

天文选址的夜间云量处理方法*

尹 佳^{1†} 姚永强¹ 王红帅^{1,2} 李 林¹ 尤显龙¹
周云贺¹ 马江龙¹ 刘立勇¹ 李俊荣¹ 钱 璇¹

(1 中国科学院国家天文台 北京 100012)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 云量是影响天文台址质量最重要的因素之一, 对夜间云量的检测和处理尤为重要. 采用地面云量相机对全天云量进行监测, 所拍摄的图像需要有效的方法进行处理以量化云量. 夜间云量图像受月光的影响严重, 因此将夜间的云量图像分为有月夜和无月夜两类进行处理. 针对无月夜情况, 给出了夜间云量的处理过程. 对图像中的亮星进行定位和测光, 确定星等差. 以晴夜图像中亮星的星等差为参照, 将星等差低于阈值条件的亮星概率作为晴夜的概率标准. 选取了 3 类图像对该方法进行测试并确定云量, 分析了阈值条件对结果的影响. 最后, 讨论了该方法的适用范围和不确定性.

关键词 天文选址, 技术: 图像处理, 方法: 数据分析

中图分类号: P 112; **文献标识码:** A

1 引言

影响天文台址观测条件的因素众多, 包括各气象要素和大气光学特性, 云量是衡量天文台址质量最重要的指标之一. 云量的监测方法包括目视观测、卫星探测和地面相机拍摄. 目视观测的方法较为粗略, 其结果受人为因素的影响较大. 卫星探测可以提供长期的、大地域的云量资料, 但是其空间分辨率不高. 地面的全天云量相机 (All-Sky-Camera) 所拍摄的云量图像具有较高空间分辨率, 其分析结果能够准确地反映当地的云量覆盖与变化特征. 而且, 云量相机便于携带, 能够拍摄高质量的图像. 因此, 云量相机的监测方法得到了广泛的应用, 如 TMT (Thirty Meter Telescope) 和 LSST (Large Synoptic Survey Telescope) 等项目都积极采用了 All-Sky-Camera 对候选站点进行云量的监测和分析^[1-2].

然而, 云量图像的自动化处理方法较少, 有待深入研究, 而且云量本身也缺乏明确统一的量化标准. 对于白天的云量图像, 基于云和大气对光散射存在差异, 可以将蓝 / 红两个波段的亮度比作为区分云和晴空的依据, 采用阈值分割方法即可将云和背景分开并计算云量^[3]. 对于夜间的云量图像, 简单的阈值分割方法不足以区分云和夜空. 较粗略的方法是将图像制作成相应的动画, 肉眼判断云量大小^[4]. 这种人工方法需要设置有

2011-08-23 收到原稿, 2011-11-21 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (11103042, 11073031, 10903014) 和中国科学院国家天文台青年人才基金项目资助

† jyin@bao.ac.cn

效的判断依据, 但人为因素的影响不能忽视. Smith 等^[5] 和 Shamir 等^[6-7] 提出了一种较准确的方法, 对背景亮星进行测光并估计大气消光情况, 根据全天空的消光或不透明度判断云量的大小. 其方法的特点是需要将观测图像与具有相同恒星时时刻的晴夜图像(一般是前一夜) 进行比较以获得全天消光分布, 这需要积累大量的晴夜图像作为标准.

西部天文选址项目经过长期的云量监测, 积累了大量的云量资料. 基于充分的云量数据和图像分析研究, 本文以高美古的观测数据为例, 给出一种夜间云量图像的实用处理方法, 包括亮星定位、标准图像生成和云量计算. 本文选取了 3 种类型的夜间云量图像进行云量估计, 检验该方法的可行性.

2 云量观测

西部天文选址对中国西部的部分优良天文台址进行了监测, 监测地点有高美古、卡拉苏、物玛等, 这些地方的海拔均在 3 000 m 以上, 气压和气温都比较低. 监测内容包括当地气象条件、视宁度、云量等等. 对于云量的监测, 选址项目采用了气象资料和地面云量相机拍摄等手段. 云量相机采用 SBIG AllSky-340 全天云量相机, 观测时将其固定于监测地点, 以便得到长期的图像数据. 云量相机的观测视场为 $135^{\circ} \times 180^{\circ}$, 其 CCD 具有很高的灵敏度. 实际监测时设置曝光时间为 120 s 或 300 s, 可以探测到远暗于肉眼极限星等的恒星, 约 10 mag.

夜间云量图像显示了亮星的分布情况, 同时也可以用于估计大气消光对亮星亮度的影响. 根据大气消光理论可知 $m - m_0 = kM(z)$, 其中 m 和 m_0 分别是亮星在大气内外的视星等, k 是大气消光系数, $M(z)$ 是大气质量, 其表达式如下^[8]:

$$M(z) = \sec z - 0.0018167(\sec z - 1) - 0.002875(\sec z - 1)^2 - 0.0008083(\sec z - 1)^3,$$

z 是天顶距. 图 1(a) 实线和表达式给出亮于 3 mag 的亮星星等差与天顶距的拟合结果, 拟合公式是 $\Delta m = Z_0 + kM(z)$, 其中 Δm 是亮星的孔径测光星等和星表星等的差值, 它包括大气消光 $kM(z)$ 和零点星等差 Z_0 . 亮星的匹配和星等差的计算见第 3 节. 这里选取高美古 2009 年 12 月至 2010 年 3 月的部分晴夜图像进行大气消光的估计, 图 1(b) 显示大气消光的拟合结果随时间的变化. 由图可以看出, 大气消光系数 k 的变化范围是 $0 \sim 0.5$, 对亮星的消光作用很小. 零点星等差 Z_0 在 14.7~15.4 mag 的范围变化, 变化幅度也很小. 可见, 在这段时间内高美古的大气消光变化是比较稳定的, 任意晴夜图像的消光情况可以代表大气的消光状况.

3 图像处理

全天云量相机采用定点拍摄模式, 图像中亮星的坐标与地球自转和地理位置相关, 因此可以通过坐标转换方法对亮星的天文位置与其在图像中的位置进行匹配. 这些亮星的星等值可以用测光方法确定, 也可以由已有星表查得, 如此可以确定实测星等差. 星等差反映了大气不透明度、夜天光和云的散射吸收等综合信息, 一般来讲, 云的影响是最显著的, 根据星等差的大小与分布情况可以量化图像中的云量.

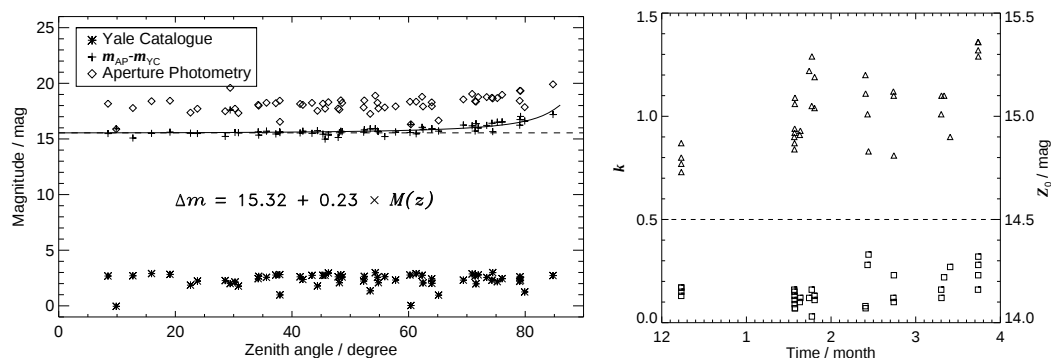


图 1 (a) 星等差 Δm 与天顶距的关系. 星号、菱形和十字符号分别表示亮星的星表星等、测光星等和两者的差值, 实线是星等差的拟合结果, 虚线表示天顶位置的星等差. (b) 大气消光的拟合结果随时间的变化. 三角和正方形分别是星等零点差和大气消光系数.

Fig. 1 (a) Relation of differential magnitude values and zenith angles. The asterisk, diamond, and plus signs represent the star magnitudes of Yale catalogue, the star magnitudes of photometry result, and the magnitude differences of stars, respectively. The solid line shows the fitting result of the magnitude differences of stars, the dashed line shows the magnitude differences at zenith point. (b) The fitting result of atmospheric extinction changed with time. The triangle and square show the difference of magnitude zero and the coefficient of atmospheric extinction, respectively.

3.1 图像定位

图像中的亮星定位需要与较全面的星表进行比较, 这里选取了耶鲁亮星星表作为比较标准. 耶鲁星表列举了 9 110 个视星等超过 6.5 mag 的天体, 几乎涵盖了地球上肉眼能看到的所有恒星. 星表还提供了天体的赤经、赤纬、银经、银纬、视星等、名称等信息.

为了直接比较图像中的亮源和星表中的亮星, 需要将两者进行匹配, 匹配的依据是亮星在图和星表中的两套坐标. 参考 Pickering^[9] 对 MMT All-Sky-Camera 的云量图像的亮星匹配方法, 采用 IDL 的天文软件包对星表中的亮星进行坐标转换. 将亮星由赤道坐标 (α, δ) 或银道坐标 (b, l) 转换到地平坐标 $(A, h$ 或 $z)$. 地平坐标是极坐标形式, 图像坐标 (x, y) 是笛卡尔坐标形式. 比较多颗亮星在两个坐标下的位置, 可由拟合方法确定两个坐标之间的对应关系.

极坐标 (R, θ) 转换为图像坐标, 采用如下关系式:

$$x = x_0 + R \times \cos\theta, \quad y = y_0 + R \times \sin\theta,$$

其中

$$\theta = \theta_{\text{off}} - A, \quad R = a \times z,$$

(x_0, y_0) 是天顶在图像中的坐标, θ_{off} 是极坐标的 θ 相对于方位角 A 的偏移量 (如图 2 所示). 由于相机的鱼镜头有较好的曲率校正 (-0.47%), 所以半径 R 和天顶距 z 呈线性关系.

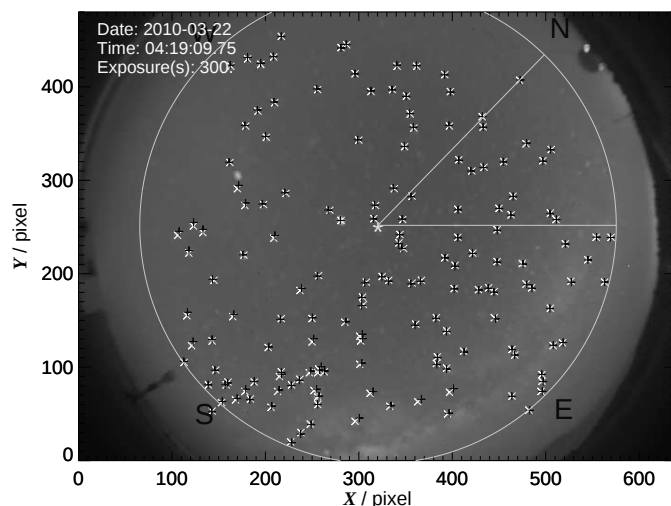


图 2 亮星的拟合结果与实际坐标的比较, 叉乘号是亮星的实际坐标, 十字是拟合结果, 圆圈是 $z = 75^\circ$, 星号是山顶位置, 锐角是相对于地平坐标系北点的偏移量 θ_{off} .

Fig. 2 The real coordinates of bright stars with “ $\times$ ” and the fitting coordinates of counterparts with “+” plotted in the image. Asterisk is the position of zenith, the circle of zenith angle is 75 degree, the acute angle, θ_{off} , shows the offset angle relative to the north point.

选取一幅晴夜图像, 挑选了 155 颗著名星座的亮星进行比较. 对亮星的两套坐标进行拟合, 最佳拟合结果是:

$$x_0 = 320.502, \quad y_0 = 251.792, \quad \theta_{\text{off}} = 45.716, \quad a = 3.400.$$

图 3 给出了这 155 颗亮星的两套坐标的比较, 横坐标是由耶鲁星表转换的地平坐标, 纵坐标是图像坐标经转换的极坐标. 由图 3(a) 可以看出亮星的天顶距与半径有很好的线性关系, 两者的差值较小, 均在 3 pixel ($1^\circ = 3.4 \text{ pixel}$) 内. 图 3(b) 纵坐标是 $A = \theta_{\text{off}} - \theta$, 它与亮星的方位角相对应, 方位角误差在 2° 以内.

图 2 比较了坐标转换亮星定位的精度, 叉乘符号是亮星在图像中的实际位置, 十字符号是星表相应亮星经拟合关系转换得到的坐标, 两者的最大位置差约 5.88 pixel, 平均位置差是 1.4 pixel. 图中还给出了图像的观测日期、时间、曝光时间和 4 个方位, 圆圈表示天顶角 $z = 75^\circ$.

3.2 云量测定

实际观测过程中全天云量相机固定不动, 因此亮星的坐标转换关系是稳定不变的. 基于可行的图像定位方法, 我们可以将亮星由星表坐标转换到图像位置, 进而对该位置的星点进行测光. 图 4 显示了星等亮于 5 mag 的亮星由星表坐标转换到图像中的位置. 然而, 亮星的转换坐标与其实际坐标存在偏差, 因此需要重新确定亮星的中心, 以便于测光. 这里采用二维高斯拟合方法确定亮星的测光中心, 拟合中心是 (x, y) , 拟合半径取 5.5 pixel, 该过程会排除拟合结果较差的星点.

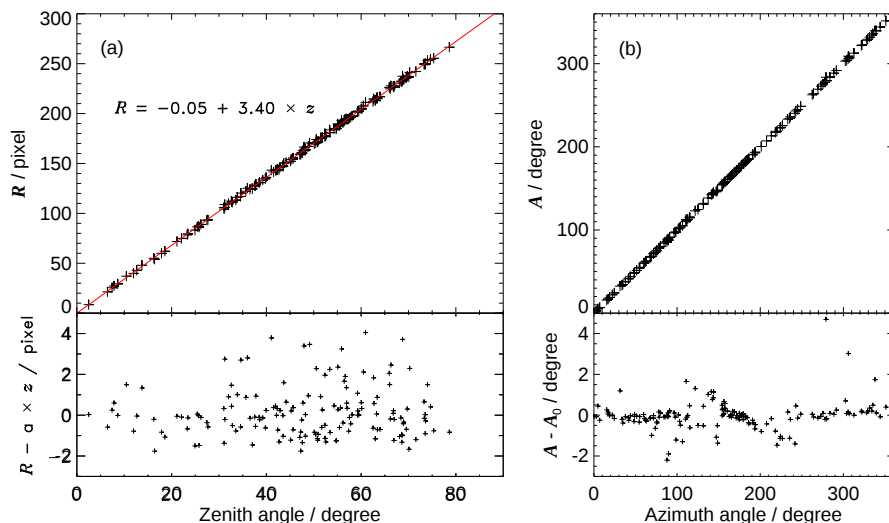


图 3 图像亮星的拟合位置与由星表转换的地平坐标的比较. (a) 亮星的半径与天顶距的比较; (b) 两组方位角的比较.

Fig. 3 Relation of the fitting positions (A , R) of reference stars in the image and the horizontal coordinates (A_0 , z) of the counterparts in the Yale catalogue. (a) Radii of stars from zenith point versus zenith angles and their difference values; (b) Azimuth angles of stars from azimuth point of image versus azimuth angles and their difference values.

测光方法采用孔径测光, 测光半径为 5 pixel, 位置偏差大于 5 pixel 的亮星将被排除. 对于位置很近的多个源, 其测光结果是几个源的合星等 m_{phot} , 而星表中相应的星等值 m_{tab} 选用该位置最亮星的星等值, 一般两个亮星邻近的情况居多. 若两个等亮度的邻近亮星, 其合星等与单个亮星星等会有 0.75 mag 的差别. 实际测光误差远小于 0.75 mag, 该值可作为测光误差的上限. 对于单独一张晴夜的云量图像 (如图 4), 亮星总数 N_{total} 为 500 多颗, 测光并筛选后的亮星数 N_{phot} 约 400 颗. 为确定图像中天顶角 $z < 75^\circ$ 范围的云量, 选取 $z < 80^\circ$ 的星表亮星以消除边界误差.

测光后可计算星等差 $\Delta m = m_{\text{phot}} - m_{\text{tab}}$, 它反映了当时亮星位置的大气消光情况, 现称为“亮度起伏”. 图 4 给出了测光亮星在图像中的位置分布, 而整个天空的亮度起伏则需要使用插值方法进行确定. 插值方法有反距离加权插值法、Kriging 插值法、改进的 Shepherd 法、最小曲率插值法、线性插值法、最近邻点插值法、自然邻点插值法、径向基函数法、多元回归法和 Quintic 插值法等. 我们对这些方法做了尝试, 其插值结果均不理想, 可能由于插值点的数目较少. 例如如图 5(a) 所示, 它显示的是反距离加权插值法的结果, 指数取 1/3, 图中的数值变化范围是 0.47~1.70 mag (仪器星等零点设为 10.8 mag). 虽然淡化了牛眼现象, 但是局部特征比较明显, 说明单独一张图像的插值结果可能不足以反映全天空通常的亮度起伏.

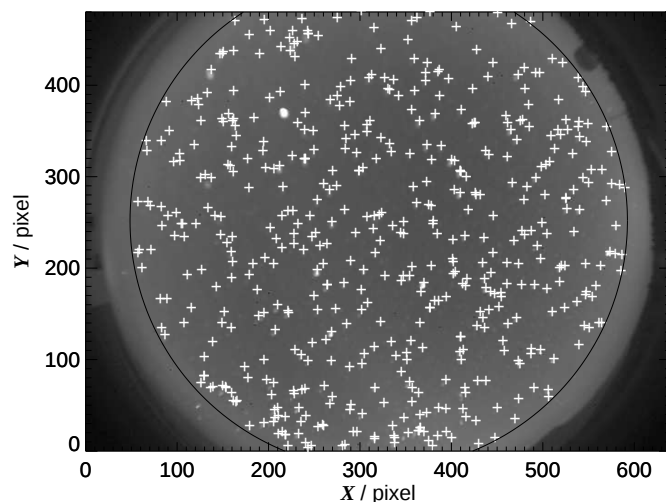


图 4 天顶角小于 80° 的星表亮星显示在图中, “+” 显示其位置, 圆圈是 $z = 80^\circ$.

Fig. 4 The positions of bright stars showed with “+” in the image, the circle is $z = 80^\circ$.

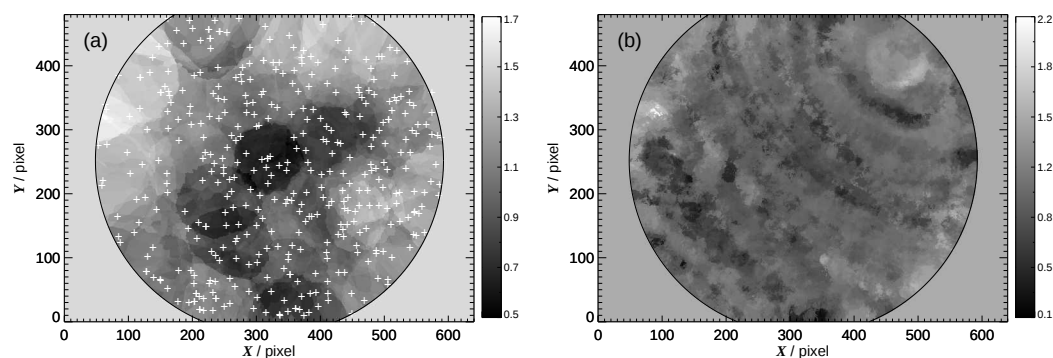


图 5 (a) 单幅图像的全天亮度起伏 Δm ; (b) 多幅图像的全天亮度起伏 Δm_{std}

Fig. 5 The floating of magnitude difference interpolated from bright stars of one image and 21 images showed in (a) and (b), respectively.

为了得到接近实际的、较平滑的全天亮度起伏, 这里采用了对多幅晴夜图像的 Δm 取中值的插值方法. 我们选取不同月份不同恒星时时刻的 21 幅晴夜图像, 其总的插值点 Δm 约 9 000 个. 图 5(b) 给出了插值结果, 图像每个位置 (pixel) 的数值由邻近的 30 个 Δm 取中值得到, Δm 变化范围是 $0.13 \sim 2.18$ mag. 该图的亮度变化较平缓, 但仍有天体运行的痕迹. 初步将图 5(b) 作为云量测定的参照标准 Δm_{std} , 任一云量图像的亮星的星等差 Δm 与全晴夜分布 Δm_{std} 相比较, $A_{\text{cloud}} = \Delta m - \Delta m_{\text{std}}$, 它反映了云的吸收与覆盖情况.

对于 21 幅晴夜图像, 其 A_{cloud} 应该是众数几近为零的随机空间分布. 统计分布结

果亦表明这一点, 21 幅图像的 A_{cloud} 均呈标准的正态分布. 图 6 给出了其中一幅图像 (图 7(a)) 的 A_{cloud} 的统计分布结果. 对于有云的图像, 其 A_{cloud} 分布必然向右侧倾斜, 因此可以由 A_{cloud} 的大小判定不受消光影响的亮星概率, 即亮星的探测率. 这里对 21 幅晴夜图像的 A_{cloud} 分布进行高斯拟合, 计算平均结果 $\sigma = 0.37$ (统计误差为 0.04). 取 $3\sigma = 1.11$ 作为阈值条件, 小于该阈值的亮源可认为没有云的影响, 其全天统计数目为 N_{good} . 由此, 可以计算可测光亮星概率 $P_{\text{phot}} = N_{\text{phot}}/N_{\text{total}}$ 和满足阈值条件的亮星概率 $P_{\text{good}} = N_{\text{good}}/N_{\text{total}}$. 21 幅全晴夜图像的 P_{phot} 平均值是 76.66% (统计误差为 0.024 3), P_{good} 的平均值为 73.28% (误差为 0.025 3). 以平均概率 $\overline{P_{\text{good}}}$ 作为完全晴夜的概率标准, 则云量的数值估计定义为 $P_{\text{cloud}} = 1 - P_{\text{good}}/\overline{P_{\text{good}}}$.

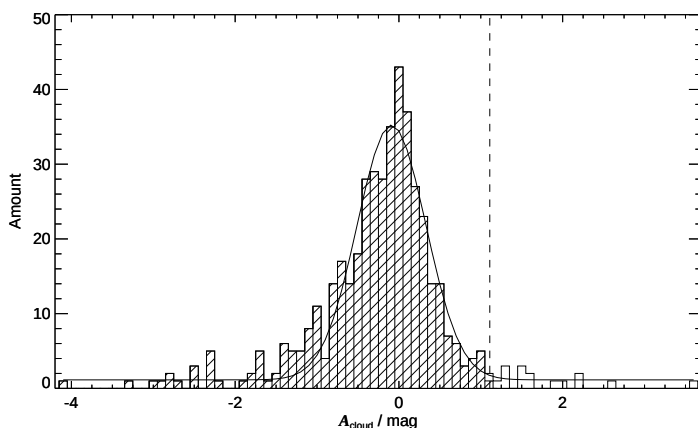


图 6 晴夜图像 A_{cloud} 的统计分布, 实线是高斯拟合结果, 虚线是阈值条件 $3\sigma = 1.11$.

Fig. 6 The distribution of A_{cloud} from one of 21 images. The solid line shows the result of gauss fitting, the dashed line shows the threshold value $3\sigma = 1.11$.

4 方法测试

为了检验上述方法的可用性, 选取了 3 类云量图像进行测试, 包括镜头结冰、部分有云和全部是云的情况. 测试结果在表 1 中列出.

表 1 图像测试结果

Table 1 The result of image testing

Image type	N_{total}	N_{phot}	P_{phot}	N_{good}	P_{good}	P_{cloud}
Clear night	578	449	0.777	432	0.747	-0.020
Icy lens	456	267	0.586	66	0.145	0.802
Part of cloud	564	341	0.605	244	0.433	0.410
Full of cloud	507	143	0.282	16	0.032	0.957

表 1 给出了图像的类型、图像中天顶角 $z < 75^\circ$ 的亮星总数、可测光亮星的数目及其概率、满足阈值条件的无云亮星的数目及其概率和图像的云量估计. 图 7 显示了相应

的标准晴夜图像和 3 种测试类型的云量图像, 图中 “+” 表示满足阈值条件的亮星位置. 由图可见, 晴夜图像 (a) 的亮星分布均匀, 没有云的遮挡. 镜头结冰图像 (b) 有明显的结冰痕迹, 亮星数目较少, 而且这些亮星可能并非真正的亮星. 部分有云图像 (c) 可以清晰地看到云的分布, 亮星分布情况与之相反. 全云图像 (d) 的亮星数目极少.

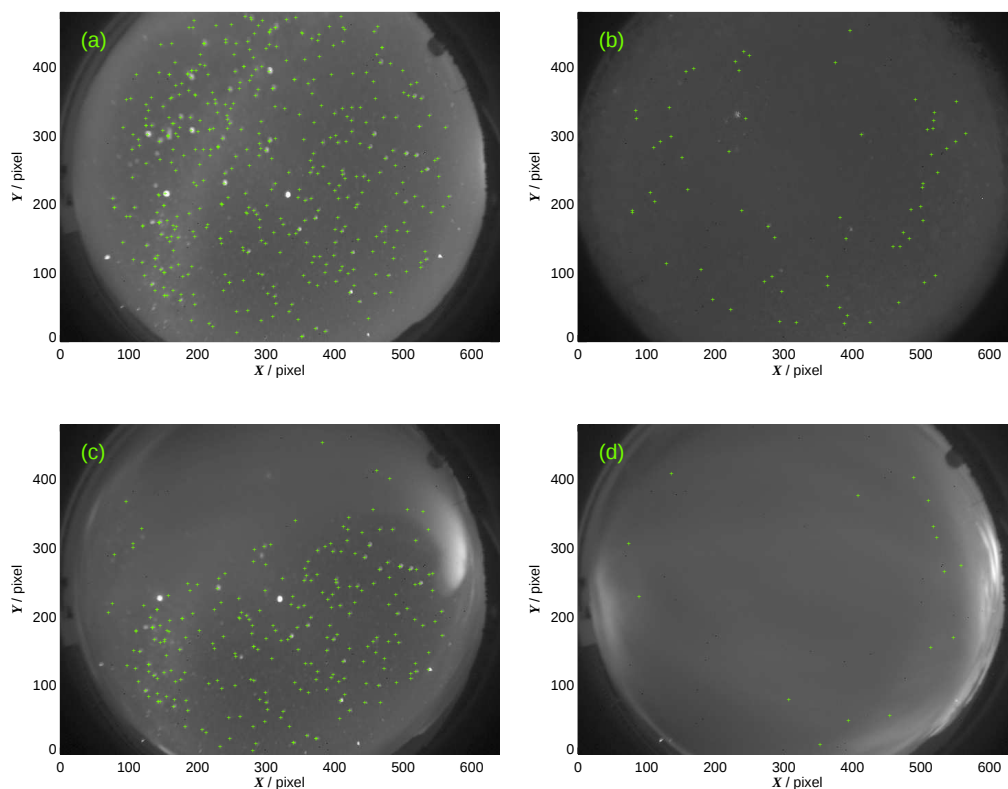


图 7 标准晴夜图像 (a) 和 3 种测试的图像类型: 镜头结冰 (b)、部分有云 (c) 和全云 (d). “+” 表示满足阈值条件的亮星.

Fig. 7 (a) The standard image and images with (b) icy lens, (c) part of cloud, and (d) full of cloud. The signs of plus show the bright stars met the threshold value.

晴夜的概率标准和 3 种类型图像的云量概率与阈值条件的设置相关, 图 8 给出了它们之间的关系. 晴夜标准概率在 2σ 以内有明显变化, 统计标准误差也较大, 之后就开始稳定不变. 镜头结冰和部分有云的情况, 其概率随 σ 的增大而减小. 在 $\sigma \sim 3\sigma$ 范围内, 两者的变化较平稳, 变化幅度不大. 对于全云情况, 其可测光的亮星数目较少, 概率的变化空间也很小, 几乎不受阈值条件的影响. 由此可见, 选取阈值条件在 $2\sigma \sim 3\sigma$ 范围内比较合适, 此时的概率标准稳定, 各种情况的云量结果变化不大.

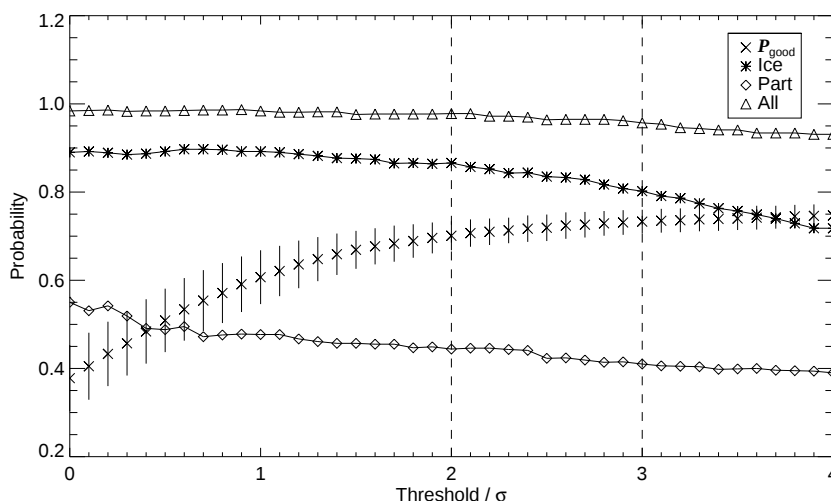


图 8 概率标准和 3 种图像的云量概率与阈值条件的关系, “ $\times$ ”和误差棒是标准的晴夜概率和统计误差, 星号、菱形和三角分别代表镜头结冰、部分有云和全云的概率.

Fig. 8 The standard probability of clear night and cloud cover of three kinds of image versus the threshold value. Times sign and error bar show the standard probability and error. The symbols of asterisk, diamond and triangle show the cloud cover of image with ice, part of cloud, and full of cloud, respectively.

5 结论与讨论

该方法适合大气消光比较稳定的环境, 消光变化幅度过大时云量结果会有较大偏差. 云量测定的大致步骤如下:

1. 亮星匹配. 根据亮星的星表坐标和图像位置, 拟合得到两者间的转换关系.
2. 亮星测光. 对图像中待测源的位置进行测光并计算星等差 Δm . 为避免过多的亮星重合, 测光的亮星不宜过暗以至于星点过于密集.
3. 标准图像生成. 选取多幅晴夜图像计算其亮星的 Δm , 对这些 Δm 进行插值. 需选取适当的插值方法, 生成的标准图像应较平滑.
4. 阈值条件确定. 晴夜图像的 Δm 与标准图像的差 A_{cloud} 呈正态分布. 由高斯拟合得到该分布的 σ , 并对多幅图像的 σ 取平均, 在 $2\sigma \sim 3\sigma$ 范围内选取阈值. 同时计算这些图像的亮星探测率 P_{good} , 取平均得到 $\overline{P_{\text{good}}}$.

5. 云量计算. 选取夜间图像重复第 2 步, 计算图像的 A_{cloud} , 最后计算 P_{good} 和 P_{cloud} .

该方法需要观测模式为定点观测, 使得图像定位的转换关系保持不变. 当观测地点更换时, 图像的坐标转换参数需要重新确定. 比较 Shamir 的模糊逻辑算法^[6-7], 本文的亮星定位过程更加简单, 所采用的晴夜图像可以是任意恒星时的图像. 虽然由星等差插值得到的标准图像可能不够精细, 但已有足够的精度可以量化云量. 同时, 便于之后各种无月夜图像的批量处理.

夜间云量的处理过程中, 对图像进行暗场改正, 而未能改正平场的影响. 其误差主

要是阈值条件的选取和测光误差, 云量随阈值的变化较平稳, 误差在 5% 左右; 测光误差也较小, 主要是距离较近的恒星组的星等值有较大误差 (< 0.75 mag). 对于薄云情况, 其检测结果取决于它对所处亮星的影响程度, 故小的阈值条件可以增强对薄云的检测.

本文重点解决无月夜的云量判定, 该方法所能应用的时间段不多, 主要是无月的情况或月光影响很小的情况, 后续针对有月夜的云量处理应更为重要.

致谢 感谢所有参加西部选址踏勘、建点和观测值守的人员.

参 考 文 献

- [1] Walker D E, Schwarz H E, Bustos E. SPIE, 2006, 6267: 87
- [2] Sebag J, Barr J, Saha A, et al. RMxAC, 2007, 31: 30
- [3] 施洋, 姚永强, 刘立勇. 天文研究与技术, 2008, 5: 415
- [4] Skidmore W, Schöck M, Magnier E, et al. SPIE, 2008, 7012: 74
- [5] Smith R, Walker D, Schwarz H E. ASSL, 2004, 300: 379
- [6] Shamir L, Nemiroff R J. PASP, 2005, 117: 972
- [7] Shamir L, Nemiroff R J. PASA, 2005, 22: 111
- [8] Hiltner W A. Astronomical Techniques. Chicago: University of Chicago Press, 1962
- [9] Pickering T E. SPIE, 2006, 6267: 42

A Method to Measure Cloudiness of All-sky Images in No-moon Nights

YIN Jia¹ YAO Yong-qiang¹ WANG Hong-shuai^{1,2} LI Lin¹ YOU Xian-long¹

ZHOU Yun-he¹ MA Jiang-long¹ LIU Li-yong¹ LI Jun-rong¹ QIAN Xuan¹

(1 *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT The site quality of astronomical observatory critically depends on cloud coverage, and the measurement of cloudiness is particularly important for selecting a telescope site. In recent site testing work, all-sky camera is widely employed to detect cloud. Due to the impact of moon light, the measurements of cloudiness of all-sky images are considered to be divided into two categories, no-moon nights and moonlit nights.

The method is described in this paper to deal with all-sky images in no-moon nights. By identifying the positions of bright reference stars and making photometry for a set of all-sky images in clear nights, we can set up a reference image with median smoothing of the differential magnitude values. The standard image can be taken as the threshold for clear nights, and the detectivity of stars in other images can be utilize to reveal cloud coverage. Three types of all-sky images, icy lens, part of cloud, and full of cloud, are selected to check up the method, and the effect of threshold determination on cloud estimates is discussed. Finally, the limitation and uncertainty of the method are discussed.

Key words site testing, techniques: image processing, methods: data analysis