

文章编号: 0258-7025(2010)11-2860-04

# 湍流大气信道激光透射率的研究

杨世骥<sup>1,2</sup> 何志平<sup>1,2</sup> 贾建军<sup>1,2</sup> 吴金才<sup>1,2</sup> 王建宇<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 自由信道的大气透射率对自由空间光通信系统的设计和应用具有重要的价值,经典的大气透射率测量方法的精度水平已不能满足实际需求。结合实际应用中激光器光束能量的高斯分布特性和存在于大气信道中的湍流影响特性,对经典的大气透射率测量方法进行了改进,提出了大气透射率精确测量的实验方案。对上海和青海的多条自由空间信道的大气透射率采用经典方法与新提出方法分别进行了测量,得到的结果之间存在差异。发现青海的大气透射率很高,但是大气湍流相对严重,而上海的大气情况正好相反。分析和实验数据还表明经过长距离湍流信道后光斑扩展严重。

**关键词** 光通信;自由空间光通信;大气透射率;高斯分布;湍流;大气折射率结构常数

**中图分类号** TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103711.2860

## Research of the Transmittance of Atmospheric Turbulent Channels

Yang Shiji<sup>1,2</sup> He Zhiping<sup>1,2</sup> Jia Jianjun<sup>1,2</sup> Wu Jincan<sup>1,2</sup> Wang Jianyu<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)  
(<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract** The atmospheric transmittance is valuable in designing and applying free space optical communication system. The precision of classical method can not meet actual needs. In this paper, by ameliorating classical method of measuring atmospheric transmittance, and combining the Gauss distribution of the energy of the laser beam and the turbulent influence existing in the atmospheric channel, the experiment scheme of accurately measuring atmospheric transmittance is designed. Actual atmospheric transmittance of several free space channels in Shanghai and Qinghai are measured. The results of classical method and the method which we mention above are different. The results show that, in Qinghai, the transmittance is high, but turbulence is bad; in Shanghai, the situation is opposite. The analytic and experimental results also indicate that the distant turbulent channels influence facular spread strongly.

**Key words** optical communications; free space optical communication; atmospheric transmittance; Gauss distribution; turbulence; atmospheric refractive-index structure parameter

## 1 引 言

在目前对带宽和数据传输速率的需求不断提高的情况下,自由空间光通信越来越成为光通信的重要内容<sup>[1,2]</sup>。自由空间量子通信是近年来随着量子技术成熟而逐渐为各国科技界所追逐的一种新形式的自由空间光通信,根据量子理论,完美条件下的量子通信具有绝对的安全性<sup>[3]</sup>。长距离的大气信道存在严重的湍流引起有效激光效率的降低,影响自由空间光通信及量子通信捕获跟踪及瞄准(ATP)的

稳定性<sup>[4~8]</sup>;另外,透射率也是决定量子通信中的主要参量——单光子成码率的重要因素<sup>[3~9]</sup>。长距离自由信道大气透射率测量的经典方法为:根据激光的发散角对经过长距离传输后的激光光斑半径进行估算,通过测量光斑内的接收部分能量来计算出全激光光斑的总能量,采用接收端和发射端激光总能量的比值作为自由空间信道大气透射率的估算值<sup>[10]</sup>。该方法虽然简单直接,但未考虑实际应用中的诸多影响,不能满足现有应用的精度需求。本文

收稿日期: 2009-12-18; 收到修改稿日期: 2010-04-24

基金项目: 上海市科学委员会重大基础研究课题(08dz1400701)资助课题。

作者简介: 杨世骥(1984—),男,博士研究生,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: vipjmsy@163.com

导师简介: 王建宇(1959—),男,博士,研究员,主要从事物理电子学等方面的研究。E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn

(通信联系人)

的研究正是基于上述的背景而展开的。

## 2 测量理论

### 2.1 经典测量方案存在的问题

自由信道大气透射率测量的经典方法精度较低,主要原因有:

1) 光斑扩展:大气湍流会造成接收端的光斑扩展,设无湍流信道的接收端光斑半径为  $W$ ,将存在<sup>[11~13]</sup>

$$W_{LT}^2 = W^2(1 + T_{SS}) + W^2 T_{LS} = W_{ST}^2 + \langle r_c^2 \rangle, \quad (1)$$

式中  $T_{SS}$  和  $T_{LS}$  是小尺度和大尺度湍流的影响因子,  $W_{ST}$  为短期光斑半径,  $\langle r_c^2 \rangle^{1/2}$  为大气扰动引起的光斑抖动距离,  $W_{LT}$  为长期光斑半径,如图 1 所示。

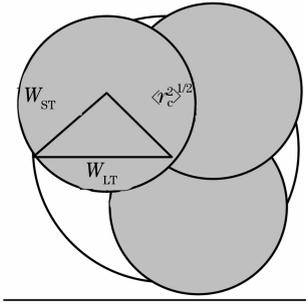


图 1 光斑扩展示意图

Fig. 1 Schematic diagram of facular spread

2) 光斑能量的高斯分布:实际激光光斑能量分布并不是均匀的,而近似为高斯分布;同时经过湍流大气信道传输距离  $L$  后,光斑能量分布依然可以用高斯分布近似;因此,接收能量随离光斑中心的距离  $r$  增大呈指数平方级下降<sup>[13,14]</sup>

$$\langle I(r, L) \rangle = A_0^2 \frac{W_0^2}{W_{LT}^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{W_{LT}^2}\right), \quad (2)$$

式中  $A_0$  为发射端的光束的振幅,  $W_0$  为发射端的光斑半径。

### 2.2 高精度的大气透射率测量方案

基于 2.1 节中的分析及考虑,为保证透射率测量的精度,设计新的透射率测量方案:

为了计算简便,通常在链路发射端和接收端引入高斯光束的参数  $\Theta_0, \Lambda_0$  和  $\Theta, \Lambda$

$$\Theta_0 = 1 - \frac{L}{F_0}, \Lambda_0 = \frac{2L}{kW_0^2}; \Theta = \frac{\Theta_0}{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2} = 1 + \frac{L}{F}, \Lambda = \frac{\Lambda_0}{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2} = \frac{2L}{kW^2}, \quad (3)$$

式中  $F_0$  和  $F$  为两端的波前曲率半径,  $W$  为接收端的光斑半径。

建立实验室内无湍流信道,由指定激光器发射激光,用小口径功率计在接收端测量光斑中心和某一固定离心距离的光功率,由(3)式可以计算出光斑半径  $W$ 。已知该激光器的发射端的光斑半径  $W_0$  及传输距离  $L$ ,即可以标定发射端的波前曲率半径  $F_0$ 。

采用 ATP 系统在实际需要测量大气透射率的信道建立光联系,由已知的  $W_0$ , 传输距离  $L$  和已标定的  $F_0$ , 可计算出不考虑大气扰动的接收端激光光斑半径  $W$  和高斯参数  $\Lambda$ 。用已标定的激光器作为发射端的信标光源,当两 ATP 系统高精度对准后,在接收端设置带有光学收集系统的功率计采用长时间积分方式测量功率,并测量光学收集系统至 ATP 系统跟踪光轴的距离  $r$ 。

在同一光学收集系统后,使用高速 CMOS 相机替换功率计,连续拍摄经过湍流大气信道后的成像光斑。光斑抖动距离除以光学系统焦距就是到达角,有研究表明,到达角起伏  $\langle \alpha^2 \rangle$  和 Rytov 指数函数  $\sigma_R^2$  与大气折射率结构  $C_n^2$  参数存在关系为<sup>[13~15]</sup>

$$C_n^2 = 0.915 \langle \alpha^2 \rangle L^{-1} D^{1/3}, \sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (4)$$

式中  $D$  为接收口径,  $k$  为波数。

通常所采用的近似激光大气传输长期扩展光斑半径公式为<sup>[10,11]</sup>

$$W_{LT} = \begin{cases} W \sqrt{1 + 1.33 \sigma_R^2 \Lambda^{5/6}}, \sigma_R^2 \leq 1 \\ W \sqrt{1 + 1.62 (\sigma_R^2)^{6/5} \Lambda}, \sigma_R^2 > 1 \end{cases}, \quad (5)$$

由已得到的  $W, \Lambda$  和  $\sigma_R^2$ , 通过(5)式可以计算出实际激光扩展光斑半径  $W_{LT}$ 。而由  $W_{LT}$ , 所测量的接收部分,和(2)式所述的光斑能量分布,可得接收端激光光斑总功率  $P_R$ 。再测量特定激光器的出射功率  $P_T$ , 由  $\eta = P_R / P_T$  计算得到最终的大气信道透射率  $\eta$ 。

测量湍流信道透射率的示意图如图 2 所示。

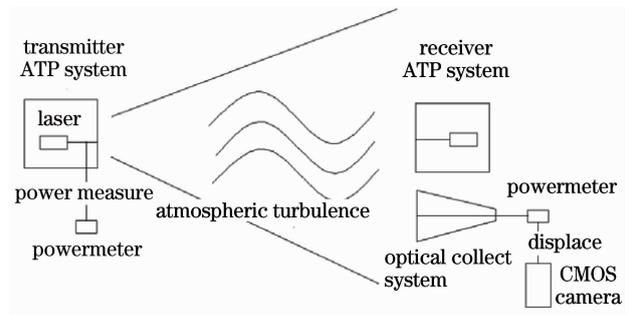


图 2 湍流信道透射率测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measuring of transmittance in turbulent channel

### 3 实验数据及分析

#### 3.1 测量实验与实验数据

根据2节原理与方案,建立实验室内100 m无湍流信道,采用长春新产业671 nm激光器,出射光斑半径 $W_0$ 为1 mm,出射功率70 mW,使用相干公司小口径激光功率计进行测量。光斑中心光功率为0.589 mW,距光斑中心3 cm的上下左右四点平均功率为0.3625 mW,由此计算得无湍流光斑半径为6.09 cm,标定激光器发射端的波前曲率半径 $F_0$ 为-1.7921 m。

然后在3条信道对激光光斑的透射率进行测量,分别是:上海1.5 km信道、青海湖8.4 km信道、青海湖88 km信道,实验实测数据如表1所示,表1中的 $r$ 为接收镜头与ATP光轴的距离, $P_r$ 是

接收镜头与光轴距离为 $r$ 时的接收功率。分析数据如表2所示,表2中 $\eta_i$ 为 $\eta$ 折合到每千米的透射率。实验均在夜间,离地面较远的楼层间进行:接收光学系统采用焦距800 mm,口径142.86 mm的sigma镜头;接收光学系统后使用相干公司光功率计以10 s积分时间进行测量(远大于光斑抖动周期),光斑拍摄用自制的LUPA300CMOS相机以150 Hz帧频进行。实验测量设置也如图2所示。

表1 外场湍流信道实测数据

Table 1 Metrical datum of turbulent channel outside

Channel/km	$\langle \alpha^2 \rangle / 10^{-10}$	$r / m$	$P_r / \mu W$
1.5	0.0941	0.6	75.63
8.4	8.78	3.5	5.00
88	92.0	2	0.025

表2 外场湍流信道分析数据

Table 2 The analytic datum of turbulent channel outside

Channel / km	$\Lambda / 10^{-5}$	$C_n^2 / 10^{-14}$	$\sigma_R^2$	$W / m$	$W_{LT} / m$	$P_R / mW$	$P_T / mW$	$\eta / \%$	$\eta_i / \%$	Classical method $\eta / \%$
1.5	39.8	0.3	0.334	0.8972	0.8975	14.70	70	21.10	35.44	17.06
8.4	7.12	5	130.8	5.0198	5.1192	32.70	69	47.39	91.49	37.22
88	0.680	5	9708	52.5788	67.9625	11.32	69	16.41	97.97	32.80

#### 3.2 实验结果分析

1)在部分经典透射率测量实例中,实验者还会在光斑范围内寻找功率最强点,这就能在一定程度上把收集光功率的位置靠近光斑重心;但是由于目测误差和大气存在闪烁效应,在实际操作中仍然存在较大的误差;且湍流大气光斑扩展的问题仍得不到解决。实验中由经典方案得到的大气透射率和本

文所提方案得到的结果相差较大,起伏关系不定。

2)由(5)式所示,已有的大气湍流下激光光斑扩展公式建立在 $\sigma_R^2$ 和 $\Lambda$ 的基础上,计算方便但不利于实际分析,现把长距离传输条件下的长期光斑扩展公式推导到 $C_n^2$ 和 $L$ 的基础上(结合测量结果,在长距离传输条件下满足 $L/F_0 \gg 1$ ):

$$W_{LT} \approx \begin{cases} W \sqrt{1 + 1.33(1.23k^{7/6}) \left\{ \frac{2}{kW_0^2} / \left[ \frac{1}{F_0^2} + \left( \frac{2}{kW_0^2} \right)^2 \right] \right\}^{5/6} (C_n^2 \cdot L) \sigma_R^2 \leq 1} \\ W \sqrt{1 + 1.62(1.23k^{7/6})^{6/5} \left\{ \frac{2}{kW_0^2} / \left[ \frac{1}{F_0^2} + \left( \frac{2}{kW_0^2} \right)^2 \right] \right\} (C_n^2 \cdot L)^{6/5} \sigma_R^2 > 1} \end{cases}, \quad (6)$$

由(6)式可以看出,激光光斑扩展与激光波长、激光光束的高斯参数、大气折射率结构参数和传输距离有关,前两者与设备参数有关,后两者决定于实际信道条件,传输距离随实验地点而定,大气折射率结构参数随时决定于大气信道。长距离信道长期扩展光斑的半径随着大气折射率结构参数和距离的增大而增大,由表2可见青海88 km信道的光斑扩展显然最为严重。

3)青海信道的风速起伏都比较大, $\langle \alpha^2 \rangle$ 和 $C_n^2$ 在长时间内也有较大的起伏。表2采用均值 $C_n^2 = 5 \times$

$10^{-14}$ ,但实际中较长时间内 $C_n^2$ 的起伏完全可能达到 $1 \times 10^{-13}$ 和 $2 \times 10^{-14}$ 的水平,由此计算青海88 km信道的长期光斑扩展半径分别为83.81 m和58.16 m,半径起伏超过1/3。可见在大气湍流影响起伏严重的信道,对大气透射率的测量必须考虑到光斑扩展的实时因素。

### 4 结 论

充分考虑到光斑能量分布的高斯特性和存在于实际大气信道中的湍流影响,对长距离自由信道大

气透射率测量的经典方法进行了修正,提出了湍流大气信道激光透射率测试新方法,并采用两种方法对上海和青海多条信道进行了测量和计算,得到以下结论:

1)在大气信道中由于湍流的存在,会使传输于其中的光束产生光束抖动、光强起伏和相位起伏等现象,接收端的光斑存在长期扩展效应,对大气透射率测量有严重的影响;

2)在实际中采用的大气透射率测量的经典方法,未考虑光斑能量分布和大气湍流影响,与实际情况存在差异,所得结果会对实际应用产生误导;

3)长期光斑扩展半径除受激光束参数影响外,还决定于传输距离和大气条件,在长距离强湍流信道中,光斑扩展情况严重,且随湍流变化而发生起伏;

4)上海市区夜间的 1 km 大气透射率不到 40%,青海湖夜间的 1 km 大气透射率在 90%以上;青海湖的透射率远高于上海,但湍流相对严重。

### 参 考 文 献

- 1 F. E. Goodwin. A review of operational laser communication systems[J]. *Proc. of the IEEE*, 1970, **58**(10): 1746~1752
- 2 A. Biswas, M. W. Wright, B. Sani et al.. Page. 45 km horizontal path optical link demonstration [C]. *SPIE*, 2001, **4272**: 60~71
- 3 Wang Xiangbin, Yin Hao, Ma Huaixin et al.. The security and recent technology of QKD[J]. *Physics*, 2006, **35**(2): 125~129  
王向斌,尹浩,马怀新等.量子保密通信的技术现状及安全性[J]. *物理*, 2006, **35**(2): 125~129
- 4 Ma Jing, Gao Chong, Tan Liying et al.. Fade budget of PAT link in satellit-to-groud optical communication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(3): 308~314  
马晶,高宠,谭立英等.星地光通信中PAT链路的衰落冗余[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(3): 308~314
- 5 R. K. Tyson. Bit-error rate for free-space adaptive optics laser communications[J]. *J. Opt. Soc. Am A*, 2002, **19**(4): 753~758
- 6 Yang Huizhen, Cai Dongmei, Chen Bo et al.. Analysis of adaptive optics techniques without a wave-front sensor and its application in atmospheric laser communications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 680~684  
杨慧珍,蔡冬梅,陈波等.无波前传感自适应光学技术及其在大气光通信中的应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 680~684
- 7 Yang Changqi, Jiang Wenhan, Rao Changhui. Impact of aperture averaging on bit-error rate for free-space optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 212~218  
杨昌旗,姜文汉,饶长辉.孔径平均对自由空间光通信误码率的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 212~218
- 8 Chen Chunyi, Yang Huaming, Jiang Huilin et al.. Performance analysis of large-aperture receiving and selection of aperture size in atmospheric optical communications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2957~2961  
陈纯毅,杨华民,姜会林等.大气光通信中大孔径接收性能分析与孔径尺寸选择[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2957~2961
- 9 Zhang Jun, Peng Chengzhi, Bao Xiaohui et al.. New progress on experimental quantum cryptography——experimental free-space distribution of entangled photon pairs over 13 km[J]. *Physics*, 2005, **34**(10): 701~707  
张军,彭承志,包小辉等.量子密码实验新进展——13 km 自由空间纠缠光子分发:朝向基于人造卫星的全球化量子通信[J]. *物理*, 2005, **34**(10): 701~707
- 10 Zang Shouhong, Bai Yunta, Ouyang Yi. Research on atmospheric transmittance measuring method [J]. *Infrared*, 2009, **30**(3): 26~29  
臧寿洪,白云塔,欧阳艺.大气透过率测量方法的研究[J]. *红外*, 2009, **30**(3): 26~29
- 11 Zhang Yixin, Wang Gaogang. Average intensity and short-term beam spread of a laser beam propagating in a slant-path atmosphere[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **36**(2): 167~170  
张逸新,王高刚.斜程大气传输激光束的平均光强与短期光束扩展[J]. *红外与激光工程*, 2006, **36**(2): 167~170
- 12 Xia Yun. Performance Analysis for Space-to-Ground Optical Communication System with Existence of Atmospheric Turbulence[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007, 23~52  
夏芸.大气湍流对星地光通信的影响及性能分析[D],杭州:浙江大学,2007, 23~52
- 13 L. C. Andrews, R. L. Phillips. Laser Beam Propagation through Random Media [Second Edition] [M]. Washington: SPIE Press, 2005: 199~207, 269~279, 369~379
- 14 L. C. Andrews, R. L. Phillips. Recent results on optical scintillation in the presence of beam wander[C]. *SPIE*, 2008, **6878**: 687802
- 15 Arnold Tunick. Optical turbulence parameters characterized via optical measurements over a 2.33 km free-space laser path[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(19): 14645~14654