

光波前向散射闪烁相关法测量光传播路径横向风速廓线

苑克娥, 吕炜煜, 郑李楠, 胡顺星, 黄 见, 曹开法, 徐之海

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

摘要 光传播路径横向风速风向的准确测量, 对于科学研究和工程应用都具有重要意义。哈特曼传感器用来接收光波大气传输前向散射的波前和光强信息, 提出利用哈特曼传感器接收的前向散射光强闪烁相关信息, 实现路径横向风速廓线测量的方法。理论推导给出了光传播路径上横向风速分段反演的公式。根据不同的子孔径间距路径权重函数的差异, 针对不同子孔径间距对路径不同位置的敏感性, 分析了如何合理的选取光传播路径横向风速廓线的权重函数。利用哈特曼传感器开展了水平 1 000 m 光传输路径横向风速的探测实验。初步研究结果表明, 哈特曼传感器测量的路径横向平均风速与接收端附近的风速计测量的结果具有较好的一致性; 得到的两段路径横向风速的分布在随时间的变化趋势上一致性较好, 特殊的下垫面布局使得靠近光源的第一段路径与靠近探测器的第二段路径的平均横向风速分别为 1.273 和 0.952 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。将第二段横向风速与路径横向平均风速的测量结果进行了相关性分析, 具有一致的变化趋势, 两者的相关系数达 0.86。

关键词 闪烁相关; 哈特曼传感器; 路径横向平均风速; 路径横向风速廓线

中图分类号: P427.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2014)07-1780-05

引言

风是大气运动的直接反映, 是由许多时空上随机变化的微小尺度脉动叠加在不同时空尺度气流上的一种三维矢量, 对于大尺度实际上竖直方向上的分量很小, 故一般将风看成是水平方向上的两维矢量来考虑, 即用风速和风向来表示。风速指的是单位时间内空气移动的水平距离, 其常用单位是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ [1,2]。风不仅对大气物质和能量的输送起着重要作用, 也是大气中各种对象传输或运动的重要影响因素[3]。路径横向风速在激光大气传输和天文成像应用中有很大的意义, 在激光大气传输中是制约光波特性和确定相干时间的重要参量, 在天文高分辨光学成像技术中, 合理的选择曝光时间必须了解光传输路径上的横向风速[4-6]。因此, 进行路径横向风速的探测对于科学研究和工程应用都具有重要意义。

目前对于横向风速的测量有多种方法。水平传输而言, 可以在测量光路上利用超声风速计测量多个点上的风速、风向, 然后求取平均风速。斜程传输而言, 可以利用多普勒测风雷达或者相干测风激光雷达进行测量[7]。也有学者通过图像的抖动频谱等方法进行测量, 但他们的的方法侧重于诸多理

论上的假定[8]。所以总体而言, 这些方法要么设备造价昂贵、维护成本高, 要么测量不够准确或者难以实现。国外科研工作者从理论上提出了利用时空间闪烁相关法来反演光波路径上横向平均风速的方法[9-12], 国内的苑克娥等利用常规用于畸变波前探测的哈特曼传感器[13,14]子孔径上探测的光强起伏相关信息, 实现了光波路径上横向平均风速的实验探测[15], 利用该方法得到的结果与路径上风速计测量的横向风速无论在数值上还是随时间的变化趋势上都具有较好的一致性, 实验拟合的相关系数大于 0.8。有时为了研究需要, 人们更希望能够准确的得到光传播路径上横向风速的廓线分布, 在以上前人工作的基础上, 本文提出利用哈特曼传感器探测的激光大气前向散射闪烁相关信息, 通过合理的路径权重函数的选取, 实现了光传播路径上分段横向风速分布的反演。

1 路径横向风速探测的原理

光波在大气中传播受大气折射率的随机起伏, 光路上归一化的光强起伏(闪烁)时空间交叉相关函数与大气状态及光波参数之间的关系表达式满足

收稿日期: 2013-09-13, 修订日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41005015), 中国科学院知识创新方向性项目(KJCX2-EW-N07)资助

作者简介: 苑克娥, 女, 1979年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所副研究员 e-mail: keyuan@aiofm.ac.cn

$$b(r, t) = \frac{\int_0^L dz \int_0^\infty J_0(\kappa |r\gamma - vt|) \sin^2\left(\frac{\kappa^2 \gamma(L-z)}{2k}\right) \Phi_n(\kappa) \kappa \left[\frac{2J_1(\gamma kd/2)}{\gamma kd/2}\right]^2}{\int_0^L dz \int_0^\infty \sin^2\left(\frac{\kappa^2 \gamma(L-z)}{2k}\right) \Phi_n(\kappa) \kappa \left[\frac{2J_1(\gamma kd/2)}{\gamma kd/2}\right]^2} \quad (1)$$

其中 r 为光路截面上的空间间距, 对应着探测器的孔径间距, v 为路径上 z 处的横向风速, t 为空间 r 间距上信号的时间延迟, κ 为大气湍流空间波数, $\gamma = z/L$ 为归一化的路径因子, d 为探测器空间尺寸, $\Phi_n(\kappa)$ 为湍流折射率起伏三维频谱, $J_0(x)$ 和 $J_1(x)$ 分别为第 0 阶和第 1 阶贝塞尔函数。利用空间闪烁相关信息实现路径横向风速的测量, 需要将式(1)对时间延迟求偏导数并取时间延迟为 0 即 $t=0$, 可得归一化时间延迟互相关函数(简称互相关零延迟斜率)在 0 处的导数的表达式

$$f(r) = \frac{\int_0^L dz W(z) v(z)}{\int_0^L dz \int_0^\infty d\kappa \kappa^{-8/3} \sin^2\left(\frac{\kappa^2 z(L-z)}{2kL}\right) \left[\frac{2J_1(\kappa zd/2L)}{\kappa zd/2L}\right]^2} \quad (2)$$

式中路径权重函数满足

$$W(z) = \int_0^\infty d\kappa \kappa^{-5/3} J_1(\kappa rz/L) \cdot \sin^2\left(\frac{\kappa^2 z(L-z)}{2kL}\right) \left[\frac{2J_1(\kappa zd/2L)}{\kappa zd/2L}\right]^2 \quad (3)$$

文献[16]详细介绍了由公式(2)测量路径横向平均风速的原理和方法。进一步从式(2)还可以看出, 不同的空间间距 r 对应着不同的路径权重, 例如假设 $d=6.667 \text{ mm}$ 得到的路径权重函数随归一化路径因子的变化如图 1 所示, 图中分别给出了 $r=d, 2d, 3d$ 间距的情况, 从图 1 可以看出, 空间间距等于单倍探测器空间尺寸时, 权重函数对路径中部敏感, 空间间距等于两倍探测器空间尺寸时, 权重函数对路径发射端位置敏感, 而空间间距等于三倍探测器空间尺寸时, 权重函数对路径接收端位置敏感, 由此通过调节探测器之间的间距, 可以获得相关敏感位置上的路径横向风速的信息, 横向风速的方向沿着两探测器的连线。将路径分为两段, 并定义光源离路径中点的一段为第一段, 路径中点至探测器所在位置为第二段。

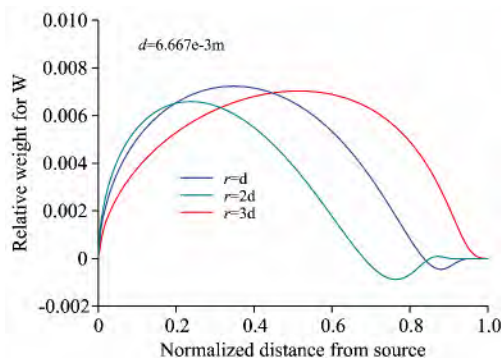


Fig 1 Weighting function of transverse wind velocity as a function of normalized path

利用空间间距分别为 $r=d, 2d, 3d$ 的三对子孔径对实现两段路径横向风速分布的探测, 于是式(2)重写为

$$\begin{pmatrix} f(d) \\ f(2d) \\ f(3d) \end{pmatrix} = \frac{\Delta z}{C_0} \begin{pmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \\ W_{31} & W_{32} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} v(z1) \\ v(z2) \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中 $(f(d), f(2d), f(3d))$ 可以由实验结果获得, 常数 $C_0 = \int_0^L dz \int_0^\infty d\kappa \kappa^{-8/3} \sin^2\left(\frac{\kappa^2 \gamma(L-z)}{2k}\right) \left[\frac{2J_1(\gamma kd/2)}{\gamma kd/2}\right]^2$, 重构矩阵的表达式为

$$\begin{pmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \\ W_{31} & W_{32} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} \int_{0.5}^1 d\gamma \int_0^\infty d\kappa \kappa^{-8/3} J_1(\kappa d\gamma) \sin^2\left(\frac{\kappa^2 L\gamma(L-\gamma)}{2k}\right) \left[\frac{2J_1(\gamma kd/2)}{\gamma kd/2}\right]^2 \\ \int_{0.5}^1 d\gamma \int_0^\infty d\kappa \kappa^{-8/3} J_1(\kappa 2d\gamma) \sin^2\left(\frac{\kappa^2 L\gamma(L-\gamma)}{2k}\right) \left[\frac{2J_1(\gamma kd/2)}{\gamma kd/2}\right]^2 \\ \int_{0.5}^1 d\gamma \int_0^\infty d\kappa \kappa^{-8/3} J_1(\kappa 3d\gamma) \sin^2\left(\frac{\kappa^2 L\gamma(L-\gamma)}{2k}\right) \left[\frac{2J_1(\gamma kd/2)}{\gamma kd/2}\right]^2 \end{pmatrix}$$

可以利用数值积分求得。

哈特曼传感器具有较高的时间和空间分辨率, 能实时的动态的对光波相位起伏和闪烁效应同时进行测量^[16], 该传感器如同若干个探测器阵列, 通过统计任意间距的两个子孔径对之间的光强信号随时间的起伏即可得到归一化时间延迟交叉相关系数, 这样可以得到任意空间间隔和时间延迟情况下的交叉相关系数, 结合前面的理论分析可以实现光传播路径横向风速廓线的实验探测。

2 探测系统

利用哈特曼传感器的测量数据反演水平 1 000 m 路径上横向风速的廓线分布, 实验光路如图 2 所示。整套光路包括三部分即光源发射装置、哈特曼传感器探测装置以及用于数据存储和处理的计算机, 光源为半导体激光器, 发出中心波长为 $0.660 \mu\text{m}$ 、发散角约 2 mrad 发散光束, 光束经过水平 1 000 m 的湍流大气和横向风速的扰动到达接收端, 接收装置为口径为 120 mm 的哈特曼传感器, 其子孔径数目为 18×18 阵列, 这样每个子孔径的等效口径约为 $d=6.667 \text{ mm}$ 。哈特曼传感器上子孔径阵列的布局见图 3 所示, 这里规定自左往右的方向为 x 轴的正方向, 自上往下的方向为 y 轴的正方向, 所要测量的横向风速沿着与 x 轴平行的方向, 实验获得与 x 轴平行的方向上不同间距的子孔径对之间的闪烁相关信息, 代入式(4), 可以得到光传播路径上不同分段位置的横向风速大小, 横向风速的正(负)表示与 x 轴正(负)方向一

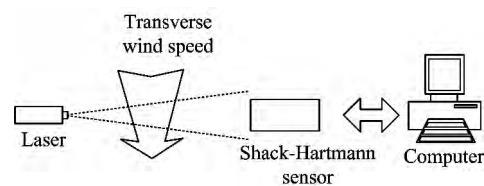


Fig 2 Schematic diagram of experimental setup

致。同时为了避免光束边缘效应带来的测量误差，实验中只利用网格上黑色区域内的子孔径对之间的光强进行横向风速的测量。

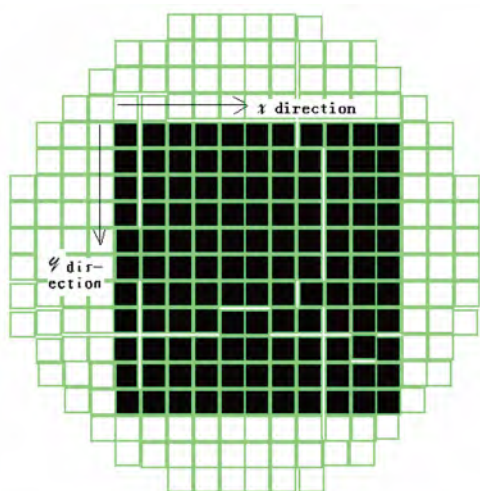


Fig 3 The spatial layout of the sub-apertures of Hartmann wavefront sensor

3 结果与讨论

实验选择在晴朗的天气状况下开展，时间为 2012 年 5 月 9 日至 10 日、5 月 21 至 5 月 22 日，哈特曼传感器的采样频率为 955 Hz，连续采集 3 000 帧数据获得一个风速结果，即约每 3.1 min 累加统计一组结果，间隔 5 min 进行下一组采集。

3.1 路径横向平均风速的测量结果

图 4 为哈特曼传感器测量的路径横向平均风速随时间的变化，为了对比验证结果的可靠性，图中给出了光路接收端附近 10 高米铁塔上风速计同时测量的水平风速随时间的变化。图中曲线 a 为传感器测量的 1 000 m 传播路径上横向平均风速，曲线 b 为铁塔上风速计测量的水平风在传感器光路横向方向的分量。可以看出，两仪器测量的横向风速在数值上有微小差异，但在变化趋势上基本一致，而且二者测量的风向也基本一致。由于传感器测量的是整个传输路径上横向风速的平均值，而铁塔风速计给出的是靠近接收端单点位置上的水平风速在光路横向方向的分量，两者之间存在微小的

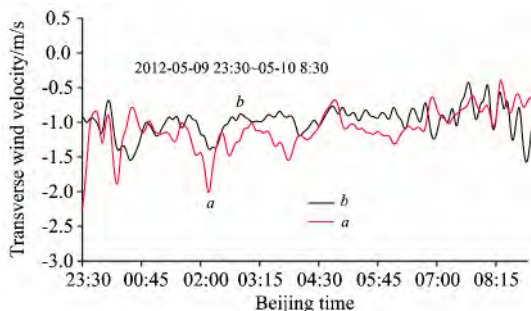


Fig 4 Path transverse averaged wind velocity from Hartmann wavefront sensor, compared with the results from the anemometer

差异是合理的。

3.2 路径横向风速廓线的测量结果

根据前面介绍路径横向风速廓线反演的的方法，利用不同间距子孔径对之间的闪烁相关数据，将水平 1 000 m 光路均分为两段，初步进行了路径横向风速廓线反演的测量，图 5 给出了 5 月 21 日—22 日的实验结果，图中曲线 a 为第一段横向风速的时间序列，曲线 b 为第二段横向风速的时间序列。

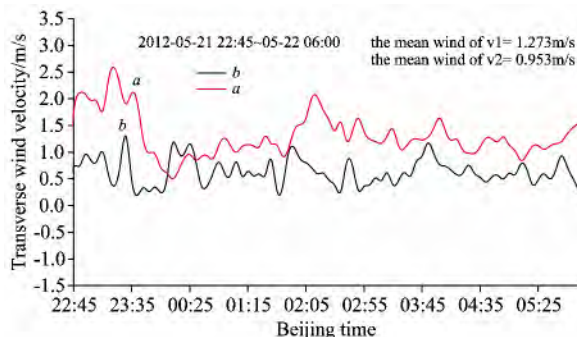


Fig 5 The results of path transverse wind velocity profile

a: shows the result of the first stage;
b: shows the result of the second stage

从上述初步的实验结果可以看出，第一段与第二段路径上横向风速的时间序列在趋势上基本一致，其方向也基本相同；第一段横向风速在数值上大于第二段风速，在整个测量阶段前者的平均值为 $1.273 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，而后的平均值则为 $0.952 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。原因分析如下：这与光路下垫面的不同密切相关，因为光源位于开阔的湖面上，近场区域几乎全为湖面，远场区域大部分为草丛、陆地，加之接收端附近楼群的阻挡，使得第二段上横向风速明显小于第一段是合理的，同时，从图中还可以看出本次测量得到的横向风速的方向与规定的正方向一致。初步的实验结果表面利用哈特曼传感器进行光传播路径上横向风速廓线的反演是可靠和可行的。

3.3 路径横向平均风速与路径横向风速廓线的相关性分析

将路径横向平均风速与第二段同时测量的结果进行了相关性分析，对比结果显示在图 6 中，纵坐标对应着整个路径

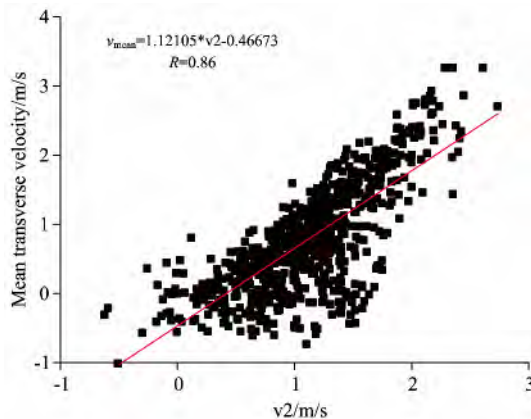


Fig 6 The correlation analysis between the path transverse averaged wind velocity and the second stage wind velocity

上的横向平均风速,横坐标对应着第二段路径上的风速信息,可以看出两者满足 $y=1.12x-0.46$,由此表明平均风速大于第二段路径上的风速,这与前面的分析相一致,两者的相关系数达 0.86,表明具有较好的相关性。

4 结 论

在光波大气传输和天文成像等领域,准确的测量路径横向风速的分布具有重要意义。本文提出利用哈特曼传感器不同间距的子孔径对之间闪烁相关实现光传播路径横向风速廓线测量的方法,分析了如何合理的选取反演风速廓线的路径

权重函数。利用实验室现有的设备条件开展了水平 1 000 m 的光传输实验,得到了路径横向平均风速随时间的变化,并将结果与风速计同时测量的结果进行了对比,发现二者吻合的较好。同时得到了路径上横向风速的两段廓线,结果表明两段路径上横向风速的时间序列在趋势上基本一致,其方向也基本相同,在数值上第一段横向风速大于第二段风速,在整个测量阶段前者的平均值为 $1.273 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而后的平均值则为 $0.952 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,结合实际传输下垫面对实验结果的合理性进行了解释,并将第二段路径上的横向风速与整个路径上的平均风速的结果进行了线性拟合,相关系数达 0.86。

References

- [1] SONG Zheng-fang(宋正方). Applied Atmospheric Optics(应用大气光学基础). Beijing: Meteorological Press(北京:气象出版社), 1988. 213.
- [2] Gao Shuang, Maurice O'Sullivan, Hui Rongqing. Optics Express, 2012, 20(23): 25867.
- [3] SHENG Wen-ping, YU Gui-rui, FANG Hua-jun, et al(盛文萍,于桂瑞,方华军,等). Chinese Journal of Ecology(生态学杂志), 2010, 29(8): 1671.
- [4] WU Dui(吴兑). Greenhouse Gases and Greenhouse Effect(温室气体与温室效应). Beijing: Meteorological Press(北京:气象出版社), 2001. 278.
- [5] LÜ Bai-da(吕百达). Propagation and Control of High Power Lasers(强激光的传输与控制). Beijing: National Defence Industry Press(北京:国防工业出版社), 1999. 253.
- [6] RAO Rui-zhong(饶瑞中). Modern Atmospheric Optics(现代大气光学). Beijing: Science Press(北京:科学出版社), 2012. 454.
- [7] Armstrong R L, James B Mason, Teddy Barber. Applied Optics, 1976, 15(11): 2891.
- [8] HUANG Hong-hua(黄宏华). China Patent No: CN101017178, 2006.
- [9] Koep F R, Schweissow R L, Werner C. J. Climate Appl. Meteor., 1984, 23(1): 148.
- [10] Briggs B H, Phillips G J, Shinn D H. Proc. Phys. Soc. B, 1950, 63(106): 106.
- [11] Lawrence R S, Ochs G R, Clifford S F. Applied Optics, 1972, 11(2): 239.
- [12] Wang Tingi, Ochs G R, Lawrence R S. Applied Optics, 1981, 20(23): 4073.
- [13] LIU Dan, YAN Yan, REN Bing-qiang, et al(刘丹,闫岩,任冰强,等). High Power Laser and Particle Beams(强激光与粒子束), 2005, 17(9): 1377.
- [14] Levine B M, Martinsen E A, Wirth A, et al. Applied Optics, 1998, 37(21): 4553.
- [15] YUAN Ke-e, ZHU Wen-yue, HUANG Yin-bo, et al(苑克娥,朱文越,黄印博,等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2009, 29(2): 303.
- [16] YUAN Ke-e, ZHU Wen-yue, RAO Rui-zhong(苑克娥,朱文越,饶瑞中). Acta Optica Sinica(光学学报), 2008, 28(9): 303.

Measurement of Path Transverse Wind Velocity Profile Using Light Forward Scattering Scintillation Correlation Method

YUAN Ke-e, LÜ Wei-yu, ZHENG Li-nan, HU Shun-xing, HUANG Jian, CAO Kai-fa, XU Zhi-hai

Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract A new method for path transverse wind velocity survey was introduced by analyzing time lagged covariance function of different separation sub-apertures of Hartmann wavefront sensor. A theoretical formula was logically deduced for the light propagation path transverse wind velocity profile. According to the difference of path weighting function for different sub apertures spacing, how to select reasonable path weighting functions was analyzed. Using a Hartmann wavefront sensor, the experiment for measuring path transverse velocity profile along 1 000 m horizontal propagating path was carried out for the first time to our knowledge. The experiment results were as follows. Path transverse averaged velocity from sensor had a good consistency with transverse velocity from the wind anemometer sited near the path receiving end. As the path was divided into two sections, the

path transverse velocity of the first section had also a good consistency with that of the second one. Because of different specific underlying surface of light path, the former was greater than the later over all experiment period. The averaged values were 1.273 and 0.952 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ respectively. The path transverse velocity of second section and path transverse averaged velocity had the same trend of decrease and increase with time. The correlation coefficients reached 0.86.

Keywords Scintillation correlation; Hartmann wavefront sensor; Path transverse averaged wind velocity; Path transverse wind velocity profile

(Received Sep. 13, 2013; accepted Jan. 20, 2014)

《光谱学与光谱分析》期刊社决定采用 ScholarOne Manuscripts 在线投稿审稿系统

《光谱学与光谱分析》期刊社与汤森路透集团签约,自 2010 年 12 月 1 日起《光谱学与光谱分析》决定采用 Thomson Reuters 旗下的 ScholarOne Manuscripts 在线投稿审稿系统。

- ScholarOne Manuscripts, 该系统不仅能轻松处理稿件,而且能提速科技交流。

- 全球已有 360 多家学会和出版社的 3 800 多种期刊选用了 ScholarOne Manuscripts 系统作为在线投稿、审稿平台,全球拥有超过 1 350 万的注册用户,代表着全球学术期刊在线投审稿的一流水平。

- ScholarOne Manuscripts 与 EndNote, Web of Science 无缝链接和整合;使科研探索、论文评阅和信息传播效率大为提高。

- ScholarOne Manuscripts 是汤森路透科技集团的一个业务部门,拥有丰富的学术期刊业务经验,为学术期刊提供综合管理 workflow 系统,使期刊更有效管理投稿、同行评审、加工和发表过程,提高作者心中的专业形象,缩短论文发表时间,削减管理成本,帮助期刊提高科研绩效和实现学术创新。

《光谱学与光谱分析》采用“全球学术期刊首选的在线投稿审稿系统—ScholarOne Manuscripts”,势必对 2010 年 11 月 30 日以前向本刊投稿的作者在查阅稿件信息时,会带来某些不便,在此深表歉意!为了推进本刊的网络化、数字化、国际化进程,以实现与国际先进出版系统对接;为了不断提高期刊质量,加快网络化、数字化建设,加快与国际接轨的进程,希望能得到广大作者、读者们的支持与理解,对您的理解和配合深表感激。这是一件新事物,肯定有不周全、不完善的地方,让我们共同努力,不断改进和完善起来。

《光谱学与光谱分析》期刊社

2010 年 12 月 1 日