

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2017.01.05

# 空间目标的地基红外观测研究进展

樊 亮<sup>1,2,3</sup>, 雷成明<sup>1,2</sup>, 孙荣煜<sup>1,2</sup>, 鹿 瑶<sup>1,2,3</sup>, 张 晨<sup>1,2,4</sup>

(1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 2. 中国科学院 空间目标与碎片观测重点实验室, 南京 210008;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学技术大学, 合肥 230026)

**摘要:** 作为一个新兴的研究方向, 空间目标的地基红外观测能够与传统雷达和光学观测形成互补, 完善空间监测机制。红外具有宽阔的波段范围和特有的热辐射波段, 在光谱分析和白天观测方面蕴藏着更大的发展潜力。近年来美国开始征用大型的红外望远镜, 或者通过改造光学望远镜, 研究空间目标在红外波段的特性。综述了参与空间目标地基红外观测的望远镜工作状况, 以及近 10 年来空间目标监测在红外巡天、白天观测、测光和光谱分析方面的研究进展, 最后对空间目标的地基红外观测研究进行总结与展望。

**关键词:** 空间目标; 红外观测; 物理特征; 光谱

**中图分类号:** P173      **文献标识码:** A

## 1 引 言

空间目标包括空间碎片和在轨运行的航天器。空间碎片是人类太空活动的产物, 其泛指宇宙空间中除正常工作的航天器外, 所有的人造物体, 包括完成任务的卫星与火箭整体、执行航天任务过程中的抛弃物与喷射物、航天器解体或相互碰撞产生的碎块等<sup>[1,2]</sup>。随着国内外航天发射任务逐年增多, 大量滞留的空间碎片给航天器的安全运行提出了巨大挑战, 未来空间资源的有效利用将面临严峻考验。为应对这一挑战, 需要对空间目标进行大量的观测研究, 更加细致深入地认知空间目标与空间环境。

传统空间目标监测, 主要是基于雷达和光学测量。雷达广泛用于低轨目标的测量<sup>[3]</sup>, 能够全天候运行, 但费用极其昂贵; 光学测量是常见的观测手段, 优点是作用距离远, 覆盖低轨到高轨目标的测量, 建设和运行成本低, 主要缺点是不能全天时、全天候工作。基于空间环境的复杂性, 目前实现卓有成效的空间监测仍然面临诸多问题<sup>[4]</sup>。美国在夏威夷毛伊岛的光学站, 最早开始了在红外波段对空间目标的探索性研究, 最近几年开始广泛征用大型的红

收稿日期: 2016-04-19; 修回日期: 2016-09-07

资助项目: 中国科学院国防科技创新基金 (CXJJ-14-S106); 国家自然科学基金 (11403108)

通讯作者: 樊亮, fanliang@pmo.ac.cn

外望远镜或者通过改造光学望远镜,深入红外观测方面的研究<sup>[5]</sup>。红外具有比可见光宽得多的波段范围,某些波段在大气中比可见光具有更强的穿透能力,而热红外是特有的发射波段,因此蕴藏着更为丰富的信息<sup>[6]</sup>。红外兼具反射和发射光谱,能用于辨识空间目标的表面材料,估算温度、反照率等,红外具有更低的天光背景,在光谱分析和白天观测方面蕴藏着更大的发展潜力。结合红外波段,可以扩展空间目标的观测波段,更好地对空间碎片环境进行建模,监控航天器的运行状态和健康状况,预报空间碎片对在轨航天器的碰撞可能性。

本文主要介绍空间目标地基红外探测的最新研究进展,讨论红外探测对空间目标监测的研究意义,为我国的空间目标监测提供参考。第2章介绍目前参与到空间目标地基红外观测计划中的专用红外望远镜和光学/红外望远镜设备,第3章阐述空间目标红外巡天和白天观测的探测方法,第4章阐述用于空间目标物理特性研究的红外测光和光谱分析,第5章进行简要总结与展望。

## 2 地基红外观测设备

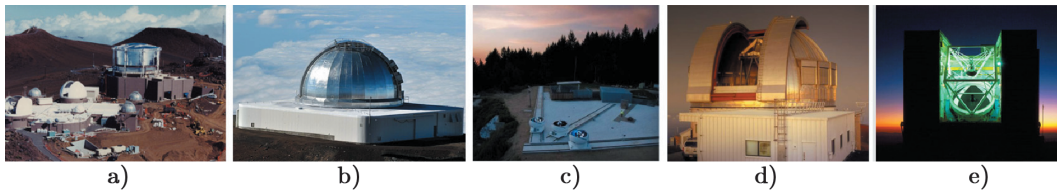
天文学已经逐步发展成为全波段天文学,可见光波段天文经过数百年的发展已经达到较高的水平,红外天文蓬勃兴起是近30年的事情。红外观测可以归为一类特殊的光学观测,由于其测量波长的优势,能获取可见光观测所不能得到的信息。在揭示冷暗物质、探索宇宙起源等方面,红外天文已取得许多令人激动的成果<sup>[7,8]</sup>。

红外线波长为 $0.75\sim 1\,000\ \mu\text{m}$ ,通常将 $\lambda < 2.5\ \mu\text{m}$ 称为近红外波段, $\lambda > 25\ \mu\text{m}$ 称为远红外波段,其间为中红外波段<sup>[9]</sup>。红外辐射通过地球大气层的实际传输过程是很复杂的,由于辐射和大气的相互作用,不仅因吸收和散射导致辐射受到衰减,还会因大气本身的热发射、折射和大气湍流产生的天空噪声受到影响。正是由于大气的这些特征,在地面进行红外天文观测实际上只能在近中红外的几个窗口进行,红外窗口的情况较为复杂,短波段红外辐射因水汽分子和二氧化碳的吸收,形成若干条吸收带,在这些吸收带之间的空隙处则表现为红外窗口。其中 $17\sim 22\ \mu\text{m}$ 是半透明窗口,大气对大于 $22\ \mu\text{m}$ 的红外辐射是完全不透明的,只有把望远镜放在高山上,才能在这一波段范围内找到一些红外窗口<sup>[10]</sup>。随着海拔高度的增加,大气中吸收分子的密度越来越小,这些窗口也越来越透明,越来越扩大。

相比可见光,红外探测器制作工艺复杂,噪声更大,费用更昂贵,要求低温制冷。地基红外探测对光学系统性能和天文台址要求更高,红外望远镜需要高海拔和干燥的环境<sup>[11]</sup>。近年来,随着一系列空间目标红外研究计划的开展,一些大型的专用红外望远镜和经过改造的光学/红外望远镜开始参与到空间目标的观测研究中,汇总如图1。随着研究的深入,未来几年将会有更多的红外望远镜参与空间目标监测。

### 2.1 AMOS/MOTIF

美国空军毛伊岛光学站(Air Force Maui Optical Station,简称AMOS)位于夏威夷毛伊岛,隶属于美国空军研究实验室,用于测试和评估先进的光学测量系统<sup>[12]</sup>。AMOS拥有一台 $3.67\ \text{m}$ 先进光电望远镜(Advanced Electro-Optical System,简称AEOS)<sup>[13]</sup>,结合先进的传感器,



注: a) AMOS/MOTIF (空军毛伊岛光学站) 天文台; b) IRTF (红外望远镜设施); c) SPOT (空间目标跟踪) 设施; d) UKIRT (英国红外望远镜); e) MMT (多镜望远镜)。

图 1 参与空间目标观测的地基专用红外望远镜和光学/红外望远镜汇总

包括自适应光学系统、辐射计、光谱仪和中红外波段成像器, 望远镜能跟踪深空人造物体, 并收集目标识别的相关数据。

同处于此的还有北美防空司令部的光学追踪和识别设施 (Maui Optical Tracking and Identification Facility, 简称 MOTIF), 是美国空军空间追踪网络的主要探测设备, 包括两个 1.2 m 的望远镜, 主要用于中红外和测光数据收集。借助 AMOS/MOTIF 的红外设备, 美国在毛伊岛最早开始了空间目标的红外观测研究, 在空间目标红外测光、光谱分析和白天观测方面做了许多前期的探索性工作<sup>[14]</sup>。

## 2.2 IRTF

NASA 的红外望远镜设施 (Infrared Telescope Facility, 简称 IRTF) 是一台 3 m 的望远镜, 坐落于夏威夷海拔 4 200 m 的莫纳克亚山, 这里是世界上最理想的红外站址之一。IRTf 起初建设的目的是支持旅行者号任务, 现为美国红外天文的国家设施, 为行星科学和深空应用提供持续支持。IRTf 包含多种辅助设备, 可以获取 0.8~25  $\mu\text{m}$  波段的中高分辨率光谱。

2006—2008 年间, NASA 利用 IRTf 对空间目标进行了红外光谱的观测分析<sup>[15]</sup>。2011 年, IRTf 开始参与空间目标白天成像的测试研究。

## 2.3 SPOT

空间目标跟踪 (Space Object Tracking, 简称 SPOT) 设施位于加利福尼亚州北部的圣克鲁斯试验场<sup>[16]</sup>, 由 3 个 1 m 的光学/红外望远镜组成, 以单独或协同模式观测空间目标, 于 2012 年 6 月正式运行。SPOT 望远镜可以追踪低轨目标, 在可见光和近红外波段测光成像, 包括光谱测量等, 未来还将部署更多的红外设备。

## 2.4 UKIRT

英国红外望远镜 (United Kingdom Infrared Telescope, 简称 UKIRT) 是目前最大的专用红外望远镜<sup>[17]</sup>, 口径 3.8 m, 位于莫纳克亚山。UKIRT 拥有大视场相机 (Wide Field Camera, 简称 WFCAM), 能在近红外波段测光, 且拥有近红外和热红外成像光谱仪等终端设备<sup>[18]</sup>。

2014 年, NASA 轨道碎片项目办公室 (Orbital Debris Program Office, 简称 ODPO) 申请到使用 UKIRT 的机会<sup>[5]</sup>。随后两年, UKIRT 将有三分之一的观测时间用于空间目标的数据收集, 主要用于获取地球同步轨道 (Geostationary Earth Orbit, 简称 GEO) 区域已知目标的测光成像, 以及以巡天模式探测新目标。

## 2.5 MMT

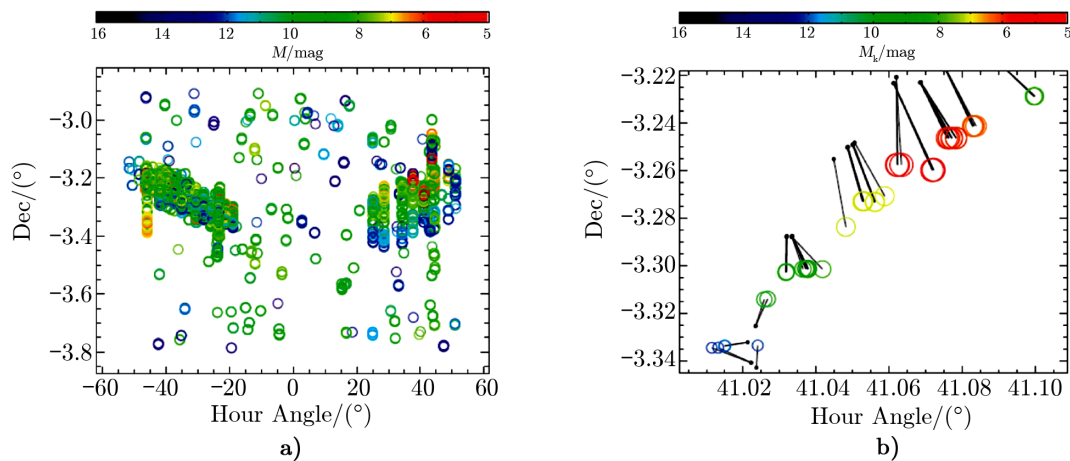
多镜望远镜 (Multiple Mirror Telescope, 简称 MMT) 坐落于美国亚利桑那州的霍普金斯山, 建立于 1979 年, 经过改造后现拥有 1 个 6.5 m 的主镜和 3 个可替换的副镜, 能够在可见光和红外波段获取高分辨率的图像<sup>[19,20]</sup>。在 2015 年 1 月, MMT 参与了亚利桑那大学和美国空军研究实验室的联合项目<sup>[21]</sup>, 对地球同步轨道上的空间目标进行了观测。

## 3 红外光学探测

对空间目标的认知包括实测与编目, 实测就是测量与目标相关的物理量, 编目则是对观测结果进行总结与归纳, 并将得到的特征与物理规律建立联系。受限于实测手段和需求, 目前空间目标的研究主要集中在其轨道特征上, 雷达和光学观测对此已经进行了大量的研究。红外巡天可以探测发现新目标, 白天红外观测则有效地扩展了观测时间。

### 3.1 红外巡天

2014 年, UKIRT 利用 WFCAM 扫描地球同步轨道卫星带<sup>[22]</sup>, 探测在轨卫星及附近的空间碎片, 对每个探测源进行了准确的光度和天体测量计算, 初步的 GEO 巡天结果, 见图 2。



注: a) 7 243 个目标的空间分布图。每个圆圈代表一个探测目标, 颜色代表覆盖 J、H、K 波段的星等。b) K 波段 57 个候选卫星的空间分布图, 圆圈的大小与探测目标的尺寸成正比。黑点表示观测时距离探测目标最近卫星的预测位置。在探测目标和预测卫星之间用黑色实线连接, 探测位置和预测位置的平均偏移量为 1.5'。

图 2 GEO 的红外巡天<sup>[22]</sup>

在历时 54 个夜晚的观测中, 共探测到 7 243 个目标 (含重复观测目标), 并结合空间目标编目数据库对卫星进行了匹配。规定当至少存在一个卫星在观测目标的搜索半径内时, 即存在匹配关系。当搜索半径设置为 30'', 观测匹配达到 30%; 当设置为 5', 匹配率升至 89%。

总部设在苏格兰爱丁堡的大视场天文联合会 (Wide Field Astronomy Unit, 简称 WFAU), 保存着 WFCAM 的历史巡天数据<sup>[23]</sup>, 数据可以通过网络检索。由于 UKIRT 此前的许多天文巡

天包含 GEO 目标的区域, 在对公开的数据进行检索时, 发现了许多 GEO 目标。这些历史记录对空间目标的研究具有重要意义, 图 3 a) 为发现的一个目标, 即画面上拉长成条的星像。这揭示 WFCAM 以及其他天文巡天归档数据中, 可能都包含着关于卫星和空间碎片的丰富历史数据信息, 将来可以被充分发掘并建立空间目标的“考古学”。

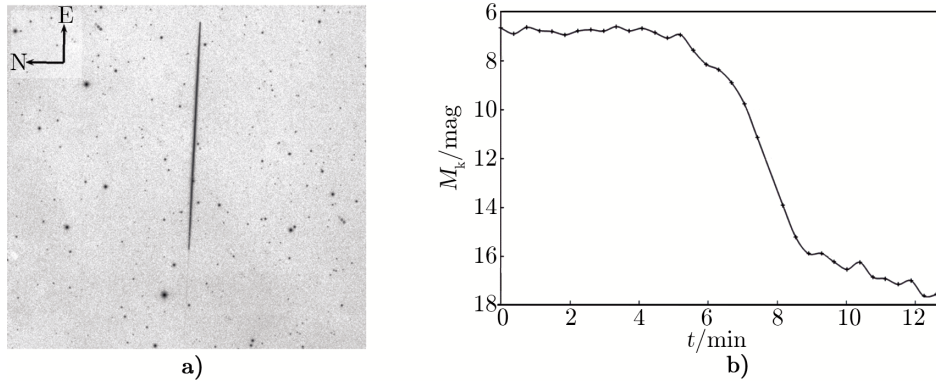


图 3 a) 2005 年 11 月 22 日天文巡天观测中的一个 GEO 目标图像, 图中的每个像素是  $0.4''$ ; b) 2014 年 3 月 18 日, 一个正常工作卫星在进入地影前后的 K 波段星等变化图<sup>[22]</sup>

Irwin<sup>[22]</sup>在利用 UKIRT 进行 GEO 目标的红外巡天时, 建议研究卫星进入地影前后的热辐射特征。图 3 b) 为一个在轨卫星进入地影前后的光变曲线, K 波段的星等随时间变化。图中显示卫星在进入地影过程中, 两分多钟时间内光度迅速下降, 之后信号持续约 4 min 的缓慢下降, 直至低于噪声阈值。光度缓慢下降的原因, 可能是折射效应或来自卫星太阳能电池板的一些轻微热辐射, 因为此时电池板会从  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  降到  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

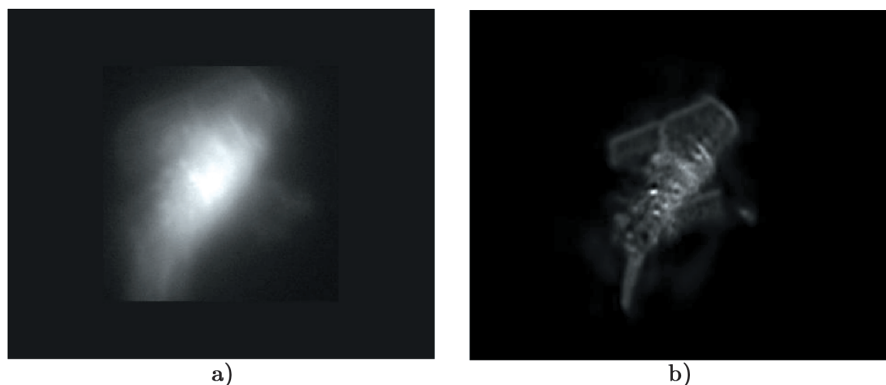
空间目标的红外巡天给我们提供了很多有用的数据信息, 类似 UKIRT 的大型红外望远镜为空间目标的研究提供了崭新的平台, 将有助于更好地开展空间碎片物理特性研究和环境建模。

### 3.2 白天观测

大气对长波散射少, 因而红外波段具有更低的背景杂散光, 这在白天光干扰较强的环境下具有明显优势; 太阳光谱的能量分布在红外波段并不是最大, 其辐射峰值应在光谱的黄绿区。白天光学观测系统将扩展当前光电望远镜的观测时间, 可用于雷达覆盖不到的地方, 降低开销。

早在 20 世纪 60 年代, 美国就在马拉巴 (Malabar) 测试观测站开始了白天卫星成像技术的研究。1996 年研制了 AMOS 白天近红外成像系统 (AMOS Daylight Optical Near-IR Imaging System, 简称 ADONIS)<sup>[24]</sup>, 采用图像复原技术, 实现白天空间目标的高分辨率成像。2000 年后系统升级为通用多波长红外测量系统 (Generalized Multiwavelength Infrared Instrument, 简称 GEMINI)<sup>[25]</sup>, GEMINI 具有中红外成像、斑点成像、相位差异成像、波前探测成像等多种模式, 采用不同的图像复原方法, 该系统是目前空间目标白天成像的主力设备<sup>[14]</sup>。Hart 等人<sup>[26]</sup>展示了用 AMOS 的 AEOS 望远镜对空间目标进行白天高分辨率成像的最新研究, 通过采

用多帧盲解卷积算法, 在强烈的天光背景和大气湍流条件下, 把严重模糊图像还原至高保真图像, 如图 4 所示。



注: a) 主动光学开环的原始数据帧, 近红外波段, 积分时间 20 ms; b) 采用多帧盲解卷积算法复原的图像, 使用 20 帧图像。

图 4 Hubble 空间望远镜的白天成像观测<sup>[26]</sup>

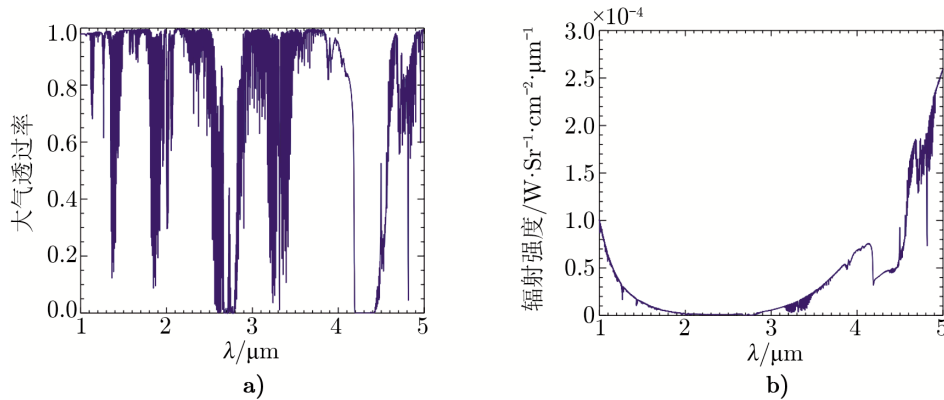
发展白天光学观测系统的最大挑战在于明亮的天空背景<sup>[27]</sup>, Jim 等人<sup>[28-30]</sup>在光学和近红外波段对 GEO 带的白天光背景亮度进行了建模, 研究天空辐射强度、大气透过率与波长的关系, 以及天光亮度随季节的变化。图 5 给出了用 MODTRAN(MODerate resolution atmospheric TRANsmiission code)<sup>[31]</sup>模拟的莫纳克亚山大气透过率和天空辐射强度<sup>[32]</sup>, 结果显示 K (2.20  $\mu\text{m}$ ) 波段是白天观测最佳的滤波段, J 和 H 波段也可以使用。他们发展了一套近红外相机系统 HANDS-IONS(High Accuracy Network Determination System - Intelligent Optical Networks for Space Situational Awareness)<sup>[33]</sup>, 用于同步轨道卫星的白天观测, 相机被设计为白天和夜晚都能工作。经过对站址条件的评估, 候选了多个符合白天观测的望远镜, HANDS-IONS 系统首先被用于夏威夷大学在莫纳克亚山的 2.2 m 望远镜。实际观测显示, 在下午的早些时候, 目标在 K 波段至少可以达到 15.5 mag, 测光精度仅比夜晚稍差<sup>[34]</sup>。

目前, IRTF 也参与到白天观测的测试中, 用于对比 GEO 卫星及恒星的白天成像。随着研究的深入, 未来将会有更多的望远镜参与到白天观测中。

#### 4 基于红外的物理特性研究

测光和光谱分析是空间目标的物理特性研究中常见的方法。在光学观测中, 望远镜所接收的光辐射通常为复色光, 光辐射强度与波长的关系则是光谱。基于同时性的多色测光观测, 能够用于交叉标记不同类型的空间目标; 基于时间序列的测光观测, 能够通过分析光变曲线反演目标的运动状态; 基于偏振的测光观测, 为解决目标识别提供新途径<sup>[35, 36]</sup>。红外光谱观测可用于分析材料类型、红外色温等特征。通过空间目标测光和光谱的联合研究, 能够更细

致深入地感知空间目标, 建模空间环境。



注: a) 莫纳克亚山地区白天的大气透过率; b) 沿着 GEO 带的天空辐射强度。

图 5 模拟的大气透过率和天空辐射强度<sup>[29]</sup>

## 4.1 测光分析

### 4.1.1 多色测光

多色测光指对目标进行多波段的光度测量, 能对目标进行交叉标记, 校正在其他观测中的错误, 可用于研究目标的大小尺寸、平台组成结构、表面材料等特征<sup>[37]</sup>。地基红外测光主要在近红外波段, 通过滤光系统, 可以实现基于同时性的多色测光观测。很多红外望远镜都配备了滤光系统, 例如 UKIRT 的 WFCAM 在巡天时一共有五个滤波段 Z、Y、J、H、K<sup>[38, 39]</sup>, 覆盖 0.83~2.38  $\mu\text{m}$ , 如表 1。

表 1 WFCAM 的巡天波段<sup>[39]</sup>

波段	有效波长	范围	$\mu\text{m}$
			宽度
Z	0.881 7	0.836~0.929	0.093
Y	1.030 5	0.979~1.081	0.102
J	1.248 3	1.169~1.328	0.159
H	1.631 3	1.492~1.784	0.292
K	2.201 0	2.029~2.380	0.351

Hart 等人<sup>[21]</sup>在 2015 年 1 月, 利用 MMT 对 GEO 目标进行了多色测光观测, 图 6 给出了同一个 GEO 卫星在 J、H 和 Ks (Kshort, 2.15  $\mu\text{m}$ ) 波段的成像。观测显示同一目标在不同波段, 可能呈现不同的测光特性, 太阳能电池板反射 1.8  $\mu\text{m}$  以上的红外辐射, 在 Ks 波段反射更强。

目前多色测光的实用化进程中, 最大的障碍是缺乏合适的分析模型和研究方法, 而这个过程需要进行大量的数据分析和归纳总结<sup>[40-42]</sup>。因此, 稳定可靠的数据来源是空间目标多色测光研究的重要基础。

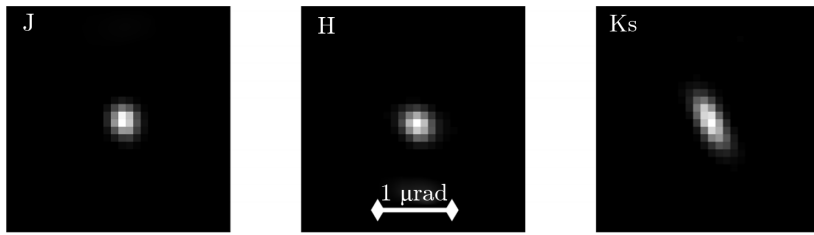
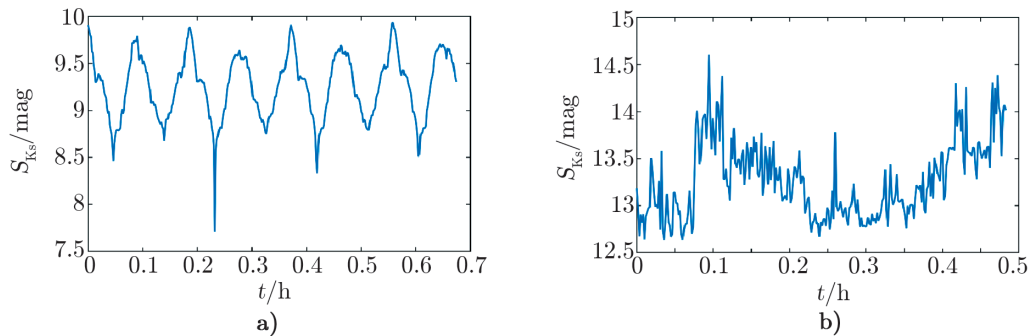


图6 同一个 GEO 卫星在 J、H 和 Ks 波段的成像<sup>[21]</sup>

#### 4.1.2 光变曲线

基于时间序列的测光观测方法是空间目标观测中最常见的方法，光变曲线有利于区分观测目标为碎片还是在轨活动卫星。光变曲线的特征可以反映出目标形状、平台类型、运行状态、姿态控制方式等信息<sup>[43-46]</sup>。目前小行星光变曲线的研究较多<sup>[47]</sup>，有一定的参考意义。Hart 等人<sup>[21]</sup>利用 MMT，对空间目标进行测光观测，计算得到的高时间分辨率光变曲线见图 7。



注：a) 一个耗尽的 Delta IV 火箭体，在 Ks 波段的平均星等约为 9 mag，在大约 40 min 的连续观测时间里，超过 3.5 个连续完整的周期中，火箭体在不受控制地翻滚。参考地面的固定位置，旋转周期为  $(671 \pm 2)$  s。从一个周期到下一个周期，光变曲线的细节具有良好的重现性。在 0.23 h 附近出现了一个很强的信号，是由于太阳相位角的变化，火箭体的弯曲表面发生了镜面反射，持续时间 0.9 s。b) 一个远小于火箭体的 GEO 小卫星，平均星等约 13.5 mag，此时探测器的模式噪声占主导。在 0.08 h 附近，目标亮度突然降低至 14.6 mag，但不能归因于光学或大气透明度的变化，因为此时的光度校准星并没有发生同样的变化。虽然没有地面信息来解释观测卫星的行为，但是持续的亮度变化反映了航天器表面的实时变化。

图7 Ks 波段光变曲线<sup>[21]</sup>

在实际观测中需充分考虑曝光时间的长短，选择合适的观测时间段，以保证观测结果具有足够的信噪比和时间分辨本领。由于每次观测的相位角和卫星材料存在差异，得到的每一个光变曲线都存在差异，因此对观测数据的精确分析更加艰难。如何从光变曲线中提取更多关于空间目标的运动信息和物理信息，监控在轨航天器的运行状态和健康状况，将是今后的研究重点。

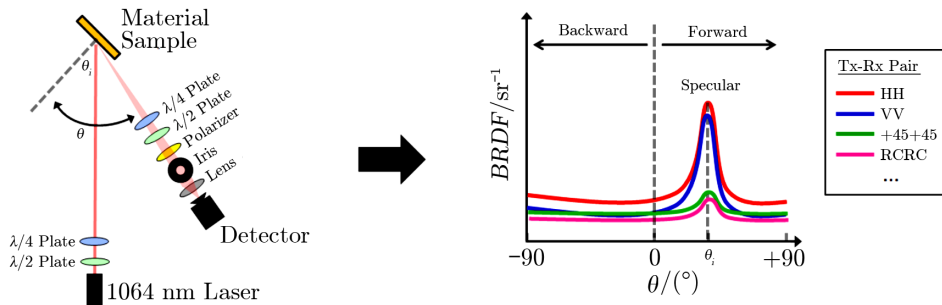
#### 4.1.3 偏振测量

偏振测量是指目标反射光偏振状态的测量技术，偏振指标是与空间目标物理特性和形状



结构密切相关的特征量, 作为目标光电散射特性的基本要素之一, 目标偏振特征的利用为解决目标识别提供了新的途径<sup>[48, 49]</sup>。偏振测量可分为被动与主动偏振测量。在被动偏振测量中, 目标被太阳光照亮, 利用目标反射光与背景光的偏振态差异, 进行测量<sup>[50]</sup>。而主动偏振测量能够捕获目标更多维度的偏振特征, 但目标需要被激光照亮; 激光测量的特点是测量精度高, 但易受天气和大气影响, 而且回波信号非常弱, 测量难度大。

Pasqual 和 Cahoy<sup>[51]</sup>介绍了利用偏振激光雷达对空间目标进行主动偏振测量的最新研究进展。工作在紫外到红外波段, 以激光为工作波束的雷达称为激光雷达。实验采用台式偏振计 ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ), 用于确定多种常见航天材料和涂层的双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, 简称 BRDF), 如图 8 所示。BRDF 模型用于阐述因入射角差异而引起的材料反射光谱特征的变化, 其描述空间目标在  $2\pi$  空间中的反射分布特性, 量化了光照射在目标表面后散射到各个方向的辐照度。实验结果揭示不同材料在偏振特性方面有显著特点, 可用于研究残骸碎片的组成材料, 推断质量和其他相关特性。



注: 发射激光和接收器间存在一个夹角, 散射光在入射平面内测量。Backward、Forward 和 Specular 机制的定义对应不同的平面散射角。Tx-Rx 分别指传输偏振和接收偏振, 不同颜色的曲线对应不同的 Tx-Rx 方式。

图 8 台式偏振计图和假想的收发分置平面 BRDF 测量<sup>[51]</sup>

## 4.2 光谱分析

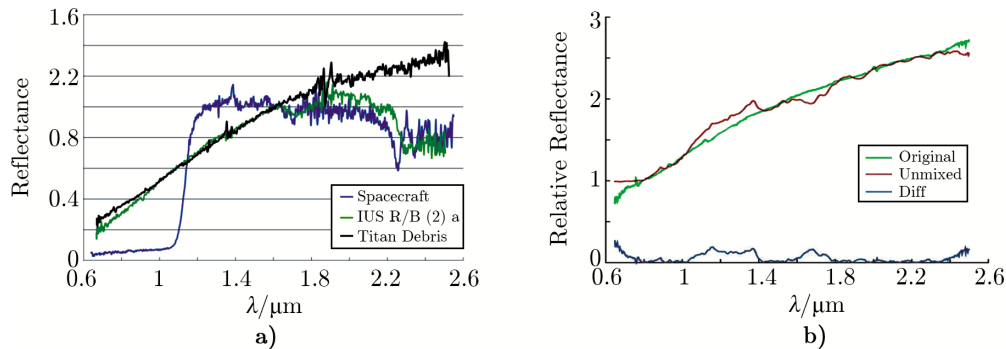
反射光谱是空间目标表面材料与太阳光谱共同作用的结果, 表现为目标反射太阳光的能力随波长变化, 一般以反射率或反射亮度系数来表示<sup>[52]</sup>。将观测获得的反射光谱与实验室数据库中航天材料的反射光谱进行比对, 能辨认出常见的材料, 这是推断空间碎片来源的重要依据。热红外光谱在热辐射波段, 可用于研究热红外辐射特征, 估算卫星的温度和反照率等。

### 4.2.1 表面材料

通过分析红外反射光谱的曲线特征, 包括曲线峰值、斜率、形态、吸收谱线等, 可以研究空间目标表面材料的属性<sup>[53, 54]</sup>, 区别不同类型目标。目前利用空间目标的光谱观测和光谱分析数据可知, 相位角对目标反射光谱的谱线特征影响较大<sup>[55, 56]</sup>, 在不同的相位角下, 目标的光照截面不同, 反射材料的光谱特征因此不同。因此需要对同一目标进行大量重复观测, 收集不同相位角的光谱数据。

在 2006—2008 年期间, Abercromby 等人<sup>[57, 58]</sup>利用 IRTF 收集了 GEO 区域的 20 个不同

目标的光谱数据, 光谱覆盖范围  $0.7\sim 2.5\ \mu\text{m}$ , 并进行了深入分析, 见图 9。目前地面试验建立了超过 300 种航天材料的光谱数据库, Rapp<sup>[59]</sup> 发展了一套约束线性最小二乘算法 (Constrained Linear Least Squares, 简称 CLLS), 用于分离反射光谱数据, 通过对比观测的红外光谱, 可以识别一般类型的材料。表 2 给出了部分目标的匹配材料, 按美国空间监测网 (Space Surveillance Network, 简称 SSN) 编目排序。红外光谱数据可以用于区分宇宙飞船、火箭体和碎片残骸: 相比火箭体, 宇宙飞船带有太阳能面板而显示独特的特征; 不同火箭体之间由于表面各种各样的金属和油漆涂层也存在差别; 对于相同来源的碎片残骸具有相似的光谱特征。



注: a) 一个宇宙飞船、废弃火箭体和碎片残骸的光谱对比, 每个光谱都有独特的特征。b) Titan 火箭中间级碎片 (SSN25000) 的光谱数据, 绿线表示原始数据, 红线表示 CLLS 模型拟合的数据, 蓝线表示原始数据和模型之间的差值, 原始数据和模型之间误差百分比小于 5%。

图 9 三个不同类型目标的光谱<sup>[57]</sup>和 CLLS 模型拟合<sup>[58]</sup>

表 2 空间目标的匹配材料<sup>[58]</sup>

SSN 目录	一般名称	匹配材料	误差
12855	SBS 2	太阳能电池, 聚酰亚胺薄膜, 白漆, 暴露白漆, 镍铬铁合金等	1%
20570	NEWSAT-1	太阳能电池, 铝, 聚酰亚胺薄膜, 白漆, 暴露白漆, 镀铝贝塔布等	1%
22316	IUS R/B(2)	白漆, 暴露白漆	3%
25000	TITAN 3C DEB	阳极氧化铝, 太阳能电池	4%
25645	SL-12 R/B(2)	铝, 镀铝聚酰亚胺薄膜, 暴露白漆	3%

由于航天材料的多样性, 材料表面的涂层, 以及空间环境的影响<sup>[60]</sup>, 实验室采集的数据与观测光谱的对比存在误差, 目前仅能对常见的材料辨识。未来需要更多的观测数据和实验室数据采集, 通过结合光学和红外光谱, 在现有模型中考虑表面粗糙度、材料降解等因素, 能更好地确定表面材料类型。

#### 4.2.2 红外色温

红外谱段的  $3\sim 18\ \mu\text{m}$  为发射红外波段, 又称热红外。卫星的热红外成像优势在于可以同时白天和黑夜进行观测。而且卫星在进入地影后仍然有热红外辐射存在, 这在光学波

段是无法实现的。Lynch 等人<sup>[61]</sup>利用 AEOS 望远镜的宽带阵列光谱仪系统 (Broadband Array Spectrograph System, 简称 BASS), 采集同步轨道卫星 3~13  $\mu\text{m}$  波段的光谱, 对红外色温进行了研究。

在图 10 中, 总光谱能量分布可以由普朗克函数很好地拟合, 辐射峰值在 8  $\mu\text{m}$  附近, 光谱显示观测目标的色温约为 340 K。由于辐射平衡, 距离太阳 1 AU 处阳光照射物体的温度应该为 278 K。超出部分与材料性质相关, 例如太阳能电池是由半导体材料组成, 这种材料的特性与黑体特性存在很大差异。卫星的内部能源供应与系统的散热辐射都会导致温度增加。

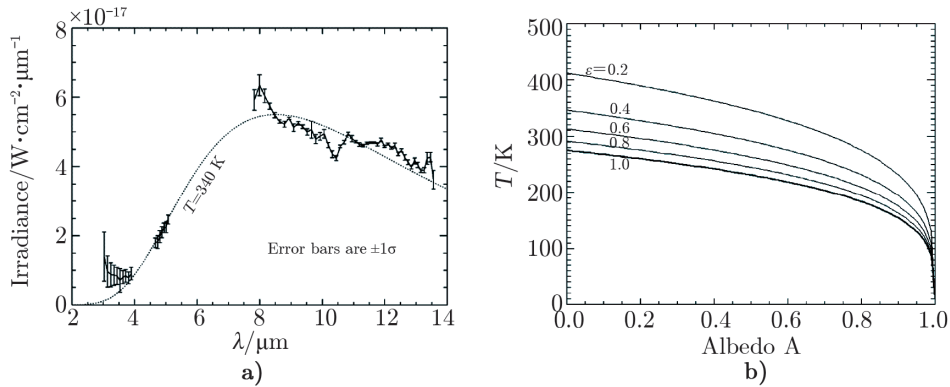


图 10 a) NORAD 21639(TDRS 5) 卫星的光谱数据; b) 太阳垂直照射距离 1 AU 处目标的表面温度, 不同的曲线对应不同的辐射率<sup>[61]</sup>

物体在空间的辐射平衡要求吸收的能量等于辐射能量, 满足下列关系:

$$I_0(1 - A) = C\epsilon\sigma T^4 \quad (1)$$

其中  $I_0$  是太阳辐射, 对于低轨目标, 还包括热辐射和来自地球的散射太阳光,  $A$  是反照率,  $\sigma$  是斯特藩-玻尔兹曼常数,  $\epsilon$  是物体的辐射率,  $T$  是温度,  $C$  是与卫星转速相关的几何参数。由于光谱受相位角、地影、目标姿态等影响, 为了更深入研究空间目标的细节变化特征, 可以参考热物理模型<sup>[62-65]</sup>, 这一模型已在小行星上得到很好的应用。

Lambert 等人<sup>[66]</sup>提出利用光学和热红外数据研究目标的反照率。基本理论是, 对于一个大而暗的物体, 在可见光波段亮度可能看起来和高反照率的小物体一样, 但温度应该更高, 因此在热红外波段的亮度更高。对目标特征的研究, 需要建立复杂精细的模型, 热红外作为红外特有的发射波段, 携带独立的信息<sup>[67, 68]</sup>, 对了解空间目标的特征具有重要意义。

## 5 总结与展望

空间目标的地基红外观测, 对于拓展传统雷达和光学观测手段具有重要意义。最近几年, 美国开始广泛征用大型的红外望远镜或者通过改造已有光学望远镜, 研究空间目标在红外波

段的特性,整体还处于起步阶段,研究论证了空间目标地基红外观测的可行性,并显示了红外波段的发展潜力。

红外观测作为一类特殊的光学观测,作用距离比雷达远,覆盖低轨到高轨目标的测量,但建设和运行成本比光学观测更高。相对光学波段,红外具有更宽阔的波段范围,蕴藏着丰富的信息,在光谱分析和白天观测方面具有更大的优势。热红外作为红外波段的特有发射波段,利用热红外光谱,可以估算空间目标的温度,卫星的热红外成像可以同时白天和夜晚进行观测,而且卫星在进入地影后仍然有热辐射的存在,可能延长目标观测弧段,结合热红外和光学波段的数据还可以用于研究目标的反照率等。红外光谱能用于辨识空间目标的表面材料,由于具有相比可见光更为宽阔的波段范围,红外光谱能反映不同表面材料的更多细节特征。红外测光包括多色测光、光变曲线、偏振测量等方面,可以结合可见光波段测光对空间目标的特征信息进行更加详细的研究。对于白天观测,相比可见光,红外具有更低的天光背景,近红外 K 波段具有明显的优势。

随着研究的不断深入,未来将会有更多的望远镜参与到空间目标的红外监测中来。目前,国内在空间目标监测领域的红外研究还处在探索阶段。空间目标的监测需要广泛结合雷达、激光、光学和红外望远镜设备,覆盖地基和天基平台,增强国际合作,实现多波段、多平台、全球化的监测体系。在充分感知空间目标和空间环境的基础上,积极推进空间碎片的清除与减缓,安全合理地利用地球轨道资源,实现未来航天活动的可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] Klinkrad H, Beltrami P, Hauptmann S, et al. *AdSpR*, 2004, 34: 1251
- [2] Walker R, Martin C E, Stokes P H, et al. *AdSpR*, 2001, 28: 1437
- [3] Priyatikanto R, Religia B, Rachman A, et al. *ArXiv*, 2015, 1677: 41
- [4] Schildknecht T. *A&ARv*, 2007, 14: 41
- [5] <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/pdfs/ODQNv19i1.pdf>, 2015
- [6] Glass I S, eds. *Handbook of infrared astronomy*. New York: Cambridge University Press, 1999: 25
- [7] 王术军,叶彬浔,何香涛. *北京师范大学学报:自然科学版*, 2005, 41: 280
- [8] 黄晨,王建军,高昕,等. *激光与红外*, 2013, 43: 235
- [9] 郝允祥,陈增生,周克平. *红外天文学导论*. 北京:北京大学出版社, 1993: 5
- [10] 赵君亮. *自然杂志*, 2007, 29: 193
- [11] Cunningham C. *ExA*, 2009, 26: 179
- [12] Chapman J C. *Infrared Astronomy: Scientific/Military Thrusts and Instrumentation*, Washington: SPIE, 1981: 186
- [13] Hope D, Jefferies S, Giebink C. *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS*, 2008: 33
- [14] 王建立. *飞行器测控学报*, 2015, 34: 489
- [15] <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/pdfs/ODQNv19i4.pdf>, 2015
- [16] Shivitz R, Kendrick R, et al. *Ground-based and Airborne Telescopes V*, Montreal: SPIE, 2014: 91450J-1
- [17] Lederer S, Frith J, Cowardin H, et al. *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS*, 2014: 79
- [18] Roche P F, Lucas P W, Mackay C D, et al. *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*, Hawaii: SPIE, 2003: 901
- [19] Lloydhart M, Angel J R P, et al. *Adaptive Optical System Technologies*, Hawaii: SPIE, 1998: 82
- [20] Sandler D G, et al. *Adaptive Optical Systems and Applications*, Washington: SPIE, 1995: 372

- [21] Hart M, Rast R, Jefferies S, et al. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2015: 5
- [22] Kendrick R, et al. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2014: 5
- [23] Hambly N C, Collins R S, et al. MNRAS, 2008, 384: 637
- [24] Lundgren M A, Houchard J E, Wang V S, et al. Current Developments in Optical Design and Engineering V, San Diego: SPIE, 1995: 78
- [25] Nelson J E. Master's Thesis, Ohio: Univ. of AIR, 2004: 59
- [26] Hart M, Jefferies S, et al. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2014: 73
- [27] Griffin S, Whiting A, Haar S. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2014: 71
- [28] Jim K, Gibson B, Pier E. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2011: 63
- [29] Jim K, Gibson B, Pier E. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2012: 63
- [30] Labonte B. SoPh, 2003, 217: 367
- [31] Berk A, Anderson G, et al. Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III, California: SPIE, 1999: 348
- [32] Jim K, Kuluhiwa K, et al. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2009: 75
- [33] Jim K, Wolfshagen R, et al. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2011: 20
- [34] Jim K, Pier E, Cognion R. Proceedings of the IAU General Assembly, Hawaii: AAS, 2015: 47
- [35] 唐轶峻, 姜晓军, 魏建彦, 等. 宇航学报, 2008, 29: 1094
- [36] 周彦平, 舒锐, 陶坤宇, 等. 光学技术, 2007, 33: 68
- [37] 张晨. 硕士论文, 南京: 中国科学院紫金山天文台, 2015: 9
- [38] Hawarden T G, Leggett S K, Letawsky M B, et al. MNRAS, 2001, 325: 563
- [39] Lawrence A, Warren S J, Almaini O, et al. MNRAS, 2007, 379: 1599
- [40] Frith J, Anz-Meador P, Lederer S, et al. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2014: 22
- [41] Gibson B, Jim K, Cognion R, et al. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2013: 67
- [42] Sanchez D J, Gregory S A, et al. Imaging Technology and Telescopes, San Diego: SPIE, 2000: 164
- [43] 刘浩, 杜小平. 中国光学, 2015, 8: 744
- [44] Santoni F, Cordelli E, Piergentili F. JSpRo, 2013, 50: 701
- [45] Yanagisawa T, Kurosaki H. AdSpR, 2012, 50: 136
- [46] Jolley A, Wade G, Bedard D. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2015: 74
- [47] Wolters S D, Rozitis B, Duddy S R, et al. MNRAS, 2011, 418: 1246
- [48] 牛继勇. 博士论文, 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2015: 5
- [49] Sanchez D J, Gregory S A, Storm S, et al. Multifrequency Electronic/Photonic Devices and Systems for Dual-Use Applications, San Diego: SPIE, 2001: 221
- [50] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, et al. ApOpt, 2006, 45: 5453
- [51] Pasqual M, Cahoy C. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2015: 23
- [52] 金小龙, 唐轶峻, 隋成华. 空间科学学报, 2014, 34: 95
- [53] Jorgensen K, Africano J, Hamada K, et al. AdSpR, 2004, 34: 1021
- [54] Chaudhary A, Birkemeier C, Gregory S, et al. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies

- Conference, Hawaii: AMOS, 2008: 39
- [55] Chaudhary A, Payne T, Wilhelm S, et al. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2010: 9
- [56] Skinner M A, Payne T, Russell R W, et al. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2007: 45
- [57] Abercromby K, Abell P, Barker E. Proceedings of the 5th European Conference on Space Debris, Germany: ESA, 2009: 42
- [58] Abercromby K, Buckalew B, Abell P, et al. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2015: 30
- [59] Rapp J. Master's Thesis, San Luis Obispo: Univ. of California Polytechnic State, 2012: 61
- [60] Bedard D. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2011: 46
- [61] Lynch D K, Russell R W, Gutierrez D, et al. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii: AMOS, 2006: 81
- [62] Lagerros J S V. *A&A*, 1996, 310: 1011
- [63] Lagerros J S V. *A&A*, 1996, 315: 625
- [64] Lagerros J S V. *A&A*, 1997, 325: 1226
- [65] Lagerros J S V. *A&A*, 1998, 332: 1123
- [66] Lambert J V, Osteen T J, et al. Space Debris Detection and Mitigation, Orlando: SPIE, 1993: 32
- [67] Skinner M A, Russell R W, Rudy R J, et al. *AcAau*, 2011, 69: 1007
- [68] Skinner M A, Russell R W, Kelecy T, et al. *AcAau*, 2012, 80: 154

## Research Progress on Ground-based Infrared Observations of Space Objects

FAN Liang<sup>1,2,3</sup>, LEI Cheng-ming<sup>1,2</sup>, SUN Rong-yu<sup>1,2</sup>, LU Yao<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Chen<sup>1,2,4</sup>

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Key Laboratory for Space Object and Debris Observation, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** As a new research field, ground-based infrared observations of space objects may extend the horizons of traditional radar and optical observations, improving the mechanism of space surveillance. With broad wavelength range and thermal radiation bands, infrared band has a greater potential in daytime observations and spectral analysis for development. In recent years, the United States began the exploration of infrared characteristics on space objects, by gaining access to large infrared telescope or transforming optical telescope. In this paper, we give a review of the telescopes participated in the ground-based infrared observations of space objects. And we conclude the research progress of the infrared survey, daytime observations, infrared photometry and spectral analysis in infrared space surveillance for nearly a decade. Finally, a summary and prospects on ground-based infrared observations of space objects will be given.

**Key words:** space objects; infrared observations; physical characteristics; spectra