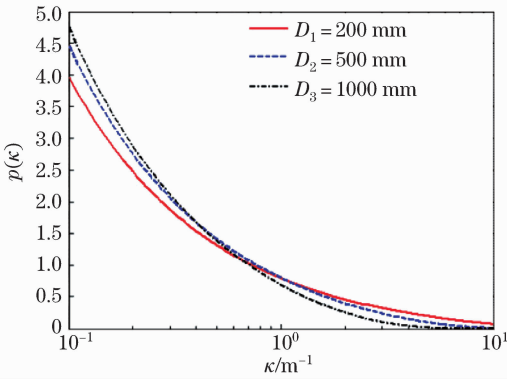


图 3 不同波数的漩涡对到达角法测量  $C_n^2$  的贡献  
Fig. 3 Contribution of vortices of different wave numbers to the result of arrival angel fluctuation

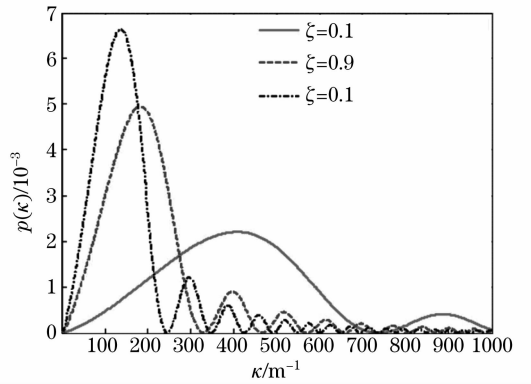


图 4 不同波数的漩涡对闪烁法测量  $C_n^2$  的贡献  
Fig. 4 Contribution of vortices of different wave numbers to the result of scintillation

由上述分析可知到达角法测量时主要表现为对低波数涡旋响应,光强闪烁法测量时主要表现为对高波数涡旋响应。由于这两种方法对同一路径上不同波数的湍流漩涡敏感,所以导致两种测量结果存在差异。

#### 4.2 内外尺度对测量的影响

$L_0$  与  $l_0$  为描述湍流大气两个重要尺度,其中外尺度  $L_0$  是湍流场被认为各向同性时湍流的最大尺度,大尺度湍流失稳后,产生次级小湍流,内尺度  $l_0$  为达到的最小尺度湍流。Kolmogorov 谱是描述湍流造成大气折射率起伏最基本的功率谱,适用范围在惯性子区间内,该区间内外尺度视为无穷大,内尺度为零。然而大量实验研究表明:在近地面  $l_0$  的取值范围一般在几毫米至十几毫米内<sup>[7]</sup>,  $L_0$  的大小一般与光束所在高度的量级大致相当<sup>[8]</sup>。使用 Kolmogorov 谱推导  $C_n^2$  时忽略内外尺度变化的影响,以下将分析内外尺度的变化对测量结果的影响。

考虑内尺度  $l_0$  对闪烁和到达角起伏效应测量  $C_n^2$  的影响时,一般采用在耗散区内呈高斯下降趋势的 Tatarskii 谱<sup>[9]</sup>

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033C_n^2(z)\kappa^{-11/3} \exp \left[ - \left( \frac{\kappa l_0}{5.92} \right)^2 \right]. \quad (12)$$

为了分析内尺度对光强闪烁效应测量  $C_n^2$  的影响,将 Tatarskii 谱代入到(1)式,在相同的光强闪烁指数条件下,比较不同内尺度下与内尺度为零时推导出的  $C_n^2$  之间的差异,对利用到达角起伏效应测量的  $C_n^2$  与内

尺度之间的关系则采用相同的方法。由图 5 可知,  $l_0$  的变化对利用到达角起伏效应测量  $C_n^2$  基本没有影响, 但对闪烁法的测量结果影响非常大, 随着  $l_0$  的值增大, 其差异也随之增大。

分析外尺度  $L_0$  对测量  $C_n^2$  的影响时, 一般采用 Von Karman 谱<sup>[10]</sup>

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033C_n^2(z)(\kappa^2 + L_0^{-2})^{-11/6}. \quad (13)$$

这里考虑外尺度  $L_0$  对两种方法的测量影响, 采用与分析内尺度对测量结果影响相同的方法, 将 Von Karman 代入到公式中, 其结果如图 6 所示。由图可知,  $L_0$  的变化对闪烁法测量结果基本不产生影响, 但对到达角起伏效应测量结果影响非常明显, 随着  $L_0$  的值变小, 其差异也随之变大, 最大差异达到 2.5 倍。

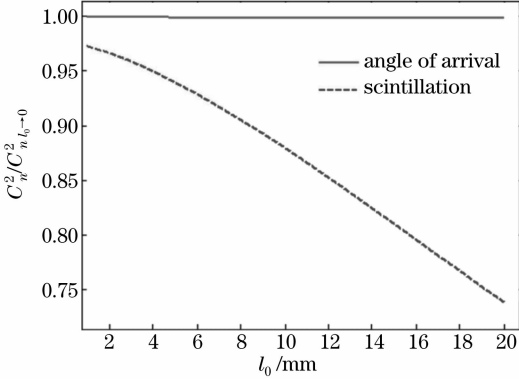


图 5 内尺度对测量  $C_n^2$  的影响

Fig. 5 Effect of inner scale on measuring  $C_n^2$

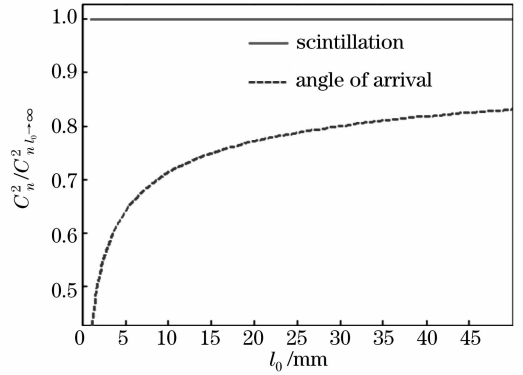


图 6 外尺度对测量  $C_n^2$  的影响

Fig. 6 Effect of outer scale on measuring  $C_n^2$

## 5 结 论

在相距 890 m 的水平路径上利用光强闪烁效应与到达角起伏效应进行激光大气折射率结构常数测量实验, 并给出两种测量结果的一天内的变化趋势图。分析比较了闪烁法和到达角法之间的差异。有上述可知两种测量方法反映了不同湍流场的变化, 闪烁法主要反映了小尺度湍流场的变化, 而到达角起伏效应测量法主要反映大尺度湍流场的变化。

## 参 考 文 献

- 1 Yuan Renmin, Zeng Zongyong, Xiao Liming, *et al.*. Comparison of some methods of measuring refractive index structure parameter [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(6):755-761.  
袁仁民, 曾宗泳, 肖黎明, 等. 不同方法测量折射率结构常数的比较[J]. 光学学报, 2000, 20(6):755-761.
- 2 Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Comparison of refractive index structure constants of atmospheric turbulence deduced from scintillation and beam wander effects [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(4):538-542.  
马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 利用闪烁和漂移效应测量大气折射率结构常数的对比分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(4):538-542.
- 3 Zhang Yixin. Aperture-averaged angle-of-arrival of light propagating through atmospheric turbulence [J]. Laser Journal, 2008, 29(2): 53-54.  
张逸新. 湍流大气传输光束的孔径平均到达角起伏[J]. 激光杂志, 2008, 29(2):53-54.
- 4 Chen Chunyi. Study on Mechanism and Mitigation Technology of Atmospheric Effects in Optical Wireless Communications [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009:51-56.  
陈纯毅. 无线光通信中的大气影响机理及抑制技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009:51-56.
- 5 Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics[M]. Beijing: Science Press, 2012: 433-435.  
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012:433-435.
- 6 R S Lawrence, J W Strohbehn. A survey of clear-air propagation effects relevant to optical communication [J]. Proc of IEEE, 1970, 58(10):1523-1545.
- 7 G R Ochs, R J Hill. Optical-scintillation method of measuring turbulence inner scale [J]. Appl Opt, 1985, 24(15):2430-2432.
- 8 Zhu Wenyue, Zhao Zhuling, Ma Xiaoshan, *et al.*. Optical method for simultaneously measuring refractive-index structure parameter and inner scale of atmospheric turbulence[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(10):1461-1464.  
朱文越, 赵柱灵, 马晓珊, 等. 同步测量大气湍流折射率结构常数和内尺度的光学方法[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(10):1461-1464.
- 9 D L Fried, G E Mevers, M P Keister. Measurements of laser beam scintillation in the atmosphere [J]. J Opt Soc Am, 1967, 57(6): 787-797.
- 10 R G Frehlich. Intensity covariance of a point source in a random medium with a Kolmogorov spectrum and inner scale of turbulence [J]. J Opt Soc Am A, 1987, 4(2): 360-366.