

空间点目标光谱探测与特征识别研究进展

徐融^{1,2}, 赵飞^{1,2}, 周锦松^{1,2}

1. 中国科学院光电研究院, 北京 100094

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 光学观测是空间目标识别的重要手段, 由于探测距离远, 视场中的空间目标多呈现为非分辨的点目标。相比于传统的定轨测量和光度测量, 光谱探测提供了波长维的可分辨信息, 极大的提升了目标表面材质判别能力, 并为目标状态反演提供了更可靠的依据, 极具应用潜力。介绍了近年来国内外学者在空间点目标光谱探测及特征识别方面的典型研究进展, 依据主要研究方法, 分为多通道测光探测、高光谱探测、实验室光谱特性测量、目标特性建模仿真四个方向。其中, 多通道测光获得了低光谱分辨率的测量数据, 是常用的广域空间目标分类判别手段; 高光谱探测研究反射能量在波长维的精细分布, 有助于反演重点目标的材质组成; 实验室光谱特性测量可在受控条件下模拟目标探测的物理过程, 提供材质光谱特性数据库; 目标特性建模仿真则对物理属性抽象特征化, 研究目标光谱变化过程。通过分析国内外研究成果, 总结当前研究的能力与不足, 提出几点研究思路, 为后续研究开展提供参考。

关键词 空间目标; 光谱测量; 建模仿真; 光谱反演; 特征识别

中图分类号: O433 **文献标识码:** R **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)02-0333-07

引言

空间目标监视系统最初仅关注位置信息, 用于目标轨道计算与编目^[1]。随着近地空间航天器数量增加, 尤其在地球同步轨道(geosynchronous orbit, GEO), 单纯的轨道编目数据已不足以分辨密集目标群中的不同个体, 需要采取新的识别手段^[2]。

对于距离远、体积小的空间目标探测, 尤其是距离大于20 000 km的中高轨空间目标, 雷达、光学成像等手段均难以实现。雷达回波信号与 r^{-4} 成正比, 光学成像受限于衍射极限, 二者只适合于低轨大型目标探测。因此, 基于空间上不可分辨点目标的光度光谱测量是目前较为可行的特征识别手段^[3-4]。当视场中的目标呈现为点状, 形状和尺寸信息都不可分辨时, 目标识别能力取决于如何从点目标光学特性中提取更多表征目标本身形貌的有效信息。解决该问题的基本途径主要有两条: (1) 提高对现有信息的利用率, 即建立合适的模型对空间目标光学特性进行准确的描述, 提高认知水平; (2) 增加总信息量, 即拓展信息获取的维度, 对目标特性的可能状态进行多维度的约束, 最终收敛到唯一可能的结果。单一的光度探测能在一定程度上分辨失控旋转目标与受

控目标^[5-6], 推断外形尺寸^[7], 但对目标材质特性的获取能力十分有限^[8-9]; 光谱提供了在波长维度的可分辨信息, 与目标表面材质特性密切相关, 近年来日益受到研究关注^[10]。本文从空间目标光谱探测研究的实践脉络出发, 介绍了多通道测光探测、高光谱探测、实验室光谱特性测量、目标特性建模仿真等研究方向的国内外典型成果, 为后续研究开展提供参考。

1 多通道测光探测

借鉴天文学恒星测光方法对空间目标进行测光观测由来已久。单一波段的光变曲线反演目标特性受限于信息维度, 仅凭数量上的增加, 其可获取的目标特性仍十分有限, 因此多通道测光是提高信息维度的一个可行手段。空间目标的多光谱探测和研究最早直接借助于恒星多色测光方法^[11], 采用Johnson/Bessel和SDSS等现有天文滤光片系统, 观测多波段光变数据。与恒星观测不同的是, 空间目标多为快速移动目标, 其反射光能分布随时间变化较快, 针对不同观测场景需采用不同的观测手段。对于亮度变化较慢的中高轨空间目标, 尚可用滤光片转轮分时测量各波段能量; 但对于快速移动的低轨空间目标, 则必须采用多通道同时测光。多通道

收稿日期: 2017-11-17, 修订日期: 2018-04-29

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2015AA7046604), 国家自然科学基金项目(61405203)资助

作者简介: 徐融, 1991年生, 中国科学院光电研究院博士研究生 e-mail: xurong@aoe.ac.cn

测量数据可进行色指数(color index)聚类分析,利用不同类型的空间目标在色指数图谱上的聚类-分离特性区分目标,观测流程和数据处理简便。同时,如果选用宽波段滤光片,辐射能量充足,用低成本小口径望远镜即可进行观测。由于多通道测光的低成本优势,目前,欧美国家已将其作为空间态势感知网络中的常备探测手段,并开发了有别于传统天文滤光波段的专用滤光系统,以实现更好的目标分类效果。

2001年,美国空军研究实验室(AFRL)的Payne等利用SILC(Space Object Identification In Living Color)滤光片组测量了一系列GEO卫星的多色光度特性^[2]。SILC是由美国太空作战实验室研发,针对空间目标识别设计的专用滤光片组。该滤光片组选择了空间目标材料反射能量区分度较大的光谱波段,其色指数聚类分析优于传统的用于天文观测的Johnson滤光片系统。该滤光片系统可应用于平台分类、纠正交叉标记(Cross-tag)、异动目标识别等。

2008年,Dao等利用2.4 m口径多透镜阵列望远镜对多个近地空间目标进行了16波段的同时测光观测^[12],覆盖414~845 nm,见图1。作者选取国际空间站图像上不同部件的光谱,绘制了红、蓝波段的色指数图,色指数点云的巴氏距离(Bhattacharyya distance)显示各部件所属点云具有较好的分离度。该测量系统通过多波段同时测光实现了对快速移动的低轨目标的多光谱成像观测。



图 1 国际空间站 16 波段成像
Fig. 1 16 bands imaging of ISS

2015年,Jolley展示了其用14英寸小口径望远镜测量的GEO空间目标多色测光数据^[13],包含两个星群的6颗GEO卫星在多个夜晚的Bessel BVR三色光变曲线。大多数卫星光变曲线为对称单峰分布,然而Galaxy 11和Intelsat 805出现了异常的多峰结构。多色光变分析显示,帆板镜面反射光谱发生颜色反转,光谱出现偏红现象,该现象与Bedard在实验室测量结果相符。

2015年,Hart等用6.5 m多镜望远镜对GEO轨道大型通信卫星Anik F2进行了测光观测,获取了其在J, H, Ks三个近红外波段的图像^[14]。观测中应用了自适应光学手段,提高了解析能力,使视场中的目标成为具有低分辨率的亮斑。其中,太阳帆板在长波段Ks具有较高的反射能量,得以显现,如图2所示。作者指出,卫星帆板在可见光段通常不可见,而红外成像观测必须采用大口径望远镜。

2012年,中国科学院国家天文台的毛永娜介绍了其在空间碎片多色光度观测方面进行的一系列工作^[15]。国内该领域研究开始较晚,国家天文台凭借其设备和专业优势较早获

得了空间目标高精度多通道测光数据。为避免传统滤光片转轮不同时测光产生的测量误差,介绍了同时性三通道测光方法,适用于测量空间碎片这类快速光变目标的辐射能量分布。作者详细阐述了空间碎片探测流程和多通道数据定标方法,并将天文多色光度特性的定性、定量分析方法应用于空间碎片特性研究。文中展示了失效空间碎片和三轴稳定卫星的多色测光结果,给出了失控目标旋转周期的离散傅里叶变换分析结果,和稳定卫星平台的色指数聚类分析结果。

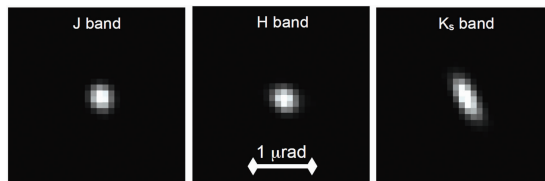


图 2 同一 GEO 卫星 J, H, Ks 三红外波段成像结果
Fig. 2 Images of the same GEO satellite in the three IR wavebands J, H, and Ks

2 高光谱探测

多通道测光是一种低光谱分辨率探测方法,为增加探测波段以获得更丰富的细节光谱特征来反演具体目标材质,近年来越来越多的研究采用高光谱手段探测空间目标,常用光谱探测终端主要有三种:

(1)单狭缝光谱仪(Single slit spectrometer):使目标像稳定落在狭缝内,通过后端分光光路测量光谱,可对暗弱目标长时间积分测量。该方法要求望远镜跟踪精度较高,每次只能测量一个目标,适用于少量高轨目标的光谱精测。

(2)无狭缝棱栅光谱仪(Slitless grism spectrometer):直接将棱栅放在焦面前的汇聚光束中,对视场中所有稀疏点目标进行多级色散。其中零级为点状,用于确定目标位置,并测量光度,正负一级为带状,用于测量光谱,见图3。该方法可同时测量视场内多个目标光谱,适用于低轨亮目标探测。

(3)光纤光谱仪(Fiber spectrometer):将目标的像导入光纤,由后端测量系统进行光谱测量。入射光可由光纤分束器导入不同谱段探测器实现目标大光谱范围同时探测,谱段选择灵活性较好。但该方法需使目标的像稳定落入光纤内,要求望远镜具有较高的跟踪精度。

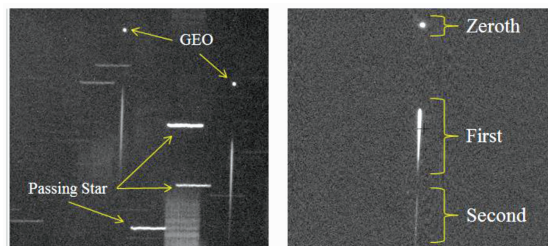


图 3 无缝棱栅光谱仪拍摄的目标原始图像
Fig. 3 Raw images taken by slitless grism spectrometer

上述方法获得的目标光谱都需经过系统的波长与流量定标方可使用。探测器测得光谱数据本质上是空间目标反射的

太阳光,经大气传输和仪器响应调制后的光谱分布结果。为获得仅表示目标本身材料特性的光谱反射率数据,必须将光源、大气、仪器等因素对光谱能量分布的影响去除。图 4 为棱栅光谱仪光谱定标流程。为去除太阳光谱影响,通常采用目标天区附近的类太阳恒星(Solar analogue stars)光谱作为光源光谱进行定标。

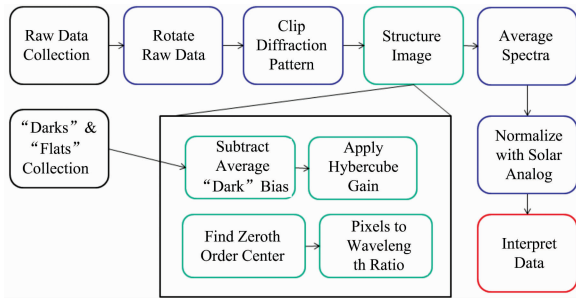


图 4 棱栅光谱仪数据定标流程

Fig. 4 Calibration process of grism spectrometry

高光谱探测相比多通道测光具有更丰富的光谱信息,可用于目标材质的识别。由于不同目标的表面材质和组合比例都有明显的差异,高光谱探测可以较好的区分目标种类,甚至反演材质组成。然而高光谱探测通常需要较长的曝光时间,需要目标的观测几何相对稳定。相对于快速运动的低轨目标, GEO 目标由于其稳定的探测几何、较高的研究价值,可利用大口径望远镜进行长期凝视测量的特点,因此成为当前光谱观测的重点研究对象。近年来的实测数据表明,除传统的可见光谱探测外,红外光谱中包含了更多的目标材质光谱细节特征,具有较大的应用潜力。

2009 年, Schildknecht 等利用欧空局空间碎片望远镜(ESASDT)对 GEO 和 GTO 等高轨空间碎片进行了光谱观测^[16], 光谱覆盖 450~960 nm。作者详细介绍了光谱定标流程,指出大气消光是光谱测量误差的主要来源。目标光谱反射率随观测相位角改变存在明显变化,且不同种类碎片光谱具有显著区别,但通过低分辨率光谱判别材料种类仍存在困难。

2013 年, Abercromby 等用 6.5 m 麦哲伦望远镜测量了 6 个 GEO 目标的可见光光谱(400~800 nm)^[17]。分析结果显示,约束最小二乘法拟合精度显著优于人工判别法,但仍出现了与先验信息不符的材质类型,误差来自于材质光谱库的不完备。由于空间红化效应(Reddening effect),未来光谱反演数据库需考虑探测角度和表面状态的影响。2015 年,作者又展示了 2006 年至 2008 年间利用 NASA 红外望远镜(IRTF)测量的 GEO 带 20 个人造空间目标的红外光谱^[18], 涵盖 700~2 500 nm。经光谱解混,解得各目标的材料组成,并发现 C—H 键和硅的显著光谱特性。红外光谱显示出较强的材质分辨能力,能轻易分辨出卫星、火箭体、碎片等多种类空间目标,具有极佳的应用潜力。

2014 年, Bedard 等测量了 GEO 轨道多个三轴稳定卫星的时变光谱^[19], 与实验室测量的材质光谱比对结果显示:铝材在 850 nm 处的宽波段吸收特征较为明显,可以证实;太

阳能电池由于较低的反射率,其光谱特性并不显著; Galaxy 11 卫星光谱变化与其特殊帆板结构有关。2017 年,作者公布了 Galaxy 11 的可见-近红外时变光谱数据^[20], 并分析了光变曲线上的 13 个关键点光谱,得出其双峰结构确由 Galaxy 11 帆板集光器铝板引起,但其余点的光谱对应材料尚无定论,进一步分析有赖于更精确的实验室材质特性测量数据。作者指出,高光谱探测适合研究原理方法,小口径多色测光更适合工程应用。

2015 年,美国空军学院的 Ryan 等在 GEO 卫星闪光季(春分点附近),利用无狭缝棱栅光谱仪对两颗 GEO 通讯卫星进行了观测^[21]。观测结果显示当卫星发生亮度闪光时,其光谱曲线的峰值波长明显突变左移(550~500 nm),表明闪光部件为卫星太阳帆板,见图 5。分析表明,卫星发生亮度剧烈变化往往源于其上某一部件发生镜面反射,其光谱成分在总反射能量中居于主导地位,对镜反光谱进行分析可为目标姿态识别提供依据。

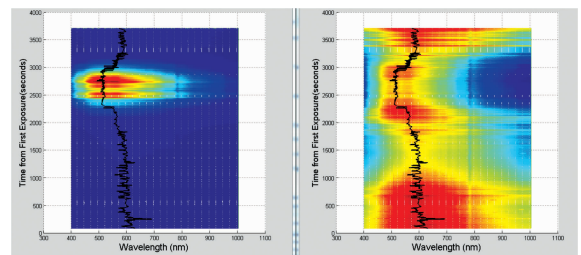


图 5 闪光季 GEO 卫星光谱的峰值波长迁移

Fig. 5 Peak wavelength drift of GEO satellite during glint season

2017 年, Vanati 等测量了一系列 GEO 轨道卫星和空间碎片的多时段可见-近红外光谱(450~960 nm)^[22]。作者指出三种典型空间碎片光谱形状类别,即递增上凹形、递增下凹形、蓝端递减水平形。碎片的多色指数存在一定的聚类特点,但不同时段测量结果差异较大,其聚类判别的一致性和不理想。

2017 年, NASA 约翰逊航天中心的 Lederer 等利用 NASA 的米级自动望远镜(ES-MCAT)和英国红外望远镜(UKIRT)对 GEO 轨道一系列火箭残骸展开了联测^[23]。由 UKIRT 的红外光谱数据得出两个结论:一是同一系列的火箭残骸具有极为相似的红外光谱特征,不同系列则不然;二是光谱曲线上的局部特征可用于关联空间碎片来源。

2015 年,长春理工大学的宋薇等测量了 5 个火箭残骸和 2 个失效卫星光谱^[24]。实验中将未定标的原始光谱数据进行了归一化处理,发现火箭残骸的光谱曲线形状具有一致性,而失效卫星的光谱曲线形状变化剧烈。虽然两类目标同处于失控翻滚状态,但由于卫星表面材质种类和结构外形复杂度均不同于火箭残骸,故其光谱变化激烈。

3 实验室光谱特性测量

随着实测数据累积,越来越多的研究者发现,由于缺乏空间目标形貌、姿态等具体信息,仅凭观测数据很难说明空

间的具体状态,目标反演和分类结果也呈现极大的不确定性。另外,地基光学望远镜观测受昼夜、天气、地球遮挡等多种因素限制,数据获取能力有限,成本较高。为探究空间目标观测数据产生的物理机理,建立光谱散射特性模型,寻找可行的目标识别方法,一些研究人员开始采用实验手段研究空间目标的光学特性,针对材料样品、卫星部件、缩比模型等不同尺度样品,采用不同方法开展研究。

实验室测量目标光谱散射特性是目标识别研究的重要基础:一方面,测试目标表面材料样品光谱数据,建立基于光谱双向反射分布函数(spectral bidirectional reflectance distribution function, sBRDF)的目标材质光谱散射特性数据库,用于实测光谱数据反演以及计算机仿真模型的建立。另一方面,采用实验室平行模拟观测手段,可对地基和天基探测进行便捷的技术验证,弥补实测覆盖角度的不足、加深对实测数据的理解。实验室平行模拟观测的难点在于:如何模拟空间光环境以及观测过程中光源-目标-探测器之间几何的实时变化。此外,近距离模拟观测与远距离实测之间的一致性仍需比对验证。

2010年,NASA 约翰逊航天中心的光学测量中心(Optical measurement center, OMC)的 Cowardin 等在实验室利用机械臂和准直光源测量了 2 面为不同材质的空间碎片翻滚时的多波段光度特性^[25],其色指数变化趋势和预设相符。2012年,作者测量了火箭残骸缩比模型在三种翻滚姿态下的光变曲线^[26]。实验结果表明,同一目标的光变曲线的复杂程度与其旋转轴指向相关性较大,而与观测相位角的相关性较小。

2011年,Bedard 等研究人员实验测量并研究了多个探测角度下 CanX-1 工程小卫星各表面的光谱 BRDF^[27],总结了光谱测量的实验流程。2014年—2015年,在此基础上,进一步研究了儿种典型空间目标表面材质光谱散射数据特征^[28-29],发现铝合金材料在 800 nm 附近的吸收特征,以及三节砷化镓和聚酰亚胺镀铝薄膜的镜面反射光谱中的干涉条纹特征。作者分析了目标表面材质光谱在观测角度、粗糙度、老化程度、褶皱、多层结构等因素影响下的变化情况。由于表面老化,粗糙度变高,短波长的光更容易在材质表面被散射和吸收,因此光谱出现“红化”效应。作者重点强调了建立一个标准化光谱散射特性数据库的重要意义。

2015年,上海宇航系统工程研究所的研究人员展示了一套空间目标可见光散射动态特性测试校验系统^[30]。该系统可模拟太阳照射角(方位 -135° — 135° ,俯仰 -42.5° — 42.5°)和观测角(俯仰 -25° — 25° ,方位 -31° — 31°)的目标观测几何。全测量流程可由中央控制系统集中控制完成,适用于大型卫星模型的光学散射动态特性测试。

2016年,中国科学院光电研究院的徐融等设计了一套用于实验室平行模拟空间目标观测的 5 轴旋转系统^[31],见图 6。作者采用真实轨道姿态信息平行模拟了低轨卫星过顶观测,并测量了高保真缩比模型的整体光谱 BRDF,发现了星上微小结构的“闪光”和光谱峰值波长的迁移现象。同年,作者又对某 GEO 卫星模型的在不同相位角处的混合光谱 BRDF 进行了反演分析^[32],结合实验室测得的材质光谱 BRDF 数据库,用非负约束的最小二乘法解得四种主要材料

的丰度变化,反演结果与目标预设状态相符。

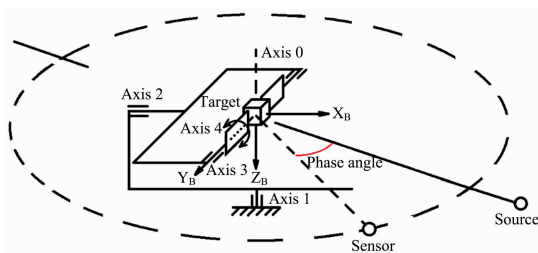


图 6 空间目标平行模拟观测系统轴系示意图

Fig. 6 Axis layout of parallel simulation system for space objects observation

2016年,北京航空航天大学李庆波等设计了一种自适应权重局部超平面算法对空间材料混合光谱进行了模式识别研究^[33]。作者将测得的多种单一材料光谱按不同组别加和平均,构造了多组混合光谱数据,作为建模样本和预测样本。分析结果显示,该算法相比传统的支持向量机分类精度有所提高,更适用于多类别样本。近红外波段材质光谱差异更明显,识别效果更好。

2017年,长春理工大学的刘昊等在实验室中对四种材质样品进行了多角度光谱测量,尝试对材质进行分类^[34]。作者采用结合夹角余弦和欧氏距离的 K 邻近算法训练了 200 组测试数据,对 50 组数据进行分类。与传统的朴素贝叶斯分类方法相比,该方法同时利用了光谱的幅度和线形特性,避免了复杂的特征提取过程,计算便捷,分类精度更高。

4 目标特性建模与仿真

计算机仿真目标特性的终极目标是精确再现实测数据。“一个成功的设计,依赖于对潜在目标及相关现象之特性的详细描述和精心建模。”^[35]一个精确的目标光谱仿真模型将极大提升数据获取效率,有助于测试并改进光谱反演方法,提高目标识别能力。材质光谱散射特性建模是其中尤为重要的一步,决定了最终目标仿真结果的准确性。由于材质光谱散射特性受表面状态、老化等多种因素影响,且目标表面多为镜面反射较强的褶皱材料,一个小部件的闪光将极大影响整体光谱。因此,通过计算机仿真精确再现实测数据具有较大的挑战性。

在目标的光谱散射特性建模与仿真方面,目前大多数研究可分为两步:对于单一材质,采用 sBRDF 描述,尝试拟合不同光照-探测角度引起的反射能量分布变化,建立了多种 sBRDF 模型;对于目标整体,采用材质光谱的线性混合模型描述,充分考虑目标的表面特性、部件遮挡、观测几何等因素,尽可能体现目标在轨状态。

2008年,为设计天基目标监视系统,美国空军研究实验室(AFRL)的研究人员进行了模型仿真计算^[36]。总结了不同口径望远镜观测 GEO 目标的极限视星等变化和低轨目标成像时的观测口径与波段选择。作者采用高级跟踪时域分析仿真软件(time-domain Analysis simulation for advanced tracking, TASAT)进行了模拟观测,并引入目标真实的三维模

型、轨道、观测几何、光谱 BRDF 特性、表面褶皱、探测器点扩散函数等变量进行场景渲染,验证了主成分分析、相关分析等多种反演方法的有效性。

2010 年,美国波音公司的 Doyle Hall 建立了一个 6 个面覆盖不同表面材质的立方体卫星模型^[37],调用了 TASAT 软件数据库中的材质光谱 BRDF 数据,以 Maxwell Beard 模型描述,并仿真了失控旋转和三轴稳定两种情况下的目标光学散射截面和混合光谱。光谱解混分析结果显示,目标表面材料的识别准确度取决于光谱数据库的完备性和准确性。地基单一站点可视表面有限,材质反演能力不足。

2014 年,美国空军学院的 Douglas A. Hope 提出用信息论的方法研究空间目标光谱中所含有效信息^[38],并尝试用于提高 Falcon Telescope Network 的目标识别能力。作者采用卫星表面材料组成的平板模型仿真地基观测数据,分析空间目标光谱在不同波段、不同光谱分辨率情况下蕴含的最大信息熵。仿真结果表明,光谱探测的目标信息获取能力明显优于宽波段光度测量,并论证了相比单一测站,多站探测网络可获得更多目标光谱信息量。

2015 年,Willison 等对 CanX-1 卫星工程模型进行光度特性仿真^[39]。作者利用了实验室测得的材质 sBRDF 数据和卫星三维模型,仿真光度数据与实测数据趋势相符,但数值上仍有较大偏差。作者总结误差原因有两点:(1) 三维模型并不完美,尤其是忽略了一些微小结构信息;(2) 所用 sBRDF 数据仅包含有限的探测角度,插值运算可能引入误差。

国内研究者主要围绕空间目标表面材质的光谱散射特性建模方法进行了一些研究。

2008 年,西安电子科技大学的曹运华等提出用五参数 BRDF 模型^[40],采用改进的粒子群算法优化建模。2012 年,在此基础上,杨玉峰利用改进的六参数模型,结合卫星表面的包覆膜的褶皱起伏三维特征进行仿真^[41],结果相比光滑材料样片更接近真实情况。

2010 年,北京航空航天大学的袁艳等采用模拟退火算法结合五参量模型对包覆材料光谱 BRDF 测试数据进行拟合^[42],模型数据和实验测量结果方均误差小于 4%。2011 年,他们又对空间目标紫外特性进行了建模仿真^[43],总结了基于区域网格划分的数据仿真流程。

2015 年,中国科学院光电研究院的孙成明等人通过区域网格划分和光谱 BRDF 模型建立了空间目标的光谱散射模型^[44]。在目标特性反演中,将目标等效看作单一的反射平面,忽略目标的结构、大小、材料特征。最终利用卫星缩比模型进行目标特性提取实验,验证了建模方法的有效性。

2017 年,装备学院的刘程浩等尝试用神经网络对空间材质 BRDF 建模^[45]。作者采用 4 层神经网络训练了一个包含 10 种空间材质的散射测量数据集。相比 Phong 模型和五参数模型两种经验模型,该方法拟合误差更小,且适用于漫反射和镜面反射两种特性的材质,对于不同的样本数量也有较好的鲁棒性。该建模方法不依赖于目标物理特性先验知识,具有应用潜力。

5 总结与展望

纵观空间目标光谱识别研究的发展,在信息获取的维度和光谱分析的手段上都在不断扩展。探测平台上,由单一地基望远镜向多站联测以及天基探测器发展,扩展了目标观测的角度;探测谱段上,由可见光多光谱向紫外和红外高光谱发展,扩展了可用于特征提取的光谱维度;特征提取上,由多波段能量比值聚类向细节光谱特征和线形特征的提取发展,提高了材质光谱的识别能力;反演方法上,由基于材质光谱的直接分类向混合光谱解混识别发展。更宽的光谱范围、更高的光谱分辨率意味着更强的目标识别能力,以及更高的数据获取成本,如图 7 所示。因此,依据高光谱研究成果,设计专用多通道测光系统,将是面向应用的可行手段。

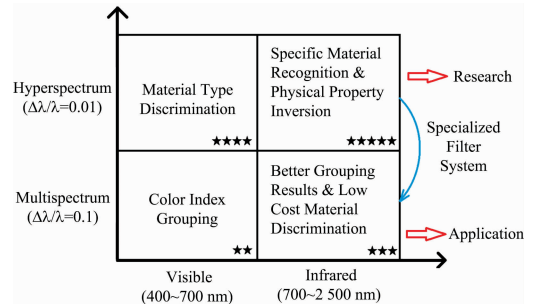


图 7 光谱范围、分辨率选择与目标识别能力的关系

★越多表示能力越强

Fig. 7 Identification ability varies with spectral range and resolution

more ★ indicates stronger ability

对比国内和国外在空间目标光谱探测识别领域的研究现状,其发展情况有诸多不同。国际上该领域研究以美国为代表,研究起步时间较早,已经积累了充足的观测设备和数据资源,形成了多个专业研究团队长期从事该领域的研究工作,例如美国空军学院(Air Force Academy)、加拿大皇家军事学院(Royal Military College of Canada)、美国宇航局约翰逊航天中心(NASA/JSC)、欧洲宇航局(ESA)、加州州立理工大学(California Polytechnic State University)、波音公司(Boeing)等单位的相关研究团队。这些团队同时具备观测设备、实验室测试环境、目标特性共享数据库等研究要素,公布了较多长期研究成果。每年的先进毛伊岛光学及太空监测技术会议(Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference)、欧洲的空间碎片会议(European Conference on Space Debris),代表了业界领先水平,并将非分辨空间目标识别(Non-resolved Space Object Identification)作为专题,充分讨论具体技术,历年研究成果之间具有较好的连贯性和体系性。但由于该研究领域具有一定敏感性,很多研究成果的详细内容未在公开文献上发表。

国内研究起步较晚,目前研究较为零散,局限于少量测量结果,长期观测数据积累不足。研究方法上主要分为两端:一端是具备天文观测条件的研究者,注重观测数据积累

和定性分类分析方法,较少深入挖掘光谱特征所蕴含的目标状态信息;另一端是具备一定光学测量条件的研究者,多集中于材质特性的拟合建模和仿真研究,缺乏与实测数据比对验证。相关研究缺乏连续性,多为前人方法的重复验证,少有提出新的研究方法和对长期数据积累进行分析。

因此,针对空间目标光谱识别研究现状,尤其是国内研究的不足之处,提出几点研究思路:

(1) 打通观测数据、实验数据、仿真数据的壁垒,以已知状态目标的观测数据为标准,不断迭代改进实验条件和仿真细节,使三者趋同,并探寻差异背后的物理原理;

(2) 精心建立以物理原理为基础的目标光谱散射特性模型,充分考虑材质的表面特性、部件的结构特性、光谱的角度特性,提高仿真精度;

(3) 向富有潜力的红外高光谱探索,建立长效观测数据获取机制,可针对少数典型 GEO 目标进行长期监测,包含

可见光和红外光谱,由目标光谱长期演化规律中找到可用的特征识别点;

(4) 建立统一标准开放存取的材质光谱 BRDF 数据库,数据具备可溯源性和角度完备性,并且考虑材质的表面特性,可用于计算机仿真模型的建立与混合光谱的反演;

(5) 在光谱反演算法上突破,如采用神经网络等机器学习算法实现目标光谱的有效分类,发现目标光谱的隐含模式特征。

随着研究不断深入,地基、天基观测手段不断完善,将有更多来自不同探测设备的数据汇入空间目标监测系统。未来,空间态势感知和目标识别将不单单局限于个别探测器的零星观测,而是融合雷达、光学、轨道、情报等多源数据融合判断的结果。空间目标光谱探测以其独有的材质识别能力,必将在其中发挥举足轻重的作用。

References

- [1] SUN Rong-yu, ZHAO Chang-yin(孙荣煜, 赵长印). Progress in Astronomy(天文学进展), 2012, 30(3): 394.
- [2] Payne T E W, Sanchez D J, Burdullis T W. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2001, 4490(2): 194.
- [3] TANG Yi-jun, JIANG Xiao-jun, WEI Jian-yan, et al(唐轶峻, 姜晓军, 魏建彦, 等). Journal of Astronautics(宇航学报), 2008, 29(4): 1094.
- [4] HAN Yi, SUN Hua-yan(韩 意, 孙华燕). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2013, (3).
- [5] Chaudhary A, Payne T, Lucas K, et al. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2014.
- [6] Binz C, Davis M, Kelm B, et al. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2014.
- [7] Fulcoly D, Kalamaroff K, Chun F. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2009.
- [8] WANG Yang, DU Xiao-ping, FAN Chun-lin(王 阳, 杜小平, 范椿林). Science Bulletin(科学通报), 2017, (15): 1578.
- [9] Seitzer P, Barker E S, Cowardin H, et al. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2014.
- [10] FAN Liang, LEI Cheng-ming, SUN Rong-yu, et al(樊 亮, 雷成明, 孙荣煜, 等). Progress in Astronomy(天文学进展), 2017, 35(1): 93.
- [11] Sanchez D J, Payne T E W, Finkner L G, et al. Proc SPIE, 2000, 4091: 164.
- [12] Dao P, Mcnicholl P, Brown J, et al. Advanced Maui Optical & Space Surveillance Technologies Conference, 2008.
- [13] Jolley A, Wade G, Bedard D. Advanced Maui Optical & Space Surveillance Technologies Conference, 2015.
- [14] Hart M, Rast R, Jefferies S. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2015.
- [15] MAO Yong-na(毛永娜). Determination and Analysis of Multicolor Characteristics of Space Debris(空间碎片光度多色特性的提取与分析). National Astronomical Observatories, CAS(中国科学院国家天文台), 2012.
- [16] Schildknecht T, Vannanti A, Krag H, et al. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2009.
- [17] Abercromby K J, Rapp J, Bedard D, et al. ESA Special Publication, 2013.
- [18] Abercromby K, Buckalew B, Abell P, et al. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2015.
- [19] Bedard D, Wade G. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2014: T1D-7.
- [20] Bédard D, Wade G A. Advances in Space Research, 2017, 59(1): 212.
- [21] Ryan M T, Evan M W, Francis K C, et al. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2015.
- [22] Vananti A, Schildknecht T, Krag H. Advances in Space Research, 2017, 59(10): 2488.
- [23] Lederer S M, Buckalew B A, Anz-Meador P, et al. The 7th European Conference on Space Debris, 2017.
- [24] SONG Wei, FENG Shi-qi, SHI Jing, et al(宋 薇, 冯诗淇, 石 晶, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2015, 35(6): 1464.
- [25] Cowardin H, Seitzer P, Abercromby K, et al. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2010.
- [26] Cowardin H, Ojakangas G, Mulrooney M, et al. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2012, 1: 61.
- [27] Bedard D, Lévesque M, Wallace B. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2011: 1.
- [28] Bédard D, Lévesque M. Journal of Spacecraft & Rockets, 2014, 51(5): 1492.
- [29] Bédard D, Wade G A, Abercromby K. Journal of Spacecraft & Rockets, 2015, 52: 1038.
- [30] WEI Xiang-quan, HUANG Jian-ming, YAN Gen-ting, et al(魏祥泉, 黄建明, 颜根廷, 等). Journal of Command and Control(指挥与控制学报), 2015, (1): 81.

- [31] XU Rong, ZHAO Fei, LI Huai-feng, et al(徐 融, 赵 飞, 李怀峰, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2016, 45(2): 0212002.
- [32] XU Rong, ZHAO Fei(徐 融, 赵 飞). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2016, 45(s1): 121.
- [33] LI Qing-bo, WU Ke-jiang, GAO Qi-shuo(李庆波, 吴科江, 高琦硕). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(12): 4067.
- [34] LIU Hao, TAN Yong, LIU Chun-yu, et al(刘 昊, 谭 勇, 刘春宇, 等). Journal of Changchun University of Science and Technology · Natural Science Edition(长春理工大学学报·自然科学版), 2017, 40(1): 23.
- [35] Mill J D, Guilmain B D. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1996, 17(1): 4.
- [36] Glass W, Duggin M J, Bush K A. Nanophotonics and Macrophotonics for Space Environments III, 2008: 74670K.
- [37] Doyle Hall. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2010: 1.
- [38] Hope A D. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2014.
- [39] Willison A, Bedard D. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2015.
- [40] CAO Yun-hua, WU Zhen-sen, ZHANG Han-lu, et al(曹运华, 吴振森, 张涵璐, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2008, 28(4): 792.
- [41] YANG Yu-feng(杨玉峰). Study on Spectral Scattering Properties of Target with Irregular Fold Surface(不规则褶皱表面目标的光谱散射特性研究). Xidian University(西安电子科技大学), 2012. doi: 10.7666/d.d216949.
- [42] YUAN Yan, SUN Cheng-ming, ZHANG Xiu-bao(袁 艳, 孙成明, 张修宝). Acta Physica Sinica(物理学报), 2010, (3): 2097.
- [43] YUAN Yan, SUN Cheng-ming, HUANG Feng-zhen, et al(袁 艳, 孙成明, 黄锋振, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2011, 60(8): 089501.
- [44] SUN Cheng-ming, ZHAO Fei, YUAN Yan(孙成明, 赵 飞, 袁 艳). Acta Physica Sinica(物理学报), 2015, 64(3): 34202.
- [45] LIU Cheng-hao, LI Zhi, XU Can, et al(刘程浩, 李 智, 徐 灿, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2017, (11): 1129001.

Progress of Spectral Measurements and Characterization for Non-Resolved Space Objects

XU Rong^{1,2}, ZHAO Fei^{1,2}, ZHOU Jin-song^{1,2}

1. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Optical measurement is one of the most important means of Space Object Identification. Due to the long observation distance, space objects in the field-of-view usually turn out to be unresolved points. Compared with orbit determination and photometry measurements, spectral measurements provide useful information in the wavelength dimension, which greatly improves the ability of material discrimination. This ability has great potential since it can provide reliable evidences for space object characterization. This paper introduces some typical results of space objects spectral observation and characterization in recent years, including multi-band photometry measurement, hyperspectral measurement, laboratorial spectral measurement, and characteristics modeling and simulation. Multi-band photometry measurement can bring low resolution spectral data, which is a common method for space object classification in large area. Hyperspectral measurement focuses on detailed spectral structure in the reflected light, from whom material composition of specific objects can be derived. Laboratorial spectral measurement can simulate the process of real observation under controlled conditions, while providing database of materials' spectral data. Characteristics modeling and simulation is used to generalize the attribute data to study the spectrum changing process. By analyzing domestic and overseas experiences, the capacity and weakness of current researches as well as several ideas of future works are discussed, offering a reference for future studies.

Keywords Space object; Spectral measurement; Modeling and simulation; Spectral inversion; Characteristic recognition

(Received Nov. 17, 2017; accepted Apr. 29, 2018)