doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2022.01.009

大天区望远镜中sCMOS相机的测光精度分析*

牛炳力^{1,2} 刘承志^{1†} 李振伟¹ 康 喆¹ 吕 游¹

(1 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站长春 130117)(2 中国科学院大学天文与空间科学学院北京 100049)

摘要 与传统CCD (Charge Coupled Device)相机相比, sCOMS (scientific Complementary Metal Oxide Semiconductor)相机被广泛装备于超大天区巡天设备,与传统CCD相机不同的是sCMOS相机采用卷帘式快门,因此对其进行测光精度的分析工作是很有意义的.首先,将sCMOS相机拍摄的图像与UCAC2 (The Second U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog)星表进行匹对,识别图像中的UCAC2标准星.接着对图中的标准星进行测光并提取测光数据进行最小二乘直线拟合,获得了相应的系统转换系数并得到仪器星等至标准 星等的转换公式.然后,将转化后的仪器星等和标准星等做差并计算相应的均方根误差.最后,利用计算得到的均方根误差评估sCMOS相机的测光精度,并将标准星按星等划分后,分析了相应的测光误差.计算结果表明在标准测光夜测量亮度亮于14等的星时,测光精度优于0.15 mag.通过实测精度分析可知卷帘快门sCOMS相机具有较高的测光精度,基本满足空间碎片巡天观测的要求.

关键词 仪器: 探测, 星表, 标准星, 技术: 测光, 方法: 数据分析 中图分类号: P141; 文献标识码: A

1 引言

在天文学领域中, CCD (Charge Coupled Device)相机凭借着高分辨率、高灵敏度、高传输速 度等优点在天文观测方面一直占据主导地位.早期的CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)相机缺点众多并不适用于天文观测,但 是随着大规模集成电路理论的成熟和制造技术 的飞速发展, CMOS相机在具有高空间分辨率和 快速帧速率的观测中显示了其优势,并出现了 科学级CMOS相机,简称sCMOS (scientific Complementary Metal Oxide Semiconductor)相机.sC-MOS相机优异的性能和超高的性价比使其在天文 观测中崭露头角.与传统CCD相机不同, CMOS相 机拥有着更高的集成度、更快的读出速度、更低的能耗和制造成本以及较强的抗辐照能力;然而CMOS相机在量子效率、读出噪声和像素填充率等方面的表现欠佳^[1].随着CMOS相机制造工艺的不断成熟,上述缺陷不断被完善,不同于CCD相机的全局式快门(Global Shutter, GS), sCOMS相机采用的是卷帘式快门(Rolling Shutter, RS),采用这种快门在保证成像质量的同时可以降低元器件成本.RS逐行曝光的工作方式会出现果冻效应,即当曝光不当或物体移动较快时,会出现部分曝光(Partial Exposure)、斜坡图形(Skew)、晃动(Wobble)等现象.近几年国内外关于sCOMS相机与CCD相机在天文观测领域的性能研究结果表

*国家自然科学基金项目(U2031129)、中国科学院天文大科学中心前瞻课题(Y9290201)、中国科学院青年创新促进 会(2018)资助

 $^{\dagger}lcz@cho.ac.cn$

²⁰²¹⁻⁰³⁻²⁰收到原稿, 2021-05-17收到修改稿

明sCMOS相机大多适用于对时间、空间分辨率要 求高的天文观测项目[2-3].利用地基望远镜对空间 目标进行较长弧段的连续测光观测, 可以获得空间 目标的光度信息和位置信息,进而对它的形状、尺 寸及运行姿态等进行研究[4],因此光学观测在中高 轨空间碎片的识别跟踪及编目工作中的作用举足 轻重,效果显著.由于一台观测设备在同一时间只 能对单一目标进行跟踪观测的模式非常限制对空 间目标的编目能力,于是大视场、多目标的光电望 远镜阵列观测模式应运而生. 越来越多采用短曝光 方式的超大天区巡天设备选择sCMOS相机作为终 端成像设备,然而对于sCOMS 相机的巡天实测精 度分析的文章并不多. 在此背景下本文以吉林天文 观测基地的280 mm全天区可转动光电阵为例,对 卷帘快门sCOMS相机拍摄的图像进行测光和数据 处理,将实际测量的星等和星表中的标准星等做 差值, 计算相应的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)来评估sCOMS相机的实测精度,并 分析了相应的测光误差.

2 天文数据的获取与处理

图1所示为280 mm全天区可转动光电阵,该设备由4台280 mm透射式光学望远镜及两台T型架结构赤道仪组成,每台望远镜有效通光口径为(280 ± 2) mm并搭载美国FLI (Finger Lakes Instrumentation)公司生产的sCMOS相机,型号为KL4040,相机的技术参数¹如图2所示.望远镜的极限星等,视场大小,赤经(RA)及赤纬(DEC)两个方向上的跟踪精度和指向精度等主要参数如表1所示.

2.1 观测图像的预处理

观测图像预处理包括图像的筛选、本底改正、 平场改正、暗流改正、目标的提取及定位、流量 定标以及目标的测光.本底是指在无任何信号输入 时,相机背景所表现出来的光电荷数底值,通常通 过对相机进行零秒曝光获取本底图像.平场是指由 于相机每个像元的量子效率和分光响应不完全一 致以及望远镜光学系统带来的大尺寸不均匀性,使 得观测获取的图像中出现亮度分布的偏差,通常天 文实测会选择晨昏时刻的天区作为均匀漫射光源, 来采集平场图像. 暗流是指在无光照情况下相机势 阱中产生的热电子, 对于制冷正常的相机, 暗流一 般很小, 可以忽略不计. 目标提取用于获取图像中 恒星的流量信息及位置信息, 为下一步的测光和流 量定标工作做准备.

表 1 光电阵系统的主要参数 Table 1 Specific parameters of photoelectric

array system		
Parameter	Value	
Limiting magnitude/mag	16.5	
${ m Field/deg}^2$	160	
Diameter/mm	280 ± 2	
Design spectrum/nm	500 - 800	
Pointing accuracy (RA, DEC)/ $^{\prime\prime}$	< 9	
Tracking accuracy (RA, DEC)/ $^{\prime\prime}$	< 1	



图 1 280 mm全天区可转动光电阵 Fig. 1 The 280 mm optical telescope arrays

2.2 目标提取及定位原理

一幅sCMOS图像不仅包含背景信号与目标源 信号,还存在一些噪声信号.通过高斯掩模、Tophat掩模等对图像进行滤波可以减弱噪声信号的影 响.同时采用K-σ Clipping法计算图像中所有像素 的标准差(σ)进而构建图像的天光背景分布,从而 准确检测出图像中的目标源信号^[5].再通过阈值检 测识别认定目标源的天体轮廓,接下来是确定目标 源的中心坐标.目前,目标源中心的确定方法大致

 $^{^{1} \}rm http://www.flicamera.com/spec_sheets/KL4040.pdf$

分为两类: 一类是以像素灰度为权的质心计算法及 相应的衍生算法, 如二维修正距方法^[6]; 另一类是 拟合计算法, 如高斯曲面计算法. 二维修正距法是 采用二维修正矩来计算目标源的一阶矩, 作为目标 中心. 其计算公式为:

$$\begin{cases} X = \sum_{i \in \mathbf{S}} f_i x_i / \sum_{i \in \mathbf{S}} f_i, \\ Y = \sum_{i \in \mathbf{S}} f_i y_i / \sum_{i \in \mathbf{S}} f_i. \end{cases}$$
(1)

式中, S为星像像元的集合, i代表第i个像元 且 $i \in S$, f_i 为 (x_i, y_i) 处像元灰度值与背景阈值的 差值, (X, Y)代表计算得出的星象中心坐标^[7].

Technical Data	
Sensor Type	Front Illuminated CMOS
Sensor	GPixel GSense4040
Shutter Type	Rolling; Rolling with Global Reset
Active Pixels	4096 × 4096
Pixel Size (microns)	9 x 9 μm
Imaging Area (Diagonal)	36.8 X 36.8 mm (52 mm)
Full Well Capacity	70000 electrons
Typical Readout Noise	3.7 e-
Dynamic Range	85.2 dB
Frame Rate	23 fps (QSFP V2)
Cooling Method ¹	Air and Liquid
Max. Cooling (Air)	40°C below ambient
Temperature Stability	0.1°C
Dark Current (typical)	0.08 eps at -10C
Interface	USB 3.0 (Optional QSFP ²)
Data Bit Depth	16 bit ³
Optional Shutter	65mm
Optional Mounts	Medium Format Recommended (6x7)
Subarray Readout	Standard
External Trigger In/Out	Standard
SDK / Software	Kepler SDK / FLI Pilot
Weight	4 lbs (1.8 kg)

¹Liquid circulation connectors sold separately

 2 QSFP = Quad Small Form factor Pluggable: high speed fiber optic interface 3 16-bit data merged from two 12 bit converters

图 2 KL4040相机技术参数

Fig. 2 Technical parameters of KL4040 camera

高斯曲面计算法又称为点扩散函数(Point Spread Function, PSF)拟合法^[8],即选用高斯函数作为星象光强分布特征模型,利用最小二乘法进

行拟合使星象与函数模型的灰度值差最小,从而计 算目标源中心坐标,该方法计算公式为:

$$D_{i,j} - \text{sky} = H \int_{i-0.5}^{i+0.5} \int_{i-0.5}^{i+0.5} G(x - x_0, y - y_0; \sigma_x, \sigma_y) dxdy.$$
(2)

式中 $D_{i,j}$ 表示图像中第*i*行第*j*列像素的灰度值; sky代表图像背景; *H*表示星像亮度的估计值; (x, y)代表星象在图像中的坐标, (x_0 , y_0)是星像中心, $\sigma_x \pi \sigma_y$ 分别代表 $x = x_0$, $y = y_0$ 的标准差.

通常情况下,上述两种方法中点扩散函数拟合 法的计算结果更优. 然而在巡天观测中大视场所带 来的光学畸变会导致远离视场中心的星象偏离高 斯轮廓,造成PSF是高斯形状的假设失效,引起较 大的拟合误差. 同时视场中的目标较多,对每个目 标都进行点扩散函数拟合的计算量太大. 因此这里 选取二维修正距法计算目标中心,该方法简单易于 实现,同时对目标噪声响应较弱,更适用于对数据 处理实时性要求较高的大视场巡天观测.

2.3 星图匹配原理

星图匹配是把观测图像与星表进行匹对,将图像中的目标与星表内的成员星进行比较识别,从而确定图像拍摄区域的具体方位.星图匹配常用的算法有:子图同构算法、模式识别算法等.子图同构算法中的三角形算法^[6]较为成熟、应用最广,但是会出现多余计算同时对存储容量有较高的要求,因此该算法对于数据量庞大的巡天观测图像而言并非最佳选择.这里采用的是几何哈希方法^[9],其原理如图3所示.

该算法选取4颗星组成一个四边形,4颗星中 相距最远的两颗星命名为A和B,这两颗星用来定 义一个局部坐标系的原点和(1,1).其余两颗星命 名为C和D,要求恒星C和恒星D位于以恒星A和恒 星B为直径的圆圈内,它们在这个局部坐标系中的 位置坐标(*x*_C, *y*_C, *x*_D, *y*_D)被用来作为描述4颗星相 对位置的几何哈希码,这种几何哈希码的特点是不 会随缩放、平移和旋转而改变.然后与星表建立索 引树(k-dimensional tree, k-d tree)进行最邻近点求 解,这里用到欧氏距离公式. *n*维欧氏空间是一个 点集,它的每个点可以表示为 $o(1), o(2), \dots, o(n)$, 其中o(r) ($r = 1, 2, \dots, n$)是实数,代表o的第r个坐标,两个点 $P = (p(1), p(2), \dots, p(n))$ 和 $Q = (q(1), q(2), \dots, q(n))$ 之间的距离d(P,Q)定义为下面的公式:

$$d(P,Q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2}$$
$$= \sqrt{\sum_{r=1}^n (p_r - q_r)^2}.$$
 (3)

图像中恒星在四边形中的相对位置被映射 到k-d tree组成的连续四维"代码空间"作为一个节 点,通过解算星表中离该点最近的点来完成匹对 识别.



Fig. 3 Diagram of the geometric hashing approach

2.4 测光及流量定标

测光是指使用矩形或椭圆环绕目标区域进行 光度测量,本文采用孔径测光其原理如图4所示, R1为测光孔径,从R2开始以Width为厚度的圆环 用于计算天光背景,这些参数的数值取决于恒星的 半高全宽(Full Width at Half-Maximum, FWHM). 本文R1选取2倍的FWHM,R2选取5倍的FWHM, Width选取2倍的FWHM.累计该区域内的所有流 量然后扣除背景得到该目标的净流量,然后再将净 流量归算成仪器星等,净流量计算公式为:

$$Flux = Sum - Area \times Msky; \qquad (4)$$

式中Flux为目标净流量; Sum为区域内流量值总和; Area代表区域内总像素个数; Msky为区域内每个 像素的天光值. 定义仪器星等Mag为:

$$Mag = Zmag - 2.5 \lg (Flux); \qquad (5)$$

其中Zmag为测光零点,其数值由星等系统以及观测波段来确定.通过(5)式计算可以获得仪器星等, 仪器星等的泊松误差^[5]为:

$$\Delta m = 1.0857 \sqrt{A\sigma_{\rm b}^2 + I/g/I} \,. \tag{6}$$

式中A为像素数,用于计算流量强度的面积; σ_b 代表背景噪声与读取误差的标准差^[5]; *I*为测得的目标源的总流量强度; *g*为探测器增益.



图 4 孔径测光示意图 Fig. 4 Diagram of aperture photometry

通过测光得到的是仪器星等,为使该结果与标准星等具有可比性,还需做流量定标将观测星等转化到标准系统下的星等^[10].由于该设备并未加装滤光片,本文选取国际标准(UBV)3色测光系统中的可见光波段V波段进行校准,该波段的零星等流量就是织女星(Vega)在该波段的流量,这里我们采取如下的星等转换方程:

$$V = v_0 + \varepsilon (\mathbf{B} - \mathbf{V}) + \xi \,. \tag{7}$$

式中V代表V波段标准星等,其值由星表给出, v_0 是 观测值即仪器星等, ε 为系统转换系数,B-V为标准 系统下色指数数值,可在星表中查询, ξ 为常数项.

在天文实测中,相机的测光精度常用来评估观 测数据质量的高低,测光精度受众多因素影响,例 如大气消光、望远镜系统、相机自身特性等,由于 大气消光与观测仰角具有相关性,而拍摄时指向天 区固定并无仰角变化,无法通过图像数据进行大气 消光系数的拟合,因此这里不做大气消光改正,只 进行仪器星等到标准星等的转化工作.

对于可转动光电阵的KL4040型sCOMS相机, 本文从实测方面对其测光精度进行评估分析.主要 方法是将观测图像进行预处理后与UCAC2 (The Second U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog)星表进行匹对识别,并对星表中的标准星 进行定位.将测光处理后得到的仪器星等与标准星 等对比,以计算和评估sCOMS相机的实际测光精 度.测光数据的获取及数据处理流程图如图5所示.



Fig. 5 Flowchart of data acquisition and processing

3 实测精度分析

空间碎片的光度随其运动不断变化,而且目 前并没有标准光度做参考,因此不能用空间碎片 分析望远镜的测光精度,本文将280mm全天区可 转动光电阵的巡天观测图像与星表进行匹对,对 图像中的星表成员星进行识别标注,用这些成员 星进行实测精度分析.星表记载了天体的位置、 星等、光谱型等信息[11],通常的天文观测中都离 不开对星表的调用.常用的星表有CDS (Centre de Donnees Astronomiques de Strasbourg)星表、 USNO (US Naval Observatory)星表、Hipparcos星 表、UCAC2星表等. UCAC2是由美国海军天文台 出版的一份高密度、高精度的天体测量星表, 它囊 括了48330571颗恒星,覆盖天区较广,某些天区能 够达到+52°, 星表中所有恒星都能提供自行和光 度测定,位置在历元J2000.0中给出^[12].UCAC2星 表文件数据量庞大,且都是以二进制格式进行存 储. 索引文件均是以赤经赤纬来划分, 用户可以通 过UCAC2星表给出的FORTRAN语言和C语言的 数据访问接口进行星表的调用查询和匹对工作.

将280 mm全天区可转动光电阵于2020年12月 5日拍摄的巡天观测图像与UCAC2星表进行匹对, 结果显示图像中大致有十万颗UCAC2标准星,由 于数量庞大无法兼顾到每一颗星,因此选取其 中10000颗星等在10-17之间的标准星进行测光精 度评估.对选取的目标进行测光,将获得的仪器星 等和星表中对应的标准星等代入(7)式,以B-V为横 坐标, V-v₀为纵坐标.采用最小二乘法拟合确定转 换系数ε和ξ,分别为直线的斜率与截距.整个过程 通过Matlab编程实现,结果如图6所示,并得到标准 系统下仪器星等V₄的转换方程:

$$V_{\rm t} = v_0 + 0.9029 \times (B - V) - 0.2312.$$
 (8)

利用(8)式将10000颗目标的仪器星等v₀进行转 化,得到转化后的仪器星等V_t,然后与星表中对应 的标准星等V作差得到差值O-C,差值的分布情况 如图7所示.接下来根据公式

RMSE =
$$\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{h=1}^{m} (V_{t_h} - V)^2},$$

$$(2000 \leqslant m \leqslant 10000, h = 1, 2, \cdots, m), \quad (9)$$

计算不同数量标准星条件下的转化后仪器星等与标准星等的均方根误差,从而对卷帘快门sCMOS相机的实际测光精度进行分析评估,结果图8所示.



图 6 最小二乘法拟合星等转化系数

Fig. 6 Least square fitting of magnitude conversion coefficient





由图7可以看出这10000颗目标星转化后仪器星等与标准星等的差值集中在±0.1之间,

说明KL4040型sCMOS相机的测光精度较高,稳定性良好;由图8可知该相机的测光精度优于0.141 mag且随标准星数量的增加整体呈现出减小的趋势,这一点符合统计学原理,也从侧面反映出卷帘快门sCMOS相机具有较高测光准度及稳定性.图7中有少量恒星的O-C值较大,同样的在图8中也出现了RMSE局部上升的现象.为了定性分析这些现象,将10000颗标准星按照星等划分并分析相应的测光误差,结果如图9所示.



图 8 转化后仪器星等与标准星等的均方根误差

Fig. 8 RMSE of instrument magnitude and standard magnitude after transformation



Fig. 9 Photometric errors of standard stars with different magnitudes

根据图9所示, 星等介于10-14之间时, 测光误 差优于0.15 mag, 测光误差的数值随着星等数值的 变大呈现出增大的趋势. 在16等星和17等星处测光 误差较大, 这一现象与sCMOS相机自身限制有关, 暗弱天体的观测对相机的量子效率、暗电流、读 出噪声等关键性能指标提出了较高的要求, 而与传 统CCD相机相比, sCOMS相机这些方面的性能指 标稍逊色^[13], KL4040相机对暗星的实测结果也与 之相符. 由此可知卷帘快门sCMOS相机对于暗弱 天体的光度测量存在较大的偏差. 这一点可以解释 上述图7中出现的星等差值较大以及图8中出现的 随着成员星个数增加均方根误差局部上升的现象.

4 结语

相比于CMOS相机, sCMOS相机的读出噪声 得到了有效控制,在填充因子、量子效率和动态范 围等方面都有了明显的改善,而且在空间目标巡 天观测等采用短曝光且对时间分辨率要求较高的 观测项目中表现优异,与此同时较高的性价比使 得越来越多大视场巡天设备选择sCMOS相机作为 成像终端. 本文以280 mm全天区可转动光电阵为 例,对其成像终端KL4040型sCOMS相机进行了实 测精度分析,结果表明在标准测光夜测量星等亮 于14的恒星时, 其测光精度优于0.15 mag, 然而对 于暗于16等的暗星而言测光误差较大,这一结果并 不理想. 根据实测精度分析可知该sCOMS相机在 高精度光度测量以及暗弱空间目标探测中的表现 有待提高,但是在空间目标识别跟踪及位置和光度 信息实时获取方面,该相机的表现是较为优异的, 同时相机的实测精度也可以满足空间目标的巡天 观测要求.

通常巡天观测数据量庞大且处理过程繁琐, 巨大的工作量使得难以实时获取目标的测光精 度等信息,从而无法及时调整观测策略.本文通 过Matlab编程把280 mm全天区可转动光电阵的巡 天图像与UCAC2星表进行匹对识别,简化了观测 数据的提取、拟合、计算及精度校验过程,实现了 大批量数据的集中一体化处理,提高了工作效率. 足量的实测数据参与最小二乘拟合与测光精度分 析,使结果更具有可信度与普遍性,可在实际观测 工作中应用.

致谢 感谢审稿老师和编辑老师提出的宝贵意见. 感谢吉林天文观测基地观测助手李博文、郭春雷、 张广晟的辛苦付出.

参考文献

- [1] 张晓祥, 赵金宇, 贾建禄, 等. 光学精密工程, 2018, 26: 1441
- $\left[2\right]$ Qiu P, Mao Y N, Lu X M, et al. RAA, 2013, 13: 615
- $[3]\,$ Fossum E R. ITED, 1997, 44: 1689
- [4] 杜俊举. 空间碎片的测光观测与图像处理. 威海: 山东大学(威海), 2015: 2-11
- [5] 阮志锋, 邬文弢. 天文研究与技术, 2016, 13: 266
- [6] 李振伟, 张涛, 张楠, 等. 光学精密工程, 2015, 23: 2627
- [7] 李振伟, 张涛, 孙明国. 光学精密工程, 2015, 23: 589
- [8] 张艳, 林众, 郭迪福. 天文研究与技术, 2011, 8: 410
- [9] Lang D, Hogg D W, Mierle K, et al. AJ, 2010, 139: 1782
- [10] 钱伯辰,陶隽,潘红鉴. 中国科学院上海天文台年刊, 1997, 18: 190
- [11] 高丹,张彦霞,赵永恒.天文研究与技术(国家天文台台刊),2007,
 4:53
- [12] 邵红会. 基于UCAC2星表的索引数据库的设计与实现. 济南:山 东大学, 2010: 7-16
- [13] 高策. 智能计算机与应用, 2017, 7:96

Photometric Accuracy Analysis of sCMOS Camera in Large Sky Telescope

NIU Bing-li^{1,2} LIU Cheng-zhi¹ LI Zhen-wei¹ KANG Zhe¹ LV You¹

(1 Changchun Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130117)

(2 School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT Compared with the traditional CCD (Charge Coupled Device) camera, sCOMS (scientific Complementary Metal Oxide Semiconductor) camera is widely used in super large sky survey equipment. Different from the traditional CCD camera, sCMOS camera adopts rolling shutter, so it is very meaningful to study its photometric accuracy. Firstly, the UCAC2 (The Second U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog) standard stars in the image were identified by matching the image captured by the sCMOS camera with the UCAC2 catalog. Then, the photometry work of these standard stars has taken and the photometric data was extracted for least square linear fitting. The corresponding system conversion cofficients were obtained and the relations between instrument magnitudes and standard magnitudes were also discussed. The differences between the converted instrument magnitude and the standard magnitude were then compared, and the corresponding root mean square error has been calculated. Finally, the calculated root mean square error was used to estimate the photometric accuracy of the sCMOS camera, and the brightness-dependent photometric error analysis of standard stars was made. The results indicate that the photometric precision is 0.15 mag for objects brighter than 14 mag under photometric conditions. Through the analysis of the measurement accuracy, it can be seen that the sCOMS camera with rolling shutter has high photometric accuracy, which basically meets the requirements of space debris survey.

Key words instrumentation: detectors, catalogs, standards, techniques: photometric, methods: data analysis