

基于光谱的天基空间点目标特征提取与识别

孙成明 赵飞 袁艳

Feature extraction and recognition of non-resolved space object from space-based spectral data

Sun Cheng-Ming Zhao Fei Yuan Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 034202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.034202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三反射主动变焦系统设计

Design of the active zoom system with three-mirror

物理学报.2014, 63(14): 144201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.144201>

高聚焦高斯光束对左手性材料球轴向力的光线模型计算

Ray optics calculation of axial force exerted by a highly focused Gaussian beam on a left-handed material sphere

物理学报.2013, 62(18): 184201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.184201>

非相干光源无衍射光的自重建

Reconstruction of incoherent source Bessel beam

物理学报.2013, 62(10): 104219 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.104219>

面对称光学系统的初级波像差理论研究

Third-order aberrations of a plane symmetric optical system

物理学报.2013, 62(9): 094203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094203>

关于部分偏振光能量传递和偏振态的光线椭圆分析方法

Ray ellipse method of analyzing the power and polarization state of partially polarized light

物理学报.2012, 61(13): 134201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.134201>

基于光谱的天基空间点目标特征提取与识别*

孙成明^{1)†} 赵飞¹⁾ 袁艳²⁾

1) (中国科学院光电研究院, 北京 100094)

2) (北京航空航天大学, 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

(2014年8月15日收到; 2014年9月17日收到修改稿)

天基空间目标观测时, 对于远距离目标, 通常只能得到一个点的相关信息, 包括目标的位置和灰度等, 损失了目标的材料、大小和状态等特征. 代表物体固有属性差异的光谱特性可作为目标特征提取与识别的一种重要手段. 从目标光谱特性的产生特点出发, 综合考虑目标的材料特性、结构特性、背景特性、轨道特性等因素, 建立了目标光谱特性的数学模型, 提出了基于光谱特性数学模型反演计算的目标特征提取与识别方法, 以环境一号卫星缩比模型为例, 进行了典型参数条件下的目标特征提取与识别实验验证, 实验结果验证了建模方法的正确性.

关键词: 空间目标, 光谱特性, 双向反射分布函数, 特征提取与识别

PACS: 42.15.-i, 42.25.Fx, 02.70.Hm, 02.60.Cb

DOI: 10.7498/aps.64.034202

1 引言

天基空间目标观测具有不受气象影响、机动灵活、全天候工作等优势, 能够弥补地基空间目标观测易受气象、地域和时间等条件限制的不足, 逐渐成为当前研究的热点^[1]. 然而, 对于远距离目标观测(如低轨有效载荷观测地球同步轨道目标), 通常只能得到一个点的相关信息, 包括目标的位置和灰度等, 损失了目标的材料、大小和状态等特征. 如此有限的信息量使得点目标特征提取与识别成为一个较为棘手的问题. 以往的研究工作大都基于亮度特性进行目标特征提取与识别^[2-7], 通过观测结果与一定大小和状态等特征的仿真结果匹配, 对应确定目标的大小和状态等特征. 这种方法需要大量的仿真数据, 即需要建立一定规模的目标亮度特性数据库. 此外, 基于亮度特性虽然能在一定程度上反映目标的大小和状态等特征, 但是无法同时获得目标的材料特征. 代表物体固有属性差异的光谱特性可作为目标特征提取与识别的一种重要手段. 目

标的整体光谱特性是由目标表面材料光谱特性及其有效面积共同决定的, 与目标的材料、大小和状态等特征有关. 不同材料的目标, 光谱特性曲线的拐点、斜率存在明显的区别; 不同大小的目标, 由于其表面材料有效面积的不同, 目标的整体光谱特性也将呈现显著的差异. 此外, 同一目标的状态不同, 其表面材料的类型和有效面积都会改变, 目标的整体光谱特性也会随之改变. 上述目标光谱特性的产生特点, 使得通过光谱特性进行目标特征提取与识别成为可能. 相对于作为整体积分的亮度特性, 光谱特性能够体现目标局部之间的特征差异, 在目标特征提取与识别方面具有较大的优越性. 目前, 基于光谱特性仅是进行遥感地物识别^[8]; 或是将目标从背景中初步地分离出来^[9], 没有提取目标具体的特征. 基于光谱特性同时提取目标的材料、大小和状态等特征还缺乏具有针对性的、行之有效的方法, 还有待深入研究. 本文针对天基空间目标观测时, 由于距离远而难于成像、只能作为点源观测的一类目标, 研究如何从目标的光谱特性中提取目标的材料、大小和状态等特征, 在目标多类特征与目标光

* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 61308101)和教育部长江学者和创新团队发展计划(批准号: IRT0705)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sunchengming2008@163.com

谱特性之间建立一种精确的映射关系, 探索出一套不依赖于大量仿真数据的、量化的、高效的目标特征反演计算方法, 为天基应用提供技术支撑.

2 空间目标特征提取与识别理论建模

2.1 空间目标光谱特性理论建模

目标光谱特性的数学模型是目标特征提取与识别的基础. 在轨运行的目标光谱特性时刻处于动态的变化中, 与目标的材料、大小和状态等特征有关, 需要综合考虑目标的材料特性、结构特性、背景特性、轨道特性等因素, 在目标多类特征与目标光谱特性之间建立一种精确的映射关系. 目标光谱特性可通过目标表面反射背景辐射在探测器入瞳处产生的光谱辐照度来描述. 本文引入可精确描述目标表面反射空间特性和光谱特性的双向反射分布函数 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) 进行入瞳能量计算. BRDF 是由 Nicodemus^[10] 于 1965 年提出的, 是从辐射度学出发、在几何光学的基础上描述表面反射特性的物理量, 定义为光辐射的反射辐亮度和入射辐照度的比值, 如图 1 所示. 数学表达式为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)}, \quad (1)$$

式中, θ_i, φ_i 为入射天顶角和方位角; θ_r, φ_r 为反射天顶角和方位角; λ 为波长; dE_i 和 dL_r 为入射辐照度和反射辐亮度.

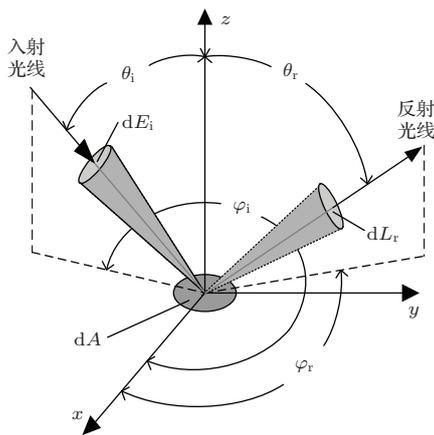


图1 BRDF定义几何示意图

基于有限元的思想^[11,12], 按照目标表面材料属性的不同, 对目标表面进行区域分解与网格划分, 如图 2 所示. 利用 BRDF 计算每个面元在探测

器入瞳处产生的光谱辐照度, 最后将所有的面元分量叠加, 得到整个目标在探测器入瞳处产生的光谱辐照度.

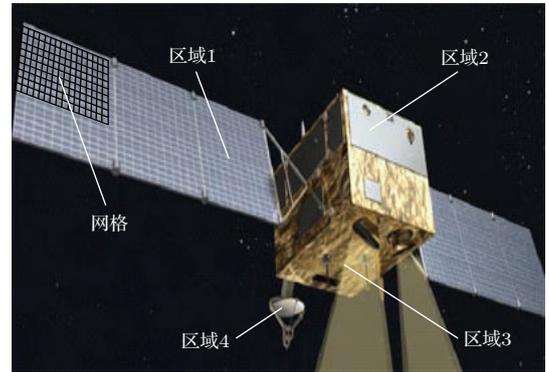


图2 区域分解与网格划分

目标表面面元与探测器入瞳面的几何位置关系如图 3 所示. 其中, n 为目标表面面元的法线方向, n_i 和 n_r 为光照方向和探测方向, n' 为探测器入瞳面的法线方向, oo' 为目标表面面元与探测器入瞳面的中心连线, θ_d 为探测器的偏角.

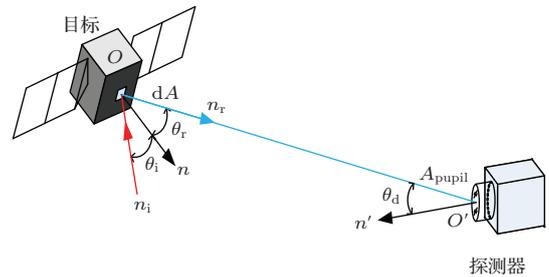


图3 面元探测几何示意图

由 BRDF 定义, 面元 dA 反射太阳辐射在 n_r 方向上的光谱辐亮度为^[13,14]

$$L(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_{\text{sun}}(\lambda) \cos \theta_i, \quad (2)$$

式中, $E_{\text{sun}}(\lambda)$ 为面元 dA 处的太阳光谱辐照度.

面元 dA 在 n_r 方向上的光谱辐强度为

$$dI(\lambda) = L(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) dA \cos \theta_r. \quad (3)$$

面元 dA 在探测器入瞳处的光谱辐通量为

$$d\Phi_{\text{pupil}}(\lambda) = dI(\lambda) d\Omega, \quad (4)$$

式中, $d\Omega$ 为探测立体角,

$$d\Omega = A_{\text{pupil}} \cos \theta_d / R^2. \quad (5)$$

由辐照度定义, 面元 dA 在探测器入瞳处的光谱辐照度为

$$dE_{\text{pupil}}(\lambda) = d\Phi_{\text{pupil}}(\lambda)/A_{\text{pupil}} = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_{\text{sun}}(\lambda) \cos \theta_i \times \cos \theta_r \cos \theta_d dA/R^2. \quad (6)$$

对式 (6) 在目标的有效表面积分, 得到整个目标在探测器入瞳处的光谱辐照度为

$$E_{\text{pupil}}(\lambda) = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_{\text{sun}}(\lambda) \cos \theta_i \times \cos \theta_r \cos \theta_d A_{\text{eff}}/R^2. \quad (7)$$

2.2 空间目标特征反演理论建模

目标光谱特性通过目标表面反射背景辐射在探测器入瞳处产生的光谱辐照度来描述. 其数学模型综合考虑了目标的材料特性、结构特性、背景特性、轨道特性等因素, 在目标的材料、大小和状态等特征与目标光谱特性之间建立了一种精确的映射关系. 由于目标光谱特性的影响因素较多, 在仅给定目标光谱特性的基础上, 从信息论的角度无法反向提取目标的材料、大小和状态等特征. 因此, 需要辅助一定的限定条件和先验信息. 这一过程对应到原理公式上, 意味着已知结果和多个变量, 求解剩余的惟一变量, 数学上可解. 对于基于反射光谱特性进行目标特征提取与识别, 需要把整个目标抽象为一个反射平面, 如图 4 所示. 这种抽象不分类别, 任何材料、大小和状态等特征的目标都可抽象为一个导致光束发生反射的平面, 等效平面的法线方向与目标的坐标轴方向、旋转对称轴方向等特征方向无关^[15].

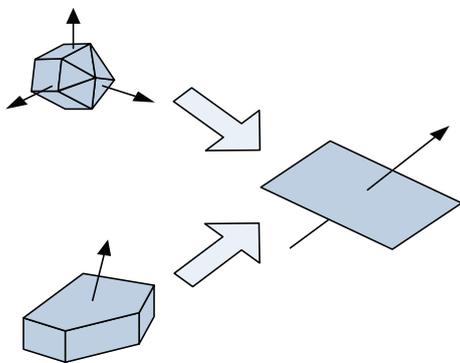


图 4 等效散射平面示意图

目标特征提取与识别步骤如图 5 所示.

基于瞬时的光谱特性, 分解出目标表面材料的类型和有效面积, 直接提取出目标的材料特征, 这一步得到的是量化的、明确的结果. 基于时变的光谱特性, 分解出目标表面材料的类型和有效面积的变化, 间接提取出目标的大小和状态等特征, 这一步得到的是半定量、半推断的结果, 需要通过一定时空维度范围内的数据积累和统计.

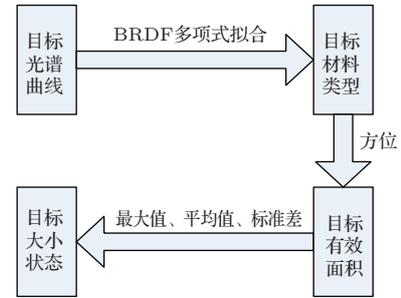


图 5 特征提取与识别步骤

目标表面等效光谱反射率为

$$\rho(\lambda) = E_{\text{pupil}}(\lambda)/E_{\text{sun}}(\lambda) = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cos \theta_i \cos \theta_r \times \cos \theta_d A_{\text{eff}}/R^2. \quad (8)$$

对于材料特征提取, 将等效光谱反射率分解为 BRDF 多项式的和, 即

$$\rho(\lambda) = \sum_{i=1}^N k_i f_{ri}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda), \quad (9)$$

式中,

$$k = \cos \theta_i \cos \theta_r \cos \theta_d A_{\text{eff}}/R^2. \quad (10)$$

基于 BRDF 数据库, 采用曲线拟合的方法确定 $f_{ri}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$, 求解 k_i . 通常情况下, 目标表面材料的类型只有少数几种, 即式 (9) 中 N 的数值不会太大. 这一特点是判断目标材料可行性的基础.

在求解 k_i 的基础上, 由 (10) 式, 得到目标的有效面积为

$$A_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^N k_i R^2 / (\cos \theta_i \cos \theta_r \cos \theta_d), \quad (11)$$

式中, $\theta_i = \theta_r = \theta/2$, θ 为探测相位角.

基于目标光谱特性探测几何, 求解目标的有效面积.

对于大小和状态等特征提取, 统计目标有效面积序列的最大值、平均值和标准差, 根据最大值判断目标大小 (小目标: $<5 \text{ m}^2$, 中目标: $5\text{—}30 \text{ m}^2$,

大目标: $>30 \text{ m}^2$), 根据标准差与平均值之比判断目标状态 (稳定的: ≤ 0.1 , 变化的: > 0.1).

采用光谱角度余弦进行目标拟合光谱与原始光谱之间的相似度评价 [16]. 通过计算目标拟合光谱与原始光谱之间的角度余弦来表征其匹配程度: 光谱角度余弦越接近于 1, 相似度越高. 两光谱矢量之间的角度余弦为

$$\cos \theta = \frac{X \cdot Y}{|X||Y|}. \quad (12)$$

光谱角度余弦反映了两光谱矢量在几何上的相似性, 其对于坐标系的放大、缩小及旋转都是不变的.

3 空间目标特征提取与识别实验验证

以环境一号卫星缩比模型为例, 进行典型参数条件下的目标特征提取与识别实验验证. 首先, 搭建目标光谱特性实验测量平台, 获得已知材料、大小和状态等特征的目标光谱特性. 然后, 基于获得的目标光谱特性, 反向提取目标的材料、大小和状态等特征, 并与已知条件相比较, 验证评估目标特征反演计算方法的效果.

3.1 空间目标光谱特性实验测量

3.1.1 测量方案

目标的背景辐射主要来自太阳的直接或间接辐射. 为了真实描述目标的背景特性, 选用太阳模拟系统作为背景辐射光源. 为了实现不同光照方向和探测方向下的目标光谱特性测量, 选用三维转台放置目标缩比模型. 目标缩比模型材料和大小等特征如表 1 所示. 当太阳模拟系统发射的平行光以某一方向入射到目标表面后, 探测器在相应的方向接收目标表面反射光谱特性. 测量方案如图 6 所示.

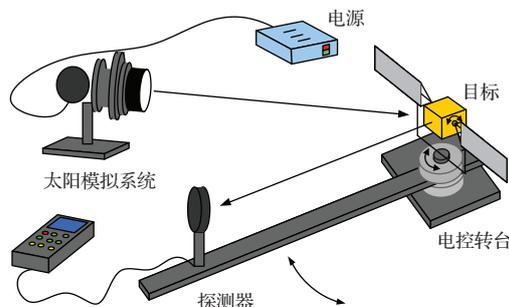


图6 光谱特性测量方案示意图

表1 缩比模型材料和大小

卫星	部件	材料	大小/mm
环境一号	本体	金色聚酯薄膜	80 × 100 × 70
	帆板	正面	GaAs
		背面	黑漆
		与本体中心距	180

3.1.2 测量结果

初始设定光线以 25° 入射角的方向入射到目标表面, 探测器在 25° 反射角的方向接收, 获得目标在镜反射时的光谱辐照度及等效光谱反射率. 此外, 在保持相位角 50° 不变的条件下, 以 1° 角间隔逆时针旋转目标, 获得目标在各旋转角度下相应的光谱辐照度及等效光谱反射率, 共计 50 组数据. 光线路径如图 7 所示. 其中, 目标在镜反射、旋转 5° 及旋转 10° 时的光谱辐照度及等效光谱反射率分别如图 8、图 9 所示.

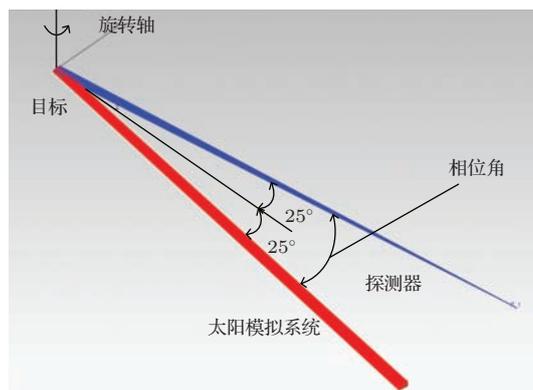


图7 光线路径示意图

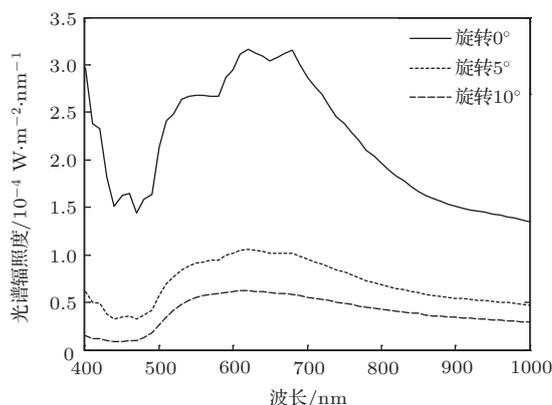


图8 光谱辐照度

由图 8 可以看出, 目标的光谱辐照度曲线与太阳的大体一致, 主要是由于目标本身不发光, 目标

光谱辐照度是目标光谱反射特性和太阳光谱辐照度综合作用的结果,即目标光谱辐照度是目标光谱反射特性对太阳光谱辐照度的调制.

由图9可以看出,镜反射时,目标的等效光谱反射率曲线与帆板的大体一致,主要是由于帆板较本体镜反射强且有效面积大的原故.随着目标旋转,目标的等效光谱反射率曲线开始趋向于与本体的大体一致,主要是由于偏离了镜反射方向,帆板对目标等效光谱反射率的贡献逐渐减少而本体的贡献逐渐增加的原故.

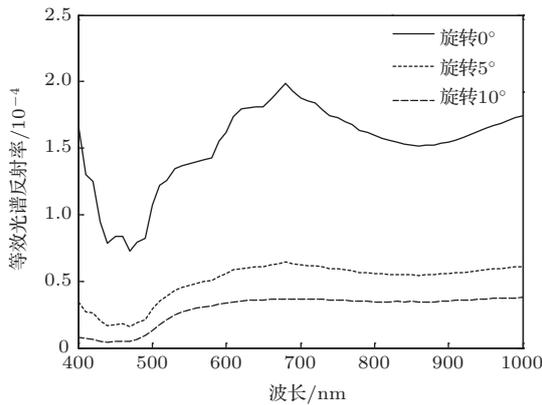


图9 等效光谱反射率

3.2 空间目标特征反演验证评估

基于获得的50组目标等效光谱反射率,分解出目标表面材料的类型和有效面积的变化,如图10所示.结果表明,目标表面材料的类型为金色聚酯薄膜和GaAs.对目标的有效面积序列进行统计分析,得出有效面积最大值为 0.03371761 m^2 ,平均值为 0.02855370 m^2 ,标准差为 0.00371150 m^2 .由此,目标大小为小目标(有效面积 $< 5 \text{ m}^2$),状态为变化的(标准差/平均值 > 0.1).目标拟合光谱与原始光谱之间的相似度曲线如图11所示.相似度 ≥ 0.82 .目标特征反演结果与已知条件之间的符合性如表2所示.其中,目标有效面积反演结果与已知条件之间的相对误差 $\leq 9.68\%$.综上,验证了目标特征反演计算方法的正确性.

表2 已知条件与反演结果

特征	已知条件	反演结果	符合性
材料	金色聚酯薄膜	金色聚酯薄膜	符合
	GaAs	GaAs	
大小	小目标	小目标	符合
状态	变化的	变化的	符合

在轨运行的目标几何尺度(几米到几十米)比仿真波长(几百纳米)大得多,根据衍射原理,不满足衍射条件,目标主要表现为对背景辐射的反射特性.目标缩比模型几何尺度(几百毫米)也远大于仿真波长,同样不需要考虑衍射效应的影响,而只关注其反射特性.因此,几何尺度的影响在一定程度上可以忽略.此外,在轨运行的目标表面包覆材料由于真空释气而出现大量褶皱,为了真实表征目标表面纹理,在进行目标特征提取与识别实验验证之前,通过人为处理使目标缩比模型表面产生类似纹理.因此,表面纹理的影响在一定程度上可以忽略.综上,采用目标缩比模型进行目标特征提取与识别实验验证是可行的.下一步工作拟开展低温、真空环境下的目标特征提取与识别实验验证研究,为目标特征反演计算方法验证评估提供参考依据.

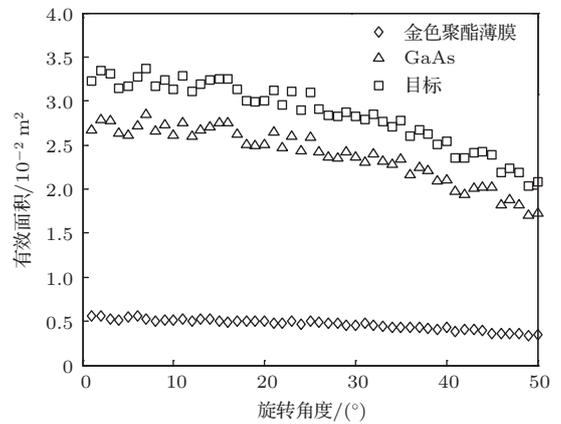


图10 材料类型和有效面积

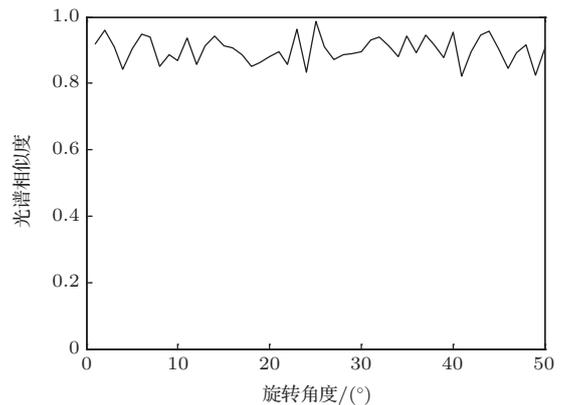


图11 光谱相似度

4 结论

本文对天基空间点目标特征提取与识别进行了理论建模与实验验证.提出了基于光谱特性的

目标特征反演计算方法. 以环境一号卫星缩比模型为例, 实验测量了已知特征的目标光谱特性, 在此基础上, 验证评估了目标特征反演计算方法的效果. 结果表明, 基于光谱特性能够同时提取目标的材料、大小和状态等特征. 能够体现目标局部(本体和帆板)之间的特征差异, 在目标特征提取与识别方面具有较大的优越性. 拓展了目标光谱特性的应用, 提升了目标特征提取与识别的能力.

参考文献

- [1] Zhou Y P, Shu R, Tao K Y, Guo S 2007 *Opt. Tech.* **33** 68 (in Chinese) [周彦平, 舒锐, 陶坤宇, 郭松 2007 光学技术 **33** 68]
- [2] Ryan E V, Ryan W H 2007 *Proc. Adv. Maui Opt. Space Surveillance Technol. Conf. Hawaii*, September 12–15 2007
- [3] Alcalá C M, Brown J H 2009 *Proc. Adv. Maui Opt. Space Surveillance Technol. Conf. Hawaii*, September 1–4 2009
- [4] Nishimoto D, Archambeault D, Gerwe D, Kervin P 2010 *Proc. Adv. Maui Opt. Space Surveillance Technol. Conf. Hawaii*, September 14–17 2010
- [5] Zhang H, Peng Q M, Lv W X, Li J, Hu X H 2009 *J. Syst. Simul.* **21** 418 (in Chinese) [张衡, 彭启民, 吕文先, 黎俊, 胡晓惠 2009 系统仿真学报 **21** 418]
- [6] Diao H F, Li Z 2010 *J. Acad. Equip. Comm. Technol.* **21** 55 (in Chinese) [刁华飞, 李智 2010 装备指挥技术学院学报 **21** 55]
- [7] Tang Y J, Jiang X J, Lu X M, Wei J Y, Hu J Y 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 763 (in Chinese) [唐轶俊, 姜晓军, 卢晓猛, 魏建彦, 胡景耀 2010 光学学报 **30** 763]
- [8] Zhang X 2010 *Infrared Technol.* **32** 717 (in Chinese) [张翔 2010 红外技术 **32** 717]
- [9] Zhu H F, Han J T, Jiang W D, Chen Z P 2005 *Optoelectron. Technol.* **25** 16 (in Chinese) [朱海峰, 韩建涛, 姜卫东, 陈曾平 2005 光电子技术 **25** 16]
- [10] Nicodemus F E 1965 *Appl. Opt.* **4** 767
- [11] Wang R, Guo L X, Ma J, Wu Z S 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1503
- [12] Wang A Q, Guo L X, Chai C 2011 *Chin. Phys. B* **20** 050201
- [13] Sun C M, Yuan Y, Zhang X B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7523 (in Chinese) [孙成明, 袁艳, 张修宝 2010 物理学报 **59** 7523]
- [14] Yuan Y, Sun C M, Huang F Z, Zhao H J, Wang Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 089501 (in Chinese) [袁艳, 孙成明, 黄锋振, 赵慧洁, 王潜 2011 物理学报 **60** 089501]
- [15] Xu S X 2011 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [徐实学 2011 博士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [16] Liu Y Y, Lv Q B, Zeng X R, Huang M, Xiangli B 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 060203 (in Chinese) [刘扬扬, 吕群波, 曾晓茹, 黄旻, 相里斌 2013 物理学报 **62** 060203]

Feature extraction and recognition of non-resolved space object from space-based spectral data*

Sun Cheng-Ming^{1)†} Zhao Fei¹⁾ Yuan Yan²⁾

1) (*Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

2) (*Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China*)

(Received 15 August 2014; revised manuscript received 17 September 2014)

Abstract

The location and intensity of non-resolved space object can be obtained in space-based surveillance, however, the material, size, and status of the object are lost. Spectrum represents the inherent property difference of the object, which can be used as an important means for feature extraction and recognition of non-resolved space object. According to the influence factors, including material, structure, background and orbit, a mathematical model for spectral properties of space object is established. Based on the model, inverse calculation method for feature extraction and recognition of space object is proposed. Taking the HuanJing-1 satellite scale model as an example, experimental verification for feature extraction and recognition of space object in typical parameters is made. Experimental results demonstrate the validity of the modeling method.

Keywords: space object, spectral properties, bidirectional reflectance distribution function, feature extraction and recognition

PACS: 42.15.-i, 42.25.Fx, 02.70.Hm, 02.60.Cb

DOI: [10.7498/aps.64.034202](https://doi.org/10.7498/aps.64.034202)

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61308101), and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (Grant No. IRT0705).

† Corresponding author. E-mail: sunchengming2008@163.com