

室外大气折射率结构常数实时测量研究*

陆泽辉^{1,2}, 郭振锋^{1,2}, 孟森森^{1,2}, 刘 波^{1,2,3},
刘海锋^{1,2,3}, 林 炜^{1,2,3}, 姚 远^{1,2}, 郭 盟^{1,2}

- (1 南开大学电子信息与光学工程学院现代光学研究所 天津 300350
2 天津市光电传感器与传感网络重点实验室 天津 300350
3 南方海洋科学与工程广东重点实验室(珠海) 珠海 519000)

摘要: 与传统的射频链路相比, 自由空间光通信 FSOC (Free Space Optical Communication) 系统是对现有无线通信技术的有力补充, 为了抑制大气湍流对信号光束带来的相位噪声和强度波动, 有必要对通信信道状况进行实时监测。首先介绍了基于光斑质心漂移的大气折射率结构常数测量方法, 利用大口径接收靶面和窄带滤光片, 结合实时图像处理算法, 实现了大气折射率结构常数的全天候实时监测。将大气折射率结构常数和光强闪烁指数进行了比较分析, 测量结果表明它们的包络之间具有很好的线性关系, 进一步验证了实时测量系统的可靠性。

关键词: 光通信; 折射率结构常数; 实时监测; 光强闪烁

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2022)04-0031-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211228002

引用格式: 陆泽辉, 郭振锋, 孟森森, 等. 室外大气折射率结构常数实时测量研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(4): 31-36.

Real time measurement of outdoor atmospheric refractive index structure constant

LU Zehui^{1,2}, GUO Zhenfeng^{1,2}, MENG Sensen^{1,2}, LIU Bo^{1,2,3}, LIU Haifeng^{1,2,3},
LIN Wei^{1,2,3}, YAO Yuan^{1,2}, GUO Meng^{1,2}

- (1. Institute of Modern Optics, College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Sensor and Sensing Network Technology, Tianjin 300350, China;
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhuhai 519000, China)

Abstract: Compared with the traditional radio frequency link, free space optical communications (FSOC) system is a powerful supplement to existing wireless communications technology. In order to suppress the phase noise and intensity fluctuation of signal beam caused by atmospheric turbulence, it is necessary to monitor the condition of channel link in real time. Firstly, the measurement method of atmospheric refractive index structure constant based on spot centroid drift is introduced. All-day real-time monitoring of atmospheric refractive index structure constant is realized by using large aperture receiving target and narrow band filter combined with real-time image processing algorithm. Refractive index structure constant and intensity scintillation index are compared and analyzed. The measurement results show that there is a good linear relationship between their envelopes, which further verifies the reliability of our real-time measurement system.

Key words: Optical communications; Refractive index structure constant; Real-time monitoring; Intensity scintillation

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211228002

Citation: LU Zehui, GUO Zhenfeng, MENG Sensen, et al. Real time measurement of outdoor atmospheric refractive index structure constant[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 31-36.

*基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1802302); 国家自然科学基金(61875091); 天津市高层次创新创业团队项目

通信作者: 刘波(liubo@nankai.edu.cn)

收稿日期: 2021-12-28 收修改稿日期: 2022-01-13

引 言

自由空间光通信 FSOC (Free Space Optical Communication) 技术作为不同于光纤通信技术的新型高速无线通信技术, 具有超过半个世纪的研究历史, 以光波作为载波在空间中实现高速无线通信, 在民用和军事环境中都有广泛的应用前景。FSOC 系统与传统的射频通信系统相比具有许多显著的优势, 包括高带宽、频谱资源丰富、适用于任何通信协议、低截获率, 是建设空间高速信息公路不可或缺的手段。与光纤通信技术相比, 具有低成本、快速部署无需铺设管线、有效载荷小等特点, 可以在空对地、空对空等光纤通信技术无法满足的场景下得到应用。同时, 随着人工智能、云计算、无人驾驶等新兴业务对网络带宽需求的激增, 现行微波通信受频率资源的限制已远不能满足未来宽带数据传输与中继的需求。因此, 在民用方面, FSOC 是解决物联网大数据时代海量数据传输瓶颈的最具竞争力的技术手段。同时在军事方面, FSOC 也是未来战场高速数据快速链路通信和“空天一体化通信网络”的核心技术, 是“十四五”时期乃至更长时间内的新一代通信技术竞争的新战场。

但是, FSOC 面临的一个基本问题是自由空间信道的不稳定性、随机性和不可控性, 其对系统性能起着至关重要的作用。以大气环境下的 FSOC 为例, 由地面和大气之间对流引起的大气湍流, 严重地影响着激光束的相位和振幅, 引起光束波前畸变、光强闪烁、质心漂移、到达角起伏等一系列效应^[1]。这些效应最终将导致光信号强度随机起伏幅度超过系统判决能力, 导致通信系统性能的急剧恶化, 严重时甚至将导致通信中断, 极大地限制了 FSOC 的传输距离和通信容量, 影响系统稳定性。

大气折射率结构常数是描述大气湍流状态最为重要的光学参数, 其随地理位置、高度、气象条件和昼夜条件等环境参量随机变化, 对于特定应用场景和环境, 其估算和精确测量方法是保证激光通信系统可靠性的重要前提, 对大气激光通信系统的研究具有重要意义。目前, 常见的仪器有利用光强闪烁效应反演折射率结构常数的大口径闪烁仪, 以及利用不同高度温差测量的温度脉动仪。文献[2]通过大口径闪烁仪和温度脉动仪分别测量了新疆戈壁地区地面折射率结构常数, 两者具有较好的相关性。文献[3]测量了成都和茂名两处的大气折射率结构常数, 发现由于地理位置和环境的差异, 大气光学参数也表现出不同的特征。

1 基于光斑质心漂移的大气折射率结构常数实时测量

1.1 测量方法

相较于温度脉动测量折射率, 基于光学参量的测量具有直接性。因此, 将通过光学手段对大气折射率结构常数 C_n^2 进行测量。对于时空随机变化的湍流介质中, 通常认为其折射率波动几乎完全是由温度的微小扰动引起的, 也就是说湿度和压力对湍流折射率变化的影响通常可以忽略不计。因此, Kolmogorov 的研究认为折射率涨落的空间功率谱的函数形式应与温度功率谱相同, 也就是在惯性子区间内折射率波动空间功率谱满足式 (1)^[4]:

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033C_n^2\kappa^{-11/3} \quad (1)$$

其中 κ 是空间频率。但是该模型理论上只在惯性子区间 $1/L_0 \ll \kappa \ll 1/l_0$ 上有效, 且通常假设外部尺度 L_0 是无限的, 而内部尺度 l_0 可以忽略不计, 因此实际上被广泛地使用在各个模型中。在 Kolmogorov 均匀且各项同性的湍流假设下, 利用 Rytov 微扰理论, 根据四阶矩函数可以得到以下结论, 当光束的对数振幅方差足够小时, 将由式 (2) 给出光强闪烁因子^[5]:

$$\sigma_I^2(L) = 8\pi k^2 L \int_0^1 \int_0^\infty \kappa \Phi_n(\kappa) \exp\left(-\frac{A L \kappa^2 \xi^2}{k}\right) \left\{ 1 - \cos\left[\frac{L \kappa^2}{k} \xi(1 - \bar{\Theta}\xi)\right] \right\} d\kappa d\xi \quad (2)$$

其中 k 是波数, L 是传输距离, $\bar{\Theta}$ 和 A 分别是高斯光束特征参数。对于平面波来说, 其高斯光束特征参数有 $\bar{\Theta} = 0$ 和 $A = 0$, 那么由式 (3) 给出此时的光强闪烁方差:

$$\sigma_I^2(L) = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{1/6} \quad (3)$$

在同样的假设和理论下, 也可以得到光束漂移的质心位移方差。光斑质心在水平方向和垂直方向的

漂移方差分别为 σ_x^2 和 σ_y^2 ，光斑质心位移方差 $\sigma_\rho^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$ 。若假设在水平方向和垂直方向漂移运动的统计特性是相互独立的，且在传播路径上湍流强度均匀，那么对于发射口径为 D 的准直光束，根据二阶矩函数，由式 (4) 可以得到光斑质心位移方差^[6]：

$$\sigma_\rho^2 = 2.03C_n^2 D^{-1/3} L^3 \tag{4}$$

故在测量系统参数已知的情况下，只需要知道光强闪烁方差和质心漂移方差即可得到当前空间链路下的大气折射率结构常数。

1.2 测量方案

实验设置如图 1 所示，实验地点为南开大学电光学院东楼，实验设备架设在离地 10 m 的楼层中庭，中庭长边水平距离约为 62.4 m。基于质心漂移和光强闪烁对大气折射率结构常数进行了实时测量。为了增加链路长度的同时减小由于发射激光器自身不稳定性带来的误差，在中庭的一端放置 50.8 mm 大口径反射镜（远大于光束直径），将有效链路长度增加至 124.8 m。值得注意的是，对于光强闪烁的测量方法，在强湍流或长距离的条件下，将会发生光强闪烁的饱和，此时对数振幅方差和光强闪烁方差不再是线性关系。

实验中激光器光源输出波长为 1 548.15 nm 连续光，发射功率约为 1 mW，通过单模光纤与 42.5 mm 口径准直器相连，输出准直空间光束出口直径约 14.5 mm。可以计算出光束对应的瑞利距离约 427 m。因此，在 124.8 m 的链路长度和有限接受孔径的实验条件下，我们后续可以将准直的激光束看作平面波来处理。对于光束质心漂移效应的测量，有研究表明，位置敏感二极管 PSD (Position Sensitive Diode) 和电荷耦合器件 CCD (Charge-Coupled Device) 相比，PSD 需有比 CCD 更高的灵敏度才能实现精确测量^[7]，而这一点通常很难满足，所以选择 CCD 相机作为测量仪器。

此外，由于 CCD 相机在 400 nm~2 200 nm（即可见-红外）波段均可工作，为了实现全天候尤其是白天的光束漂移和光强闪烁的实时测量，那么需要排除环境光照的影响。为了尽可能消除环境杂散光的影响，在 CCD 相机前放置了一个中心波长为 1 550 nm、带宽为 20 nm 的红外光滤波片，可以将大部分可见波段杂散光滤除。最后，接收端光束光斑的强度由 CCD 以 60 Hz 的采样率被实时记录，通过光斑质心和光强闪烁结合光在湍流中的传输理论的实时测量和处理得到每分钟的大气折射率结构常数。对于强度加权质心的测量，通过式 (5) 进行计算：

$$C_x = \frac{\sum_{x,y} xI(x,y)}{\sum_{x,y} I(x,y)}, C_y = \frac{\sum_{x,y} yI(x,y)}{\sum_{x,y} I(x,y)} \tag{5}$$

其中 $I(x, y)$ 为在笛卡尔坐标系 (x, y) 下 CCD 相机所记录的光斑强度值。

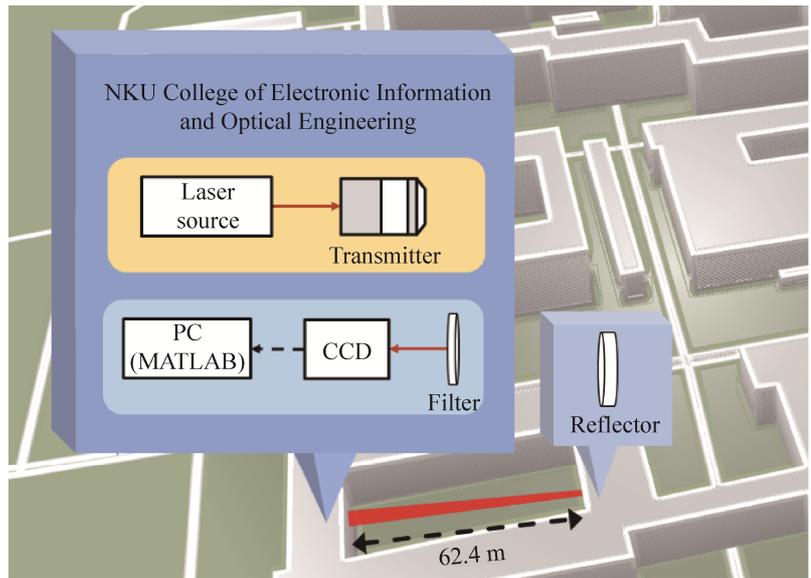


图 1 大气折射率结构常数测量方案示意图
Fig. 1 Schematic diagram of measuring scheme of atmospheric refractive index structure constant

2 实验结果

2.1 夜间、白天光斑质心漂移对比

大气湍流中的折射率起伏会导致光斑质心漂移、光束扩展、光强闪烁和到达角起伏等现象, 造成激光在传输过程中稳定性和相干性的降低, 影响大气激光通信系统的性能。为了对比不同湍流环境下的大气折射率结构常数测量结果, 分别在夜间 04:55 和白天 10:25 测量了信标光的质心漂移和光强起伏, 测量持续 1 min。如图 2 所示, 图中上方是夜间和白天的质心散点图, 由散点坐标计算出质心漂移方差分别为 $1.68 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 和 $2.66 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 。夜间光斑质心的横坐标漂移范围大致为 $50 \mu\text{m}$, 纵坐标漂移范围大致为 $80 \mu\text{m}$, 理想情况下光斑质心的漂移应满足高斯分布, 测量结果中水平和垂直方向上质心的运动状态不一致可能是由垂直方向上的风速引起的。当风速为 V 时, 根据泰勒的湍流冻结假设^[8], 在风速切线方向上会引入额外的质心运动。白天光斑质心的横、纵坐标漂移范围大约都为 $80 \mu\text{m}$, 质心漂移方差白天是夜间时的 1.58 倍。根据式 (4) 计算得到夜间 04:55~04:56 时间段的大气折射率结构常数为 $1.58 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$, 对应弱湍流环境; 白天 10:25~10:26 时间段的为 $1.09 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$, 对应中等湍流环境。这和先前 12 km 远距离 FSOC 通信系统的测量结果相符, 先前的 FSOC 通信数据表明, 夜间相较于白天 BER 更低, 相应的湍流强度较弱。

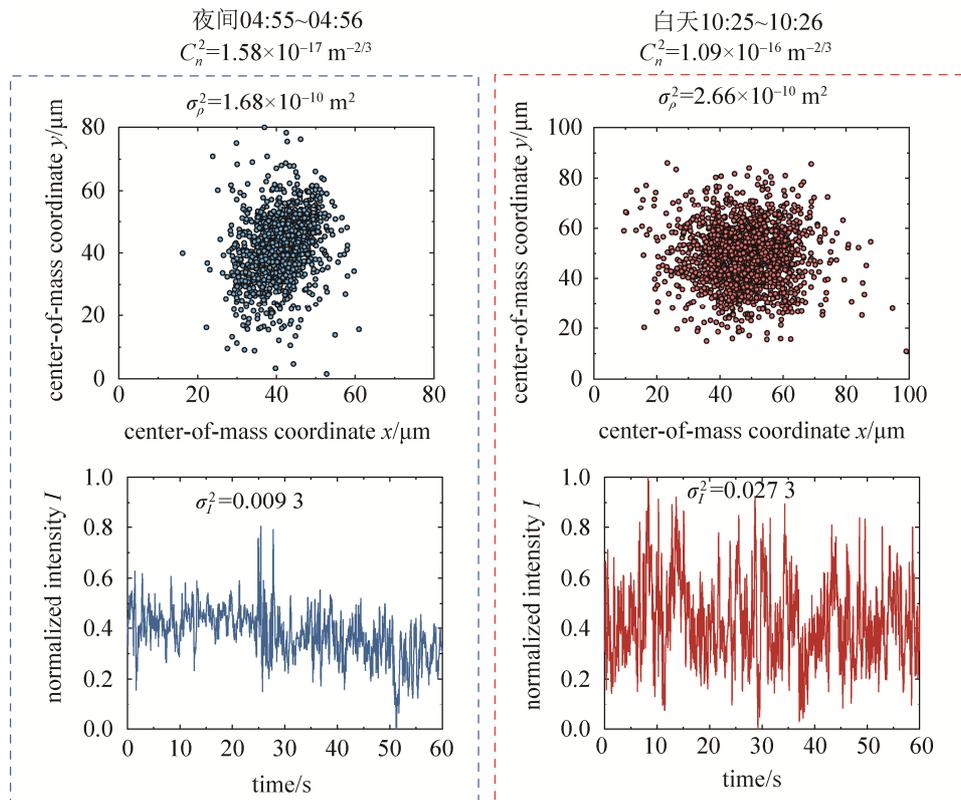


图 2 夜间和白天短时间内的测量结果

Fig. 2 Short-time measuring results during nighttime and daytime

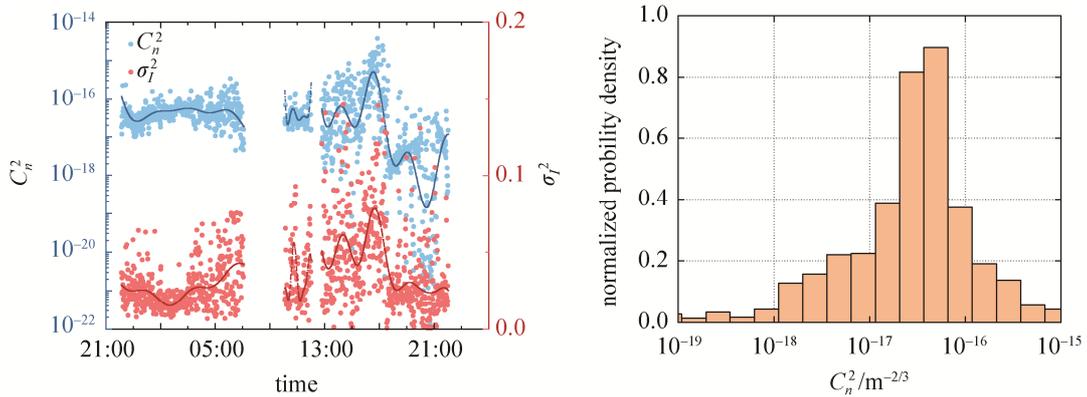
假设 CCD 对光强的灰度值响应是线性的, 对采集图像的灰度值进行求和, 将归一化的求和值等效为光强, 可以计算出一定时间内的光强起伏。图 2 下方绘出了夜间和白天的光强起伏曲线, 可以很明显地观察到白天的光强起伏比夜间时候剧烈, 这是因为白天空气中的温度梯度更大, 湍流的折射率分布相较于夜间更不

均匀。由样本方差公式 $\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ 得到, 夜间和白天的闪烁方差分别为 0.009 3 和 0.027 3。

2.2 实时测量结果

实时测量系统搭建在约 125 m 的 FSOC 通信链路上, FSOC 通信链路从南开大学电光学院东楼的一

侧到另一侧，再通过反射镜返回发射端。实时测量要求信标光束在数小时内不能脱离接收靶面，通过在 CCD 前放置一个大尺寸透镜（2 英寸）可以有效解决这个问题。大气折射率结构常数 C_n^2 和归一化光强闪烁指数 σ_I^2 在夜间和白天的实时测量结果已在图 3（a）中绘出，虚线部分表示四阶正弦拟合曲线。实时测量分别在两个时间段进行，分别为 22:00~07:00 和 10:00~22:00，其中 12:00~12:47 时间段的缺失是由实验链路被人为破坏造成的。22:00~07:00 的折射率结构常数 C_n^2 维持在 10^{-17} 到 10^{-16} 量级，属于弱湍流范畴；10:00~22:00 时间段的折射率结构常数 C_n^2 在 10^{-19} ~ 10^{-15} 量级，曲线起伏较为剧烈，覆盖了弱湍流和中等湍流范畴。尽管已经通过 1 550 nm 窄带滤波片尽可能地消除白天环境光对光电探测器的影响，但是这种影响并不能完全消除，再加上 CCD 长时间曝光后底噪的增加，这些因素造成了 C_n^2 测量值在 16:40 左右的时间点出现了下跌，而后又在 20:00 左右出现回弹。因此在白天的测量结果中，10:00~16:40 时间段的测量数据可信度更高，这一时间段的 C_n^2 测量值处于 10^{-17} ~ 10^{-15} 量级。



(a) 大气折射率结构常数（蓝色）和归一化光强闪烁指数（红色）
 (a) Refractive index structure constant(blue) and normalized scintillation index(red)
 (b) 全天大气折射率结构常数测量值的归一化概率密度直方图
 (b) Normalized probability density histogram of measurements for a whole day

图 3 实时测量结果

Fig. 3 Real-time measuring results

对比大气折射率结构常数和归一化光强闪烁指数的四阶正弦拟合曲线，可以发现它们的包络具有一定的相似性，其中白天测量结果的包络相似性尤为明显。对于理想平面波，在弱湍流近似下，闪烁指数和折射率结构常数之间的关系可由式（3）描述，它们拟合曲线包络的相似性很好地说明了式（3）、式（4）所表述的线性关系。全天大气折射率结构常数测量值的归一化概率密度直方图如图 3（b）所示，显示出明显的单峰特征。计算得出整个直方图中大气折射率结构常数测量值的中位数为 $3.39 \times 10^{-17} m^{-2/3}$ ，平均值为 $2.63 \times 10^{-17} m^{-2/3}$ ，这对于陆地 FSOC 路径来说是相对较低的，属于较弱湍流链路环境。

3 结束语

基于信标光束的光斑质心漂移，搭建了一套大气折射率结构常数实时测量系统，成功用于 125 m 空间范围内的大气湍流强度测量。利用大口径接收靶面和窄带滤光片，使得测量系统能够长时间工作，保证了大气折射率结构常数的鲁棒性。基于实时图像处理算法，在接收端实现了大气折射率结构常数的实时测量、采集。最后，将大气折射率结构常数和归一化光强闪烁指数进行了比较分析，全天的测量结果表明，它们的包络之间具有很好的线性关系。

参考文献

[1] 艾葳, 崇元, 王玉坤. 海域条件下激光通信大气折射率结构常数测量方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(25): 182-187.
 AI Wei, CHONG Yuan, WANG Yukun. Measurement method of atmospheric refractive index structure parameter for

- offshore laser communication[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(25): 182–187.
- [2] 封双连, 张志刚, 强希文, 等. 戈壁地区近地面大气折射率结构常数的统计分析[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1): 39–42.
FENG Shuanglian, ZHANG Zhigang, QIANG Xiwen, et al. Statistical analysis of atmospheric refractive index structure constant near ground in Gobi region[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1): 39–42.
- [3] 徐春燕, 詹国伟, 青春, 等. 陆地和近海面大气光学湍流估算与测量[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(2): 21–25.
XU Chunyan, ZHAN Guowei, QING Chun, et al. Estimation and measurement of optical turbulence over land and offshore[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(2): 21–25.
- [4] 马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 测量大气折射率结构常数的大口径激光闪烁仪[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 898–902.
MA Xiaoshan, ZHU Wenyue, RAO Ruizhong. Large aperture laser scintillometer for measuring the refractive index structure constant of atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(6): 898–902.
- [5] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. Spie Press, 2005.
- [6] 王元博. 激光大气传输特性及实验研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [7] MANNING S, CLARE B A, GRANT K J, et al. Development and implementation of a robust angle of arrival turbulence measurement system[J]. Optical Engineering, 2015, 54(11): 114104.
- [8] TAYLOR G I. The spectrum of turbulence[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences (1934–1990), 1938, 164(919): 476–490.

[作者简介]

- 陆泽辉 1999 年生, 博士研究生, 主要研究方向为自由空间光通信和特种光束设计及关键技术。
郭振锋 1998 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为自由空间光通信和时频传递。
孟森森 1997 年生, 硕士, 主要研究方向为光通信和时频传递系统设计及关键技术。
刘 波 1975 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为现代光通信、光纤传感和时频传递。
刘海锋 1986 年生, 博士, 实验师, 主要研究方向为光纤传感和光纤通信。
林 炜 1988 年生, 博士后, 讲师, 主要研究方向为光纤光子学和全息技术。
姚 远 1991 年生, 博士后, 主要研究方向为集成光学与光通信传感技术。
郭 盟 1992 年生, 博士研究生, 主要研究方向为光通信技术。

(本文编辑: 傅 杰)