

跟踪移动信标并实时计算斜程路径大气相干长度的差分像运动测量装置

徐鹏¹ 汪建业¹ 邵慧^{1,2} 吴毅¹ 李广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安徽建筑工业学院电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要 介绍了一种能够跟踪移动信标的新型大气相干长度测量系统。系统使用遗传算法与区域加宽迭代质心算法结合而成的新算法处理差分运动图像, 实时计算移动目标脱靶量与光波到达角起伏方差, 实现了跟踪测量的功能。测量实验中, 利用飞行高度为35 km的平流层气球搭载的碘钨灯作为光源, 实时测量了斜程传输路径上的大气相干长度值。与此同时, 在距离新仪器5 m处放置了一台以太阳的边缘作为光源、测量整层大气相干长度的大气相干长度仪进行对比测量。对比结果表明, 两组测量数据具有较好的相关性。据此初步分析与讨论了利用激光导星技术主动探测整层大气相干长度的可行性。

关键词 大气光学; 大气相干长度; 图像处理; 传输路径

中图分类号 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.030103

DIMM System for Tracking Motion Target and Calculating the Atmospheric Coherence Length along Slant Propagation Path

Xu Peng¹ Wang Jianye¹ Shao Hui^{1,2} Wu Yi¹ Li Guang¹

(¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)
²School of Electronic and Information Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract A new differential image motion monitor (DIMM) system for measuring atmospheric coherence length which can track motion target is developed. The system uses a new algorithm which is composed of genetic algorithm and iterative centroid algorithm to process differential image and calculate the offset of the target and the covariance of the angle-of-arrival fluctuation in realtime. So, it can track motion targets and measure the atmospheric coherence length. In experiment, we use a halogen lamp tied in a stratosphere balloon at the altitude of 35 km as the lamp-house to measure the atmospheric coherence length along slant propagation path. Simultaneously, we put another instrument 5 m away from the new system which selects the solar limb as the lamp-house to measure the total layer atmospheric coherence length. The result indicates a linear correlation between the two groups of data. At last, we analyze and discuss the feasibility of a method which can use laser guide star to measure the total layer atmospheric coherence length.

Key words atmospheric optics; atmospheric coherence length; image processing; propagation path

OCIS codes 010.1290; 010.1330; 100.2000

1 引言

1965年, Fried^[1]在 Rytov 与 Kolmogoroff 的理论基础上定义了一个与相位结构函数有关的量 r_0 , 后来

收稿日期: 2011-08-10; 收到修改稿日期: 2011-10-18; 网络出版日期: 2011-12-23

基金项目: 国家 863 计划(2006AA861062)资助课题。

作者简介: 徐鹏(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事大气湍流光学测量方面的研究。E-mail: xup@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 汪建业(1966—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气湍流光学测量方面的研究。

E-mail: jywang@aiofm.ac.cn

被人们称作 Fried 常数或大气相干长度。大气相干长度是定量描述大气湍流的重要参数之一,它表征了光波在湍流大气中的空间相关性,常应用于自适应光学、激光大气传输和天文台选址等研究领域。

对于大气相干长度的测量,目前国际上普遍采用差分像运动法(DIMM)。DIMM 的思想最早由 Stock 等^[2]于 1960 年提出,并用于大气视宁度的定性分析。1975 年,Fried^[3]从理论上推导出了差分到达角起伏的方差公式,奠定了使用 DIMM 方法测量大气相干长度的基础。20 世纪 80 年代初,欧洲南方天文台(ESO)开始建造使用 DIMM 方法测量大气相干长度的仪器(简称为相干长度仪),Roddiere 等^[4,5]根据 Fried 的理论对其测量理论进行了总结,并使用该仪器测量了 ESO 的整夜整层大气相干长度;1988 年,Waldie 等^[6]在美国国家新技术望远镜(NNTT)选址工作中全天观测恒星,测量了整层大气相干长度。值得一提的是,Waldie 等^[7]的计算公式中出现了一个原则性的错误,而此公式又被国内学者广为引用,因此许多大气相干长度测量数据使用了错误的计算公式, r_0 明显偏大,但这种错误并没有明显影响 r_0 的变化趋势,而且可以通过除以 1.4 来近似地得到真实的 r_0 值^[7]。随后,刘忠等^[8,9]研制了太阳差分像运动大气相干长度仪(SDIMM),解决了白天使用恒星作为光源信噪比较低的问题。2004 年,汪建业等^[10]研制成功日夜两用型大气相干长度仪,并于 2005 年提出了一种测量斜程路径上大气相干长度的方法^[11],使大气相干长度仪的应用领域得到拓展。但在激光工程的应用中,希望实时获得空中移动目标与观测点之间的斜程路径上的大气相干长度值,这对大气相干长度测量方法提出了新的要求。

为此,我们研制了一种能够自动跟踪移动目标测量斜程路径上大气相干长度的系统,于 2010 年利用 35 km 高空平流层气球搭载的信标光源完成了跟踪测量实验。本文报道该实验结果,并利用与大气相干长度仪测量整层大气相干长度的结果的对比,探讨将该系统用于探测整层大气相干长度的可行性。

2 计算公式

由于 Waldie 等^[6]的公式中有原则性的错误,本文从 Roddiere 等^[4,5]的理论出发,重新推导并给出 DIMM 的计算公式:

$$r_{01} = \left[\frac{2\lambda^2 f^2 (0.179D^{-1/3} - 0.097d^{-1/3})}{\rho_i^2} \right]^{3/5}, \quad (1)$$

$$r_{0t} = \left[\frac{2\lambda^2 f^2 (0.179D^{-1/3} - 0.145d^{-1/3})}{\rho_t^2} \right]^{3/5}, \quad (2)$$

$$r_0 = \left[\frac{2\lambda^2 f^2 (0.358D^{-1/3} - 0.242d^{-1/3})}{\rho_i^2 + \rho_t^2} \right]^{3/5}, \quad (3)$$

式中 λ 为光波波长, f 为光学系统等效焦距, ρ_i^2 与 ρ_t^2 分别为差分像在平行和垂直于子瞳连线方向上分离量的方差, D 为子瞳直径, d 为子瞳中心间距,并要求 $d \geq 2D$ 。

(1)式可以在只能够获得差分像在平行于子瞳连线方向上分离量的方差的情况中计算大气相干长度;(2)式可以在只能够获得差分像在垂直于子瞳连线方向上分离量的方差的情况中计算大气相干长度;(3)式可以在同时获得差分像在两个方向上分离量的方差的情况中计算大气相干长度。

在实际应用中,可根据大气相干长度仪的具体结构选择使用(1)~(3)式之一计算大气相干长度值。当目标的天顶角为 γ 时,归算至天顶方向的大气相干长度为^[4]

$$r'_0 = r_0 (\cos \gamma)^{-3/5}. \quad (4)$$

3 仪器结构与算法改进

自动跟踪移动目标的斜程路径大气相干长度测量系统的望远镜口径为 350 mm,等效焦距 7100 mm,子瞳直径 $D=110$ mm,子瞳中心间距 $d=220$ mm,子瞳为北-南(N-S)方向排列,观测目标为碘钨灯,CCD 靶面上的差分像光斑的重心抖动可以分解为沿子瞳连线方向和垂直于子瞳连线方向,因此可以分别计算两个抖动方向的质心分离量方差并代入(3)式计算大气相干长度。

仪器需要跟踪移动目标,因此配备了转动云台,最大转速 $4(^{\circ})/s$,由于 CCD 性能限制,采样频率为 25 Hz。为了使仪器在跟踪时不易丢失目标,选用了大靶面 CCD,并将软件开窗定为 $760 \text{ pixel} \times 560 \text{ pixel}$,

软件在计算大气相干长度的同时还需计算目标的脱靶量,并通过串口构成闭环系统控制望远镜转动,将目标锁定在视场内。图1为系统示意图。

由于系统要求实时测量,在采集频率不变的条件下,CCD采集与传输数据的时间延长,数据处理时间被压缩,但扩大软件开窗后,需要处理的单帧数字图像的数据量成倍增长,常用的图像处理算法无法满足要求。因此,新系统采用了遗传算法与区域加宽迭代质心算法结合而成的新算法处理差分像运动图像。

算法首先利用遗传算法能够在大范围搜索过程中快速收敛的优点寻找光斑所在位置的全局最优点,遗传算法的具体实现步骤如下。

1) 定义两个数组 $x[m]$ 与 $y[n]$ 模拟两条染色体, m, n 分别对应图像的宽度与高度 ($m \geq n$), 其中

$$x[a] = a, a \in \{0, 1, 2, \dots, m\}; \quad y[b] = b, b \in \{0, 1, 2, \dots, n\}. \quad (5)$$

2) 每条染色体的变异方式有两种:每个数组中 p 与 q 元素以概率 P_s 互换; p 到 q ($p < q$) 间的元素以概率 P_l 逆序重排列。这与生物学中的真实突变现象的机理相同, P_s 与 P_l 可通过实验确定。

3) 适应度函数为

$$f_e(v_1, v_2) = \frac{\sum_{i=1}^5 f(x[i], y[i])}{5}, \quad (6)$$

式中 $f(x, y)$ 为 (x, y) 点的灰度值, $f(x[1], y[1]) \sim f(x[5], y[5])$ 取 $f(x[1], y[1]) \sim f(x[n], y[n])$ 中最大的 5 个值。

4) 建立目标库,保存求得的 5 个最优个体基因,并进行下一代遗传,在子代染色体中选择最优的一个基因,加入目标库进行排序,计算适应度函数并记录适应度变化量。

5) 建立背景库,即整个染色体中最小的 5 个值 $g(x[1], y[1]) \sim g(x[5], y[5])$, 并在子代染色体中选择最小的一个基因,加入背景库进行排序。此操作的目的是为了避免重复搜索。

6) 重复步骤 3)~5), 直到适应度稳定不变时结束遗传,此时目标库中的最大值即为全局最优值。

通过 Schaffer 函数进行模拟实验,选定互换变异与重排变异的概率均为 0.3。根据获得的目标库与背景库对灰度图像进行聚类既得获得图像分割阈值。

区域加宽迭代质心算法实施步骤如下。

1) 将遗传算法找出的全局最优点作为种子点 (x_{seed}, y_{seed}) 。

2) 以种子点 (x_{seed}, y_{seed}) 为中心选取 a_i pixel \times a_i pixel 的正方形区域,利用分割阈值分割图像,并计算出该区域的重心 (x_0, y_0) 。

3) 将重心 (x_0, y_0) 作为新的种子点 (x_i, y_i) ,选取 $(a_i + m)$ pixel \times $(a_i + m)$ pixel 的正方形区域,计算出该区域的重心。

4) 判断 $x_{i+1} = x_i$ 且 $y_{i+1} = y_i$ 是否成立,若不成立,取 $a_i = a_{i-1} + m$, 回到步骤 3) 继续迭代;若成立,则迭代结束。

可以看出,区域加宽质心迭代算法的时间复杂度为 $O(n \cdot \log n)$,效率较高,但使用此方法时应注意增量 m 的取值不能过大,否则易将周围的干扰光斑误判为目标光斑。实验中,取 $m=5$ 时获得了较好的效果。

在实际测量时,单帧图像上共有两个目标光斑,此外,还可能出现由于信标光载体反光等引入的干扰光斑,而干扰光斑的亮度往往与目标光斑相近,为避免可能的误判,算法搜索到一个光斑后会记录光斑信息,标记已知光斑后重复算法继续搜索下一个光斑,软件默认最多记录 5 个不同的光斑信息。由于差分像光斑的相对位置是固定的,而干扰光斑的相对位置是变化的,因此通过分析光斑间的相对位置信息便可以快速地判断目标光斑。图 2 为在有干扰的背景下的差分像识别效果截图,图中的干扰光斑是人为制造的碘钨灯架的

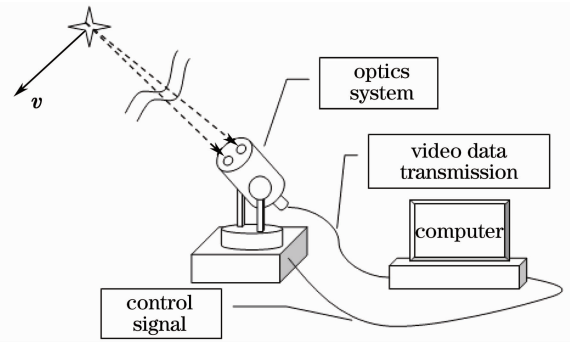


图1 自动跟踪测量系统示意图

Fig. 1 Configuration of the automatic tracking and measuring system

反射光。

实验表明,改进后的系统能够在 25 Hz 的帧频下完成大气相干长度的实时跟踪测量。

4 对比实验与测量结果

在对比测量实验中,使用了两台由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的大气相干长度仪,其中一台是上文中提到的日夜两用型大气相干长度仪,该仪器曾于 2004 年与激光大气闪烁测量实验系统进行过对比实验,实验结果得到了相互验证^[12],另一台即本文中新建的自动跟踪移动目标的斜程路径大气相干长度测量系统。

日夜两用型大气相干长度仪望远镜口径为 300 mm,等效焦距 6200 mm,子瞳直径 $D=100$ mm,子瞳中心间距 $d=200$ mm,子瞳为 N-S 方向排列,狭缝与子瞳连线方向垂直,测量软件开窗为 $256 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,采样频率 25 Hz。白天选择太阳东边缘测量大气相干长度,通过狭缝的太阳边缘差分像抖动方向与子瞳连线垂直,因此使用(1)式进行计算;夜间选择恒星为光源测量大气相干长度,由于恒星在 CCD 靶面上的差分像光斑的重心抖动可以分解为沿子瞳连线方向和垂直于子瞳连线方向,因此可以分别计算两个抖动方向的质心分离量方差并代入(3)式计算大气相干长度。

实验前,为确保两台仪器性能的一致,将摆放在同一高度、间距 5 m 的两台仪器对准同一光源进行了对比测量实验,其中水平 1000 m 传输路径测量使用碘钨灯作为光源,整层大气测量使用恒星作为光源,对比测量结果如图 3、图 4 所示,图中 T350 表示新建的自动跟踪移动目标的斜程路径大气相干长度测量系统,T300 表示日夜两用型大气相干长度仪。

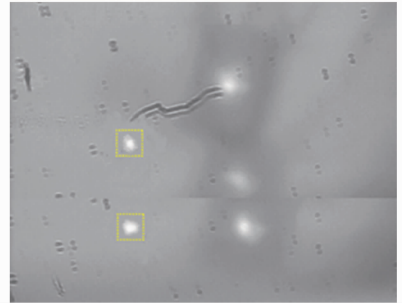


图 2 复杂背景下识别差分像目标

Fig. 2 Finding the differential image target in the complex background

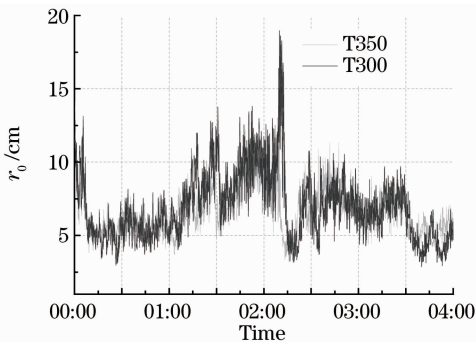


图 3 1000 m 水平传输路径大气相干长度对比

Fig. 3 Comparison of the atmospheric coherence length along 1000 m level propagation path

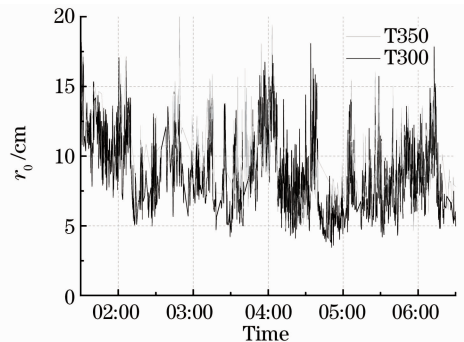


图 4 整层大气相干长度对比

Fig. 4 Comparison of the total layer atmospheric coherence length

利用 SPSS 软件对原始数据进行分析,1000 m 水平传输路径大气相干长度对比测量实验测得的两组数据相关系数为 0.915;夜晚整层大气相干长度对比测量测得的两组数据相关系数为 0.951。对比实验的结果表明,两台仪器性能一致且工作正常。

在大量前期准备工作的基础上,进行了不同光学传输路径上大气相干长度的实时对比测量实验。实验中,日夜两用型大气相干长度仪放置在离地面 6 m 的平台上,以太阳边缘为目标实时测量整层大气的相干长度;与其相距 5 m 的自动跟踪移动目标的斜程路径大气相干长度测量系统放置在同一平台上,跟踪飞行高度为 35 km 的平流层气球搭载的信标光源并实时测量斜程传输路径上的大气相干长度值。实验结果如图 5 所示,两组测量结果均通过(4)式归算至天顶。

5 讨论与结论

本次实验由于条件限制,平流层气球携带的大功率碘钨灯只点亮了 20 min,除去目标对准的时间,只得

到了 15 min 的实验数据,加之斜程传输路径上偶然有云层遮挡,并且气球移动方向时常突变等因素导致目标丢失,使有效的斜程传输路径上的大气相干长度数据较少,因此绘制的曲线与整层大气相干长度变化曲线相比更为陡峭。两者存在差异的原因主要有以下几点:

1) 平流层气球在观测点东北方向,而太阳当时处于观测点东南方向,两条光学传输路径的差别较大,路径上的综合湍流强度必然会有区别。

2) 两条光学传输路径的长度不同,一条为近地面至 35 km 高空,另一台为整层大气。虽然大气折射率结构常数的探空实验表明,25 km 以上高空湍流强度迅速减小,30 km 以上的湍流强度已经很弱^[13],但 35 km 至大气层顶的湍流累积效果也会对大气相干长度的测量结果产生一定影响。

3) 由于平流层气球实验成本高,准备过程复杂,因此实验数据有限,不能进行较长时间的数据对比。

但从整体上看,两者的数量级和变化范围基本一致,因此可以初步得出结论:在激光工程应用中,整层大气相干长度值随时间的变化趋势可以用垂直高度为 35 km 的斜程路径测量值近似代替。

上述结论可以为激光导星技术在整层大气相干长度测量中的应用提供初步的实验验证,即利用激光导星技术在 35 km 高空制造信标光,再使用 DIMM 原理计算光学传输路径上的大气相干长度,为激光工程应用提供整层大气相干长度的变化趋势。该方法的优势在于:大气相干长度的探测由被动式变为主动式,测量过程中受外界因素影响的程度大大降低;主动光源指向灵活,光学传输路径可自由选择,不再受恒星或太阳位置的限制;可以利用传动机构驱动系统进行扫描测量,以获得大气相干长度随空间的分布数据。此类研究将在今后的工作中完成。

参 考 文 献

- 1 D. L. Fried. Statistics of a geometric representation of wavefront distortion[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, **55**(11): 1427~1435
- 2 J. Stock, G. Keller. Telescopes. In: G. P. Kuiper, B. M. Middlehurst eds., *Stars and Stellar Systems*[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1960. 138
- 3 D. L. Fried. Differential angle of arrival: theory, evaluation and measurement feasibility[J]. *Radio Science*, 1975, **10**(1): 71~76
- 4 F. Roddier. The Effect of Atmospheric Turbulence in Optical Astronomy. *Progress in Optics*, Vol. 18[M]. Amsterdam: North-Holland, 1981. 281~376
- 5 M. Sarazin, F. Roddier. The ESO differential image motion monitor[J]. *Astron. Astrophys.*, 1990, **227**(1): 294~300
- 6 A. Howard Waldie, David B. Soules, James J. Drexler *et al.*. A new high speed two-dimensional CCD atmospheric turbulence monitor[C]. *SPIE*, 1988, **926**: 335~346
- 7 Liu Zhong, Qiu Yaohui, Qian Ping. Two problems on the principle of the measurement of seeing by using the differential image motion method[J]. *Publication of Yunnan Observatory*, 1993, (2): 54~60
刘 忠, 邱耀辉, 钱 苹. 关于差分像运动法视宁度测量原理中的两个问题[J]. 云南天文台台刊, 1993, (2): 54~60
- 8 Liu Zhong, Lou Ke, Zhang Ruilong *et al.*. The day-time seeing monitor at Fuxian Lake and some primary result[J]. *Publication of Yunnan Observatory*, 2000, (4): 95~100
刘 忠, 楼 柯, 张瑞龙 等. 白日视宁度监测仪和在抚仙湖的初步观测结果[J]. 云南天文台台刊, 2000, (4): 95~100
- 9 Liu Zhong, Jacques M. Beckers. Comparative solar seeing and scintillation studies at the Fuxian Lake solar station[J]. *Solar Physics*, 2001, **198**(1): 197~209
- 10 Wang Jianye, Liu Xiaochun, Rao Ruizhong *et al.*. Measurement of atmospheric coherence length in daytime and at night [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(1): 1~4
汪建业, 刘晓春, 饶瑞中 等. 大气相干长度的昼夜测量[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(1): 1~4

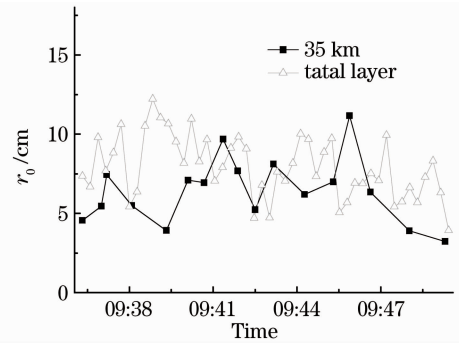


图 5 35 km 斜程传输路径与整层大气相干长度的对比测量

Fig. 5 Comparison between the total layer atmospheric coherence length and the atmospheric coherence length along 35 km slant propagation path

- 11 Wang Jianye, Liu Xiaochun, Weng Ningquan *et al.*. Measurement of atmospheric coherence length along bevel propagation path[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(3): 477~480
汪建业, 刘晓春, 翁宁泉 等. 斜程路径大气相干长度的测量[J]. 量子电子学报, 2005, **22**(3): 477~480
- 12 Wang Jianye, Rao Ruizhong, Liu Xiaochun *et al.*. Comparison of experimental study of atmospheric coherence length[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 64~66
汪建业, 饶瑞中, 刘晓春 等. 大气相干长度的对比实验研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 64~66
- 13 Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming. Vertical distribution models of atmospheric structure constant of refractive index [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(2): 183~188
孙 刚, 翁宁泉, 肖黎明. 合肥地区大气折射率结构常数高度分别模式[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(2): 183~188