文章编号:1001-5078(2018)02-0221-06

光电技术与系统。

# 基于 EMCCD 相机的全天时大气相干长度测量系统

张 雷<sup>1,2</sup>,佟首峰<sup>1,2</sup>,赵 馨<sup>3</sup>

(1. 长春理工大学光电工程学院,吉林 长春 130022;2. 长春理工大学 空地激光通信技术国防重点学科实验室,吉林 长春 130022;3. 长春理工大学电子信息工程学院,吉林 长春 130022)

摘要:根据差分像运动原理研制出一款以EMCCD 相机为探测器的全天时大气相干长度观星测量系统。经过对天空背景光光谱分布与EMCCD 光谱响应特性的分析,选择中心波长为700 nm 的光谱滤光片,可有效地抑制背景光入射。介绍了系统主要噪声组成,通过计算得到了系统白天极限探测星等约为7.35。在野外开展了以小熊星座所属多颗不同星等恒星为目标的日间观星实验,结果表明测量系统对星等为3 恒星具有较好的日间探测能力。通过全天24 h 对大气相干长度的连续测量,得到了长春地区整层大气湍流强度变化特征曲线。
关键词:差分像运动;白天观星;EMCCD 相机;大气相干长度;信噪比
中图分类号:TH929.12 文献标识码:A DOI:10.3969/j. issn. 1001-5078.2018.02.016

# Full-time measurement system for atmospheric coherence length based on EMCCD camera

ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, TONG Shou-feng<sup>1,2</sup>, ZHAO Xin<sup>3</sup>

(1. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;2. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aero and Ground Laser Communication Technology,

Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

3. School of Electronics Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract**: According to the principle of differential image motion, the full-time measuring system of atmospheric coherence length based on EMCCD camera was developed for observing stars. By analyzing the spectral distribution of sky background and the spectral response characteristics of EMCCD, spectral filter with central wavelength of 700nm was selected to suppress the incidence of sky background light. The main noise of measuring system is introduced, and the calculated limiting star magnitude is 7. 35 in daytime. Stargazing experiments for some different magnitude stars in the Ursa Minor are carried out in the field. The results show that the measurement system has a good detection capability for star with magnitude 3 in daytime. By continuous measurements of atmospheric coherence length in all-day time, atmospheric turbulence intensity change curve of the whole layer in Changchun was obtained.

Key words: differential image motion; observe stars in daytime; EMCCD camera; atmospheric coherence length; SNR

1 引 言

作为一种长期连续监测大气湍流变化的测试设备,大气相干长度测量系统的昼夜观测环境有很大

的差别,白天的天空背景辐射影响远大于夜间。传 统的测量系统在夜间工作时以恒星(例如北极星) 为观测目标,白天时段则通过遮光罩与滤光片组的

作者简介:张 雷(1980-),男,讲师,主要从事大气参数测量方面的研究。E-mail:zhanglei\_cust@163.com 收稿日期:2017-06-05

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61475025)资助。

辅助,将太阳边缘作为观测目标。这种方法可以实 现高信噪比观测,不过昼夜交替时,相较目标星而 言,天空背景光强度仍很大,这会给目标恒星光斑的 提取带来很大难度;此时,若太阳运动到地平线以 下,则会进一步导致观测目标的缺失。根据以往研 究经验,晨昏时大气湍流强度恰处于峰值转换阶段, 是研究湍流强度特性的关键期。因此系统需实现持 续稳定的观测。为实现这个目的,本文提出一种以 恒星为目标的全天时测量方法,选用红光波段量子 效率远高于传统 CCD 的 EMCCD 相机作为光电探 测器,配合有效的光谱滤波和图像处理技术在白天 强天空背景光影响下对恒星目标光斑提取,实现对 整层大气相干长度的全天不间断测量。

长期以来,CCD 或 CMOS 相机是大气相干长 度测试设备常用的光电探测组件,而近年来一些 新型传感器逐步进入实际应用阶段,其中就包括 EMCCD 相机。EMCCD(电子倍增电荷耦合器件) 与普通 CCD 的区别是在串行读出寄存器后增加了 一系列的"增益寄存器",使电子在转移过程中多 次产生"撞击离子化"效应<sup>[1-2]</sup>产生大量新的电 子,信号电荷在进入读出放大器前就进行了倍增 放大,灵敏度得以大幅提高,其电子倍增增益一般 可达 1000 倍左右,因此在同样的积分时间内,EM-CCD 的灵敏度和动态范围远高于普通 CCD,更加 适用于白天观星。

## 2 系统工作原理与组成

全天时大气相干长度测试系统主要由光学接 收单元、光电转换单元以及图像处理单元三部分 组成。考虑到长期野外实验条件的限制,系统光 路采用透射式结构设计,整个系统由双口径开普 勒望远系统、平面反射镜、可插拔的滤光片组与衰 减片组、准直镜、光楔、成像镜、EMCCD 相机、导星 转台及主控计算机等部分构成<sup>[3]</sup>,图1为系统光 学结构示意图。



图 1 透射式光学系统结构示意图 Fig. 1 Transmissive optical system

从图1中可以看出,两个独立口径的透镜组形 成了差分像运动测量所需要的子光瞳,光路中放置 光楔,从而使同一目标星光经过两子瞳后产生不重 叠的双像。在有大气湍流的情况下,由于两子瞳的 湍流状况不同,通过记录和统计两像点相对位置变 化的方差,可以反演出大气相干长度 r<sub>0</sub>,其具体公 式为:

$$\sigma_x^2 = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} [0.179 D^{-1/3} - 0.097 d^{-1/3}] \quad (1)$$

$$\sigma_{\gamma}^{2} = 2\lambda^{2}r_{0}^{-5/3}[0.179D^{-1/3} - 0.145d^{-1/3}] \qquad (2)$$

式中, D 为子瞳直径; d 为两子瞳间距;  $\sigma_x^2$  为星像相 对位置的纵向方差;  $\sigma_y^2$  为横向方差。上述计算过程 也可转化为使用两个星像点之间的距离方差完成:

 $r_0 = \{2\lambda^2 [0.358D^{-1/3} - 0.242d^{-1/3}]/(\sigma_x^2 + \sigma_x^2)\}^{3/5}$ (3)

当目标星的天顶距为γ时,归算至天顶的相干 长度参数可表示为:

$$r'_{0} = r_{0} (\cos\gamma)^{-3/5}$$
(4)

在使用上述公式过程中,为了确保经过两子瞳 的光束波前倾斜相互独立,必须满足如下关系:

$d \ge 2D$	(5)
整个测量系统全天时工作示意图	图如图2所示。



图 2 全天时大气相干长度测量系统工作示意图

Fig. 2 Full-time measurement system of atmospheric coherence length

#### 3 探测信噪比与极限星等分析

3.1 光谱滤光片中心波长的选取

白天观测恒星目标时,通常选择星等较高、长波 辐射较强的恒星,这是因为白天天空背景辐射光谱 特性向短波漂移,峰值波长在485~495 nm之间,其 辐射强度随波长增加而迅速降低,在光学系统中加 入短波光谱滤光片可以有效地抑制背景光影响,有 利于目标星光斑的采集。显然,光谱滤光片的中心 波长选取范围应尽量偏向于红光波段,不过传统 CCD在600~700 nm 波段的效率仅为20%~30%, 而EMCCD相机(以Andor公司的iXon\_888为例) 在700 nm 波长附近响应效率仍然可以保持在90% 左右,因此光谱滤光片的中心波长可定为700 nm, 考虑到长焦透射系统的像差校正能力和系统观星信 噪比的要求,确定滤光片光谱透过范围为650 nm~ 750 nm。

3.2 EMCCD 相机探测能力分析

3.2.1 EMCCD 相机主要噪声分析<sup>[4]</sup>

噪声是衡量光电探测器性能的重要指标之一。 与传统的 CCD 相机类似, EMCCD 相机主要噪声是 散弹噪声  $\sigma_{shot}$ 、暗电流噪声  $\sigma_{dark}$  和读出噪声  $\sigma_{readout}$ ,同时由于 EMCCD 自身的倍增机制还会受到 电子倍增等附加噪声影响。EMCCD 相机在观星时 的噪声为:

$$N = \sqrt{\sigma_{\text{shot}}^2 F^2 + \sigma_{\text{dark}}^2 F^2 + \sigma_{\text{readout}}^2}$$
(6)

1) σ<sub>shot</sub> 为入射光子的散弹噪声,由于光的量子 特性,这部分噪声是无法避免的,该噪声的大小是由 相机接收到的入射星光光子数 *S* 和背景光光子数 *B* 共同决定的,并经过电子倍增结构 *G* 倍增益。其表 达式为:

$$\sigma_{\rm shot} = G(\sqrt{S} + \sqrt{B}) \tag{7}$$

2)  $\sigma_{dark}$  是载流子的热运动噪声,受驱动脉冲影响在输出端形成电流所产生的。CCD 类传感器都 会存在暗电流噪声,直接影响着这类器件的灵敏度 和动态范围。暗电流噪声的大小与工作温度密切相 关,温度每升高6℃,暗电流噪声会增加约3 dB。 其表达式为:

$$\sigma_{\text{dark}} = G \cdot \sqrt{D \cdot t} \tag{8}$$

式中, *D* 为某个温度条件下,每个像元单位时间内 产生的暗电流电子数; *t* 为曝光时间。对于 EMCCD 相机来说,暗电流噪声会随着信号倍增而同样倍增 放大,使之成为了限制探测器灵敏度的一个主要因 素,系统所选用的 Andor 公司的 iXon\_888 EMCCD 相机采用了 TEC 制冷方式,利用风冷或水冷方法保 证环境温度为 20 ℃时,将器件长时间稳定制冷在 -80 ℃左右,此时探测器的暗电流噪声只有约 0.001e<sup>-</sup>/pixel/sec。

3) σ<sub>readout</sub> 为读出噪声来源于读出放大器,主要包括放大器复位噪声、电荷经过放大器的热噪声和 1/f噪声等。当输出频率较高时,读出噪声是传统 CCD 探测器最主要的噪声来源,而 EMCCD 相机在 电荷信号转化成视频信号之前就进行了电子倍增,极大地减小了读出噪声的影响。

4)电子倍增噪声是电荷由电子倍增过程的随 机性引起的。EMCCD 参数手册上给出的增益 *G* 仅 是一个统计平均值,实际工作中每次的倍增增益并 不相同,具有不确定性。经实验研究表明,在电子倍 增过程中,设每个电荷的倍增行为相互独立,则倍增 噪声因子为  $F = \sqrt{2(1 + \alpha)}$ ,其中  $\alpha$  是单次倍增发 生的概率,在倍增增益较大的情况下, $\alpha$ 的值远小于 1,因此  $F \approx \sqrt{2}$ 。

3.2.2 信噪比(SNR)分析

白天观星如果想要获得高质量星光光斑图像,则需尽可能提高探测器接收信噪比。假设探测器单位像元接收到的星光信号光子数为*S*,接收到的背景光光子数为*B*,可以得到 EMCCD 的信噪比如下:

$$SNR_{EMCCD} = \frac{G \cdot S}{\sqrt{\sigma_{shot}^{2}F^{2} + \sigma_{dark}^{2}F^{2} + \sigma_{readout}^{2}}}$$
(9)  
代人公式(7)、(8)并化简,得:  
$$SNR_{EMCCD} = \frac{S}{\sqrt{(S+B)F^{2} + DtF^{2} + \sigma_{readout}^{2}/G^{2}}}$$
(10)

由上式可见,EMCCD 相机自身的电子倍增增益 特性可有效抑制读出噪声,暗电流噪声和光子散弹 噪声始终伴随着电子倍增噪声的影响。

3.2.3 白天可探测极限星等分析

通过对 EMCCD 噪声特性分析可知,系统白天 观星时,天空背景光远强于目标星光,其所产生的光 子散弹噪声也远远大于系统暗电流噪声和读出噪 声。因此成像系统白天总噪声可近似表示为:

$$N_{\rm day} \approx G_{\rm v} / N_b = GF_{\rm v} / \phi_b A Q T t \Omega \tag{11}$$

式中, *C* 为增益倍数; *F* 为电子倍增噪声影响因子, 约为 $\sqrt{2}$ ; *Q* 为 EMCCD 量子效率,取90%; *T* 为整个 光学系统透过率,设为0.8;  $\phi_b$  为经光谱滤光片滤波 后天空背景光光子流密度,约为4.69 × 10<sup>3</sup> photon/ mm<sup>2</sup> · s · sr<sup>2[5]</sup>; *A* 为通光口径面积,设为 80 × 80  $mm^2$ ; t 为探测器积分时间;  $\Omega$  为视场角。

设白天所观测的恒星星等为 *M*,目标信号可表示为:

$$S_{M} = \frac{G}{N} 2.512^{-M} \phi_{0} A Q T T_{a} t$$
 (12)

式中, N 为星光光斑弥散的像元数, 为保证质心计 算的精度, 必须满足 N ≥ 4<sup>[6]</sup>;  $T_a$  为大气透过率, 设 为 0.4;  $\phi_0$  为经光谱滤光片滤波后 0 等星的光子流 密度, 约 为 1.1 × 10<sup>4</sup> photon/mm<sup>2</sup> · s<sup>[7]</sup>。在判定 CCD 器件探测极限时, 通常认为探测器探测到的信 号要大于或等于噪声的 5 倍, 则 EMCCD 可探测的 极限星等如下所示:

$$SNR_{day} = \frac{S_M}{N_{day}} = 5$$
(13)

将式(12)、(13)代入式(14)得:

$$M = \lg \left( \frac{1}{5NF} \sqrt{\frac{1}{\sqrt{\phi_b AQTt\Omega}}} \right) / \lg 2.512$$
$$= \lg \left( \frac{\phi_0 T_a \sqrt{AQTt/\phi_b \Omega}}{5NF} \right) / \lg 2.512$$
(14)

由上式(14)可知,对积分时间 t 和视场角  $\Omega$  进行优化选取,可以有效提高使系统的探测极限星等 M。其中,积分时间超过一定值时会使 EMCCD 接收的光子数超过其额定阱深(iXon\_888 像元阱深为 80000 e<sup>-</sup>),造成探测器饱和,为了避免这一情况,可将 t 设为 10 ms;由于目标星光属于平行光,光学系统视场角的大小只影响入射背景光的强弱,而与信号光强度无关,因此应尽量减小  $\Omega$ 的值。在参考所测大气相干长度范围以及保证导星转台跟踪精度的前提下,可设系统视场角为 1°×1°。将所有参量代入公式(14),得系统白天可探测极限星等约为7.35。

#### 4 天空背景下星光目标实时检测

传统大气相干长度测试装置无论是夜间观星还 是白天观测太阳边缘,所得到的图像目标与背景对 比度都很高,可以直接利用阈值分割法进行光斑提 取。白天观星时,天空背景相对较强且分布不均匀, 局部图像灰度信息接近或超过星光光斑灰度值,严 重降低探测信噪比,造成目标提取失败。因此需要 首先采用合适的图像预处理方法抑制背景光,再输 出光斑质心,以提高白天强背景光条件下大气相干 长度测试精度。全天时大气相干长度测试系统光斑 检测流程如图3所示。



图 3 星光图像检测流程图

# Fig. 3 Star image detect in daylight

常用的图像预处理方法包括灰度线性拉伸、形态滤波、神经网络等方法。考虑到大气相干长度测量的特点,本系统采用经典中值滤波方法,既能降低噪声影响,又能维持图像细节不变。

完成背景滤波后,需要根据一定准则确定背 景阈值的灰度值大小*T*,在阈值分割的时候将灰 度值小于等于*T*的部分作为背景,而灰度值大于*T* 的部分作为目标。由于信号光斑边缘灰度值变化 是一个渐变的过程,为了选定一个较为适中的阈 值,可以选择边缘统计法<sup>[8]</sup>进行统计,求出图像边 缘灰度值的均值*G*<sub>avg</sub>和均方差值σ,则阈值*T*可表 示为:

 $T = G_{\text{avg}} + k \cdot \sigma \tag{15}$ 

式中, *k* 为置信因子, 设背景符合高斯分布, 取 *k* = 2.6 则代表阈值 *T* 包含了 99.5% 以上的背景。

根据以上方法计算出背景阈值,然后采用区域 生长法找出图像中灰度值大于背景阈值的连通区 域。其基本思想是以光斑图像中灰度值最大的像元 作为初始种子,搜索并标记种子周围大于背景阈值 的点,认为此点与种子属于同一连通区域,将此点灰 度值归零后,按此方法继续搜索直到找不到灰度值 大于背景阈值的点为止,此为连通区域1,区域内的 点灰度值都已归零;然后找出图像中下一个灰度值 最大的像元作为2号种子,重复上述步骤建立连通 区域2…依次进行 n 次搜索,建立 n 个连通区域,这 n 个连通区域中像元数量最多的两个即为光斑区 域。通过连通性分析消除图像虚假目标之后,采用 质心算法提取质心位置。



图 4 图像预处理结果 Fig. 4 Result of star image pretreatment

#### 5 观星实验

为了验证大气相干长度测量系统全天时工作能力,选择晴朗上午在长春市净月潭国家森林公园西山进行观星实验,观测地点海拔268.4 m,东经125°25′,北纬43°46′,太阳高度角45°。实验使用子孔径80 mm、子瞳间距200 mm的透射式光学系统,加装650~750 nm 波段带通滤光片,EMCCD相机分辨率1024×1024,积分时间10 ms,增益260,目标光斑弥散大小约为10×10个像元。

由于受大气透过率、地面杂散光以及观测目标星光谱特性的影响,实际野外测量活动中,目标信噪比远远低于理论值,即使经过图像预处理,符合观测要求的实际星等也明显高于理论极限探测星等。通过表1所列北方天空小熊星座 所属几颗不同星等的恒星白天实拍灰度值与所 对应信噪比可知,星等较高的北极星(小熊座α) 和小熊座γ都可以作为全天时连续观测大气相 干长度的目标星。

表1 白天不同星等目标实拍灰度值

	Tab. 1	Gray	value	of	different	magnitude	stars
--	--------	------	-------	----	-----------	-----------	-------

恒星	星等	背景灰度 均值	目标灰度 均值	图像处理 前信噪比	图像处理 后信噪比
北极星	2.02	2779.8	2958.4	6.72	10. 88
小熊座 γ	3.01	2675.5	2739.3	3.35	5. 58
小熊座ζ	4.32	2643.6	2685.4	1.46	3.32
小熊座 η	4. 95	2656.3	2672.9	1. 07	1.96

为了检验系统白天对 r<sub>0</sub> 的测量能力,实验小 组选择目视星等低于北极星的小熊座 γ 星(3 等 星)为目标,进行连续24 h 的观测。为避免观测天 顶角角度不同所引起的大气湍流强度测量误差, 可将不同仰角的 r<sub>0</sub> 测量值均以天顶角为0°进行反 演,图 5 为反演后得到整层大气相干长度 r<sub>0</sub> 随时 间变化的曲线。由图可知,长春地区夜间大气湍 流强度较弱,后半夜优于前半夜;上午大气湍流开 始逐渐增强,并在中午时段达到峰值,此时 r<sub>0</sub> 为4 cm;而后持续减弱,并在黄昏时段达到最小值。可 以看出大气湍流强度具有显著的时刻转换特征; 观测曲线基本符合近地面大气湍流强度随时间变 化的经验规律<sup>[9]</sup>。



Fig. 5 The whole layer atmosphere coherence length vs time

#### 6 结 论

白天强背景光条件下,高探测信噪比是大气相 干长度测量系统正常工作保障。EMCCD 相机在红 光波段具有较高的量子效率,配合合适的光谱滤光 片,可使中心波长向红光区大范围偏移,极大地减小 了背景光辐射的入射强度,提高了入射星光信号与 背景光的对比度。由文中对系统成像时噪声分析可 知,EMCCD 相机利用电子倍增的增益方式可有效地 减少读出噪声对成像质量的影响;同时采取 TEC 制 冷技术将暗电流噪声降低到一个极小值;虽然引入 了电子倍增噪声因子,但对系统整体信噪比影响不 大。通过在野外环境对小熊座 γ 星的 24 h 连续测 量,得到了长春地区整层大气相干长度随时间变化 曲线,不仅有效地证明了该全天时大气相干长度测 量系统的实用性,也反映出 EMCCD 相机相对于传 统 CCD 相机在白天观星能力上的优势。

目前,EMCCD 相机在大气相干长度测量系统刚 刚开始初步应用,有针对性的应用控制软件开发还 不成熟。实际上,全天时大气相干长度测量系统作 为一种大气参数长期监测设备,工作时常会遇到薄 云遮挡致星光变暗、阴天背景光峰值波长向红光区 移动、太阳规避角过小致局部背景光饱和等情况,这 会造成测量数据出现粗大误差甚至测试中断。如果 能将 EMCCD 相机的 ROI(region of interesting)技术、 自动增益设置、自适应积分调节等功能充分整合利 用起来,进一步挖掘 EMCCD 相机的探测潜力,应该 能为解决这一类问题提供有效的途径。相信随着导 星跟踪技术的发展及软件算法的改善,探测灵敏度 高、噪声小的 EMCCD 相机在大气湍流参数测量领 域中会有更广阔的应用空间。

### 参考文献:

- [1] SU Xuezheng. EMCCD technology-tingle photon imaging detection[J]. Modern Scientific Instruments, 2005, (2):
  51-53. (in Chinese)
  苏学征. EMCCD 技术 单光子水平的成像探测[J].
  现代科学仪器, 2005, (2):51-53.
- [2] LU Jiali, LI Binhua, HU Po. A method of determining EM-CCD electron multiplication gain[J]. Acta Armamentarii, 2015,36(4):710-715(in Chinese)
  卢家莉,李彬华,胡泊.一种电子倍增 CCD 电子倍增增 益的确定方法[J]. 兵工学报,2015,36(4):710-715.
- [3] XIANG E, LU Xiaomeng, JIANG Xiaojun. Lucky imaging system on the 50 cm telescope at Xinglong observatory
  [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44 (4): 1278-1283. (in Chinese)
  向娥, 卢晓猛, 姜晓军. 基于兴隆观测基地 50 cm 望远

镜的幸运成像系统[J]. 红外与激光工程, 2015, 44 (4):1278-1283.

 HE Jiawei, HE Xin, WEI Zhonghui, et al. Design and application of EMCCD camera for full-time star sensor[J]. Infrared Technology, 2013, 35 (11):718 - 722. (in Chinese)

> 何家维,何昕,魏仲慧,等. EMCCD 相机在全天时星敏 感器中的设计与应用[J]. 红外技术,2013,35(11):

718 - 722.

- [5] Kurt L, Brain D, Alexander C, et al. Daytime aspect camera for balloon altit-udes [J]. Opt Eng, 2002, 41 (10): 2641-2651.
- [6] WAN Min, SU Yi, YANG Rui, et al. Improvement of signal to noise ratio in astronomical objects detection in day-time[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15 (2):1151 1154. (in Chinese)
  万敏,苏毅,杨锐,等. 提高白天观测星体信噪比的方法研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15 (2):1151 1154.
- [7] LIEBEC C. Accuracy performance of star trackers-atutorial[J]. IEEE, 2002, 38(2):587 – 599.
- [8] GAO Yang, ZHANG Ke, LI Yanjun. Edge det-ection investigation of low-SNR infrared image based on noise probability[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34 (4):459-463. (in Chinese)
  高阳,张科,李言俊. 低信噪比红外图像的快速统计法 边缘 提取[J]. 红外 与激光工程, 2005, 34 (4):459-463.
- [9] CHEN Xiaowei, SUN Gang, LIU Qing, et al. Contribution of the surface layer to the integral turbulence in Northwest Plateau[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11):1101006. (in Chinese)

陈晓威,孙刚,刘庆,等.近地面湍流对整层湍流的贡 献及相关研究[J].光学学报,2015,35(11):1101006.