

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.z1.06

太阳超精细磁结构的特征提取技术与 数值分析方法

邓林华^{1,2,3}, 安建梅⁴, 屈智宁⁵, 向永源^{1,3}

(1. 中国科学院 云南天文台, 昆明 650216; 2. 中国科学院 太阳活动重点实验室, 北京 100012; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 重庆文理学院 软件工程学院, 重庆 402160; 5. 四川理工学院 物理系, 自贡 643000)

摘要: 太阳磁场结构在日面上具有各种不同的空间尺度。我国最大口径的地基太阳观测设备 NVST (新真空太阳望远镜) 在光球波段上的衍射极限接近太阳磁元的尺度范围, 标志着太阳低层大气的成像观测迈入了优于 $0.2''$ 的高分辨率时代。NVST 已获取海量的光球观测数据, 扎根于米粒暗径里的超精细磁结构能够有效地分辨出来。光球亮点的观测特征和物理机制的研究是太阳物理领域中普遍关注且高度重视的前沿课题。采用图像处理技术来识别和提取出光球亮点并运用数值分析手段获取光球亮点的统计参数, 是十分重要的方法。提出了一种拉普拉斯变换和形态学膨胀相结合的图像处理算法, 可用来高效准确地识别出光球亮点, 并得到其典型直径、面积分布、形状演化和强度变化等特征参数。最后讨论了光球亮点的物理参数对于理解磁场能量从光球传输到日冕并对高层大气进行加热的科学意义。

关键词: 太阳光球; 精细结构; 特征提取; 数值分析

中图分类号: P111.41 **文献标识码:** A

1 引 言

太阳磁场结构在太阳大气层是普遍存在的, 并且具有各种大小不一的空间尺度。大尺度磁场结构存在于黑子活动区和剧烈爆发现象之中, 而中小尺度的磁场结构则位于太阳低层大气之中^[1]。光球亮点是扎根于米粒暗径里的超精细磁流管结构, 其横向足点运动以磁流体动力学波或微尺度磁重联的方式将磁场能量向高层大气传输并对其进行加热^[2]。光球亮点的典型尺寸与最小磁元和磁流管的尺寸较为接近, 而且在其周围汇聚了具有千高斯量级的磁场强度^[3]。因此, 研究光球亮点对于最小磁元或磁流管的探索具有重要的科学意义, 同时也对我

资助项目: 国家自然科学基金 (U1531140, 11503082, 11463003); 云南省应用基础研究计划面上项目 (2015FB192); 中国科学院太阳活动重点实验室开放课题 (KLSA201503); 四川理工学院基金项目 (2015RC43)

通讯作者: 安建梅, frais@sina.com.cn

国建设大口径太阳望远镜的必要性提供了充分的理论依据和科学支持。

近 10 年来, 随着国内外多台大中型地基和空基太阳观测设备的成功研制, 以及所配备的高性能观测终端和高效的图像重建算法, 为光球亮点的研究提供了前所未有的机遇, 同时也对揭示相关理论和物理机制创造了可能性^[4]。从太阳观测的角度来讲, 研究光球亮点的最大困难在于其空间尺度极小; 此外, 受到观测地址的视宁度条件和图像探测器的噪声的影响, 对其进行长时间高分辨率的观测也极其困难^[5]; 从图像处理的角度来讲, 由于光球亮点的亮度比平均光球强度略大, 受到重建算法无法针对目标进行有效设计以及破碎米粒不能完全剔除的影响, 对光球亮点的识别和提取将会更加困难^[6]。

对于光球亮点的识别、提取和跟踪算法的研究, 大体上可分为全手动、半自动以及全自动三种方法。Wiehr 等人提出了一种多阈值分割算法, 首先自动探测比光球平均强度较亮的特征物, 然后确定特征物的面积分布规律^[7]。Abramenko 等人提出了一种识别光球亮点的算法, 其设计流程为: 图像平滑 (增强光球亮点的对比度)、阈值选取 (利用等值线描绘出亮点结构)、特征提取 (选取不同阈值得到不同亮度的光球亮点)^[8]。Crockett 等人提出了一种基于边界搜索的识别方法来研究邓恩太阳望远镜 (DST) 的高分辨率观测数据, 得到的分析结果较为理想^[9]。研究表明, 光球亮点的尺度范围约为 100 ~ 200 km, 运动速度约为 1 ~ 5 km/s, 寿命约为 2 ~ 6 min, 亮度约为光球平均强度的 1.2 ~ 1.8 倍^[10]。由于不同作者分析的观测区域不尽相同, 观测条件和处理技术也不一样, 所得结论彼此相差较大。

目前新真空太阳望远镜 (NVST) 是我国最大口径的地基太阳观测设备, 利用其获取的观测资料来对光球亮点进行研究具有可行性。本文首先提出一种适用于 NVST 光球亮点的自动识别与提取算法, 然后研究了光球亮点的面积分布、强度变化和形态演化等特征参数, 最后讨论了光球亮点的物理参数在理解高层大气加热机制中的重要意义。

2 仪器与数据

云南天文台抚仙湖太阳观测站位于离昆明市约 60 km 的澄江县抚仙湖畔, 地理位置为北纬 24°34'48", 东经 102°57'01", 海拔为 1 720 m, 该地址的视宁度条件是目前全球范围内极为优秀的太阳观测台址之一^[11]。抚仙湖太阳观测站拥有 NVST、太阳低频射电频谱仪和光学与红外太阳爆发监测望远镜三台主力观测设备, 其中 NVST 拥有多通道观测系统、偏振分析器、大色散光谱仪等设备, 对太阳大气进行同步成像和成谱观测^[12]。

本文采用的观测数据是 NVST 于 2012 年 10 月 29 日的高分辨率光球重建图像, 像元分辨率和时间分辨率分别为 0.039"/pixel 和 25 s。当天的大气视宁度极好 (约为 10 cm), 我们选取了 228 张连续的光球图像作为数据集, 对应的时间跨度为 UT 06:13:41 至 UT 07:53:16 约 100 min 的连续数据。此外, 在太阳动力学天文台的光球强度图和纵向磁图数据的辅助下, 我们选取了区域大小为 400 pixel×400 pixel 的子区域进行实例分析, 该区域所对应的磁场强度为 -1.45×10^{-2} T。

3 结果与讨论

3.1 光球亮点的特征提取算法

识别光球亮点的最大难度在于其极小尺度和边缘模糊性，直径、亮度和亮度梯度是传统的三个识别法则^[13]。在这三个识别法则的前提之下，使用拉普拉斯变化和形态学膨胀相结合，可提高识别和提取光球亮点的准确性。首先，使用八邻近拉普拉斯算子对观测数据进行变换，变换后的二维化图像所呈现出米粒的亮度等级相近，而候选亮点区域变得更亮的效果。由于亮点所在位置的强度比邻近区域更明亮，变换后的二维化图像中的候选种子区域为正值，而米粒暗径和绝大部分米粒所在位置为负值。然后，使用形态学膨胀来剔除明亮的碎米粒和米粒上的亮点，剔除原则是亮点只存在于米粒通道之中，而非处于米粒之上。如果候选区域是真实的亮点，那么该区域包含的像素个数就是二维化图像中具有负值的像素个数；反之，该区域包含的像素个数就会含有二维化图像中具有正值的像素个数。将二维化图像中的候选区域进行两倍的膨胀，然后计算种子区域的像素个数与仅仅包含负值的像素个数的比值。如果比值等于 1，该点就是真实的亮点，反之该点就是误识别的亮点^[14]。

本文的研究对象是光球亮点，我们使用黑子识别算法剔除了黑子区域里的亮结构。图 1 中的四个子图展示了基于拉普拉斯变换和形态学膨胀相结合的 NVST 光球亮点识别和提取算法，结果表明该算法可以有效地识别出 NVST 高分辨率观测图像中的光球亮点。

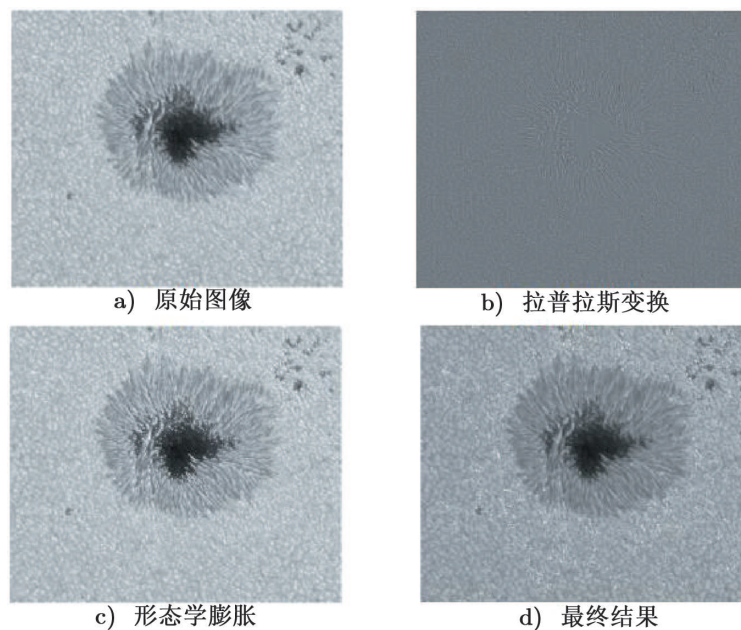


图 1 拉普拉斯变换和形态学膨胀相结合的 NVST 光球亮点识别算法

3.2 光球亮点的数值分析方法

图 2 展示的是光球亮点的直径、面积、偏心率和强度分布直方图及其对应的 Log-normal

拟合曲线。根据拟合的正态分布曲线可得光球亮点的直径期望值为 (181 ± 45) km, 这与日本 Hinode/SOT 的观测结果基本一致。面积期望值为 $(24\ 900 \pm 1\ 400)$ km², 该值大约是美国 DST 所得到的观测结果的 1/2, 意味着 NVST 在光球波段上的空间分辨率要显著优于该望远镜。偏心率的典型值为 1.84 ± 0.45 , 大约 60% 的偏心率介于 1.2~2 之间, 意味着亮点的形态并非是标准的圆形, 而是以椭圆形或丝状的居多^[15]。亮度的数学期望值为 1.060 ± 0.001 , 意味着亮点的最大强度略高于光球的平均强度^[16]。TiO 观测波段的对比度明显低于 G-band 的对比度, 这是因为 G-band 分子谱线形成于中光球, 而 TiO 分子谱线形成于低光球, 所以光球亮点的最大强度与光球平均强度较为接近。

从图 2 的四个子图可以看出, 光球亮点的尺寸分布、面积分布与形态分布是一致的, 与强度变化的拟合曲线略有差别^[17]。亮点的直径和面积越大, 偏心率也越大, 受到米粒对流元胞的挤压就会越显著。这符合强场区域抑制光球表面的磁对流效应的理论, 强场区域抑制了亮点的运动属性, 约束其分割和合并过程, 导致的结果是尺寸较大、形态稳定和亮度较强^[18]。此外, 分析结果还表明 NVST 的空间分辨率与 Hinode/SOT 相当, 略逊于美国的 1.6 m 新太阳望远镜, 优于美国 DST 和荷兰 DOT 等中型望远镜。

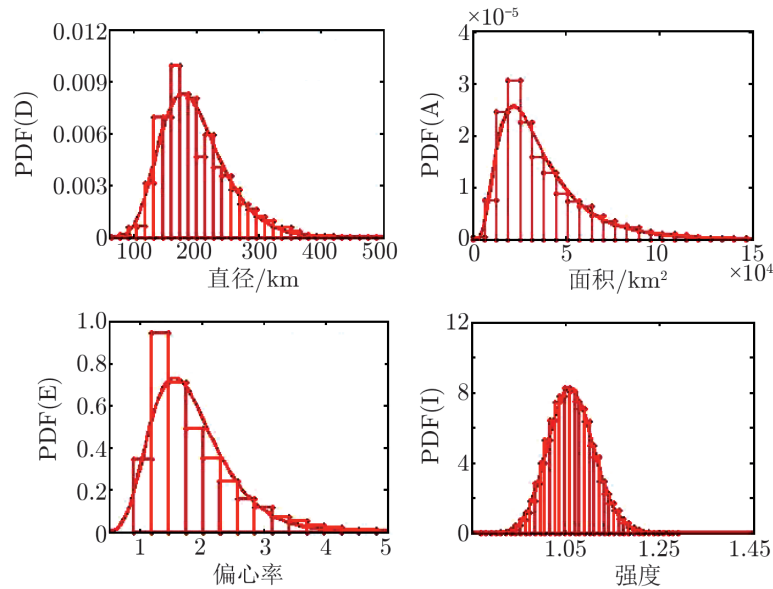


图 2 光球亮点的直径、面积、偏心率和强度分布直方图及对应的 Log-normal 拟合曲线

4 总结与展望

NVST 是目前我国口径最大的地基太阳观测设备, 利用其配备的多通道高分辨率观测终端对光球亮点的研究, 是评价 NVST 的高分辨率观测资料是否达到国际先进水平的重要参考要素。本文使用 NVST 的高分辨率观测数据对光球亮点的观测特征和统计特性进行分析研

究。主要的研究结论为：1) 提出拉普拉斯变换和形态学膨胀相结合的认识和提取算法，该算法可以有效地识别出米粒暗径中的光球亮点；2) 光球亮点的典型直径为 (181 ± 45) km，典型面积为 $(24\,900 \pm 1\,400)$ km²，偏心率为 1.84 ± 0.45 ，亮度为光球亮度的 (1.060 ± 0.001) 倍；3) 光球亮点的尺寸分布、面积分布与形态分布的曲线相同，与强度变化的拟合曲线略有差别，这与强场区域抑制光球表面的磁对流效应一致。

太阳超精细磁流管结构在太阳物理领域中占有极其重要的地位，光球亮点的起源和演化，以及色球和日冕加热的贡献，对局部发电机和微尺度磁重联的作用等都是未解之谜^[19]。即便对于光球亮点统计特性的分析研究，不同的研究人员得到的结论也大不相同。因此，利用大中型地基和空基太阳望远镜的高分辨率观测资料和相对应的高灵敏度磁场数据，对光球亮点的观测特征和物理机制的探索将会长期持续进行^[20]。总之，光球亮点的形成机制及其对高层大气的加热过程存在许多争议，需要更精细更精确的观测资料和更准确的数值模拟进行深入研究^[21]。

参考文献：

- [1] Beckers J M, Schroter E H. *Sol. Phys.*, 1968, 4: 142
- [2] Schussler M, Solanki S K. *A&A*, 1988, 192: 338
- [3] Morinaga S, Sakurai T, Ichimoto K, et al. *A&A*, 2008, 481: L29
- [4] Choudhary D P, Shimizu T. *Sol. Phys.*, 2013, 288: 171
- [5] de Wijn A G, Stenflo J O, Solanki S K, et al. *SSR*, 2009, 144: 275
- [6] Feng S, Deng L, Yang Y, et al. *Ap&SS*, 2013, 348: 17
- [7] Wiehr E, Bovelet B, Hirzberger J. *A&A*, 2004, 422: L63
- [8] Abramenko V, Yurchyshyn V, Goode P, et al. *ApJ*, 2010, 725: L101
- [9] Crockett P J, Mathioudakis M, Jess D B, et al. *ApJ*, 2010, 722: L188
- [10] Utz D, Hanslmeier A, Mostl C, et al. *A&A*, 2009, 498: 289
- [11] Liu Z, Beckers J M. *Sol. Phys.*, 2001, 198: 197
- [12] Liu Z, Xu J, Gu B Z, et al. *RAA*, 2014, 14: 705
- [13] Keys P H, Mathioudakis M, Jess D B, et al. *ApJ*, 2011, 740: L40
- [14] Yang Y, Ji K, Feng S, et al. *ApJ*, 2015, 810: 88
- [15] Nisenson P, Van Ballegooijen A A. *ApJ*, 2003, 587: 458
- [16] Riethmuller T L, Solanki S K, Martinez Pillet V, et al. *ApJ*, 2010, 723: L169
- [17] Romano P, Berrilli F, Criscuoli S, et al. *Sol. Phys.*, 2012, 280: 407
- [18] Criscuoli S, Rast M P. *A&A*, 2009, 495: 621
- [19] Ji H, Cao W, Goode P. *ApJL*, 2012, 750: L125
- [20] Lagg A, Solanki S K, Riethmuller T L, et al. *ApJ*, 2010, 723: L164
- [21] Jess D B, Mathioudakis M, Erdelyi R, et al. *Science*, 2009, 323: 1582

Feature Extraction Techniques and Numerical Analysis Approaches of Solar Ultra-fine Magnetic Structures

DENG Lin-hua^{1,2,3}, AN Jian-mei⁴, QU Zhi-ning⁵, XIANG Yong-yuan^{1,3}

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216; 2. Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 4. School of Software Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160; 5. Department of Physics, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000)

Abstract: Solar magnetic structures in the lower atmosphere exhibit a wealth of different spatial and temporal scales. Presently, solar magnetic element is believed to be the ultra-fine magnetic structure of the Sun, and the diffraction limit of the best solar telescope (New Vacuum Solar Telescope; NVST) of China is close to the spatial scale of magnetic element. This implies that solar observations have entered the era of high resolution better than $0.2''$. Since the year of 2011, the NVST has successfully established and obtained huge observational data. Moreover, the ultra-fine magnetic structures rooted in the dark inter-granular lanes can be easily observed. Studies on the observational characteristics and physical mechanism of photospheric bright points (PBPs) are the most important and hottest aspects in solar physics, so it is very important to obtain the statistical parameters of PBPs with the feature extraction techniques and numerical analysis approaches. For identifying the PBPs, an automatically and effectively detection algorithm employed the Laplacian transform and the morphological dilation technique is proposed. Then, the statistical parameters such as the typical diameter, the area distribution, the eccentricity, and the intensity contrast are obtained. And finally, the scientific meaning of studying the physical parameters of PBPs is discussed, especially for understanding the physical processes of solar magnetic energy transferred from the photosphere to the corona.

Key words: solar photosphere; ultra-scale structure; feature extraction; numerical analysis