

空间目标光学散射特性研究进展

韩 意¹, 孙华燕²

(1. 装备学院 研究生院, 北京 101416; 2. 装备学院 光电装备系, 北京 101416)

摘 要: 空间目标光学散射特性建模与分析是空间光学监视系统论证设计、性能评价的前提和基础。以空间目标的可见光与激光散射特性为主要研究对象, 分析了空间目标光学散射特性的基本研究内容和方法, 介绍了国内外应用于卫星表面材料的比较典型的 BRDF 模型, 从卫星表面材料 BRDF 测量与建模、目标可见光散射特性测量与仿真计算和空间目标 LRCS 测量与仿真计算三个方面, 介绍了国内外典型研究单位的研究成果以及下一步的研究发展方向。可为空间目标光学特性研究思路与方法提供借鉴。

关键词: 测量; 空间目标; 光学散射特性; 双向反射分布函数; 激光雷达散射截面

中图分类号: O432; TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0758-09

Advances in space target optical scattering character research

Han Yi¹, Sun Huayan²

(1. Company of Postgraduate Management, Academy of Equipment, Beijing 101416, China;

2. Department of Photoelectric Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: Modeling and analysis of space target's optical scattering characteristics are the premise and foundation of the demonstration, design and performance evaluation of space optical surveillance system. The visible and laser scattering characteristics of space object were emphatically focused in this paper, and the basic research contents and methods were discussed. The typical BRDF models of satellite's surface materials were introduced firstly, then the advances of foreign and domestic typical researches were introduced from three respects including surface materials' BRDF measurement and modeling, satellite's visible scattering characteristics measurement and calculating, and satellite's LRCS measurement and calculating. At last, the development orientation was put forward, which could provide references for the next research thinking and methods.

Key words: measurement; space target; optical scattering characteristics; BRDF; LRCS

收稿日期: 2012-07-12; 修订日期: 2012-08-14

基金项目: 武器装备预研项目(513210801); 国家 863 计划(2011AA7030105A)

作者简介: 韩意(1986-), 男, 博士生, 主要从事空间光电信息处理及系统方面的研究。Email: hanyuxuan.han@163.com

导师简介: 孙华燕(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电信息处理与对抗、图像处理方面的研究。

Email: shy221528@vip.sina.com

0 引 言

随着航天技术的发展,在空间目标探测与识别领域,空间目标光学特性分析已成为热点研究问题。空间目标光学特性分析,是目标光学探测与识别的重要基础,也是地基、天基空间监视系统方案论证和技术指标设计的前提,可为空间目标探测与识别系统的波段优化设计和探测能力分析提供依据。

空间目标光学特性主要包括目标的红外辐射特性、可见光散射特性、激光散射特性、紫外散射特性与偏振特性等。由于地基和天基的空间目标光学监视系统主要集中在可见光波段以及激光波段,因此空间目标的可见光散射特性和激光散射特性作为重点研究内容,正受到越来越多的关注。

文中主要关注空间目标的可见光与激光散射特性,分析了空间目标光学散射特性的基本研究内容和方法,从卫星表面材料 BRDF 测量与建模、卫星可见光散射特性测量与仿真计算、卫星 LRCS 测量与仿真计算三个方面,介绍了国内外典型研究单位的研究成果以及下一步的研究发展方向,可为空间目标光学特性研究思路与方法提供借鉴。

1 研究内容和方法

空间目标的光学散射特性比较复杂,涵盖了目标的红外特性、可见光特性、激光特性、紫外特性与偏振特性等多项内容,需要综合考虑目标表面材料的光学特性、目标外形几何结构和表面材质组成等多种因素的影响。

通常利用表面材质的双向反射分布函数(BRDF)来描述目标表面材料的光学散射特性^[1]。BRDF 的概念由美国学者 Nicodemus 最早于 1970 年正式提出。如图1所示,设有辐射亮度为 L_i 的光源均匀地照射各向同性的目标表面 A_i ,沿方向 $s(\theta_i, \varphi_i)$ 在立体角元 $d\omega_i$ 内入射到面元 dA_i 上的辐射照度为 dE_i ,面元 dA_i 经照射后沿 $r(\theta_r, \varphi_r)$ 方向在立体角元 $d\omega_r$ 内的反射光辐射亮度为 dL_r ,则双向反射分布函数的定义式可表示为:

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

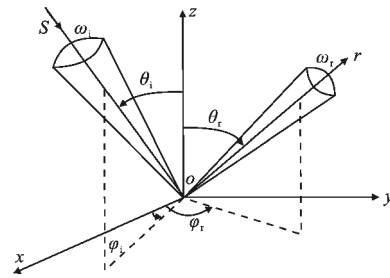


图 1 双向反射分布函数的几何关系

Fig.1 Geometry relation of BRDF

国外通常采用光学散射截面(OCS)这一参数来表征目标的可见光散射特性。在研究目标的激光散射特性时,国内外通常采用激光雷达散射截面(LRCS),用 σ 表示,也可称为主动光学散射截面。OCS 与 LRCS 能够全面反映目标表面材料及其几何结构、形状等多种因素对目标可见光和激光散射特性的影响。

OCS 的一般表达式为^[2]:

$$OCS = \int_A f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \cos\theta_i \cos\theta_r dA \quad (2)$$

式中: A 为目标有效散射面积。

单站探测条件下 LRCS 的一般表达式为^[3]:

$$\sigma = \int_A 4\pi f_r(\theta) \cos^2\theta dA \quad (3)$$

空间目标光学散射特性的主要研究内容可分为两方面:一是目标表面各种材料的光学散射特性研究,包括材料 BRDF 的建模、优化与测量等;二是空间目标整体的散射特性研究,包括测量、预估、仿真计算目标的 OCS 和 LRCS,分析其随各因素变化的情况等。这些工作可为监视目标在轨运行状态、识别未知空间目标、优化设计光学探测监视系统等提供参考和依据。

研究途径主要有真实空间目标外场测试、目标全尺寸模型和缩比模型测量、表面材料光学散射特性测量与建模优化、空间目标动态光学特性仿真计算等。通过外场试验测量可以获取目标的真实光学特性数据,但由于受实际目标获取困难及测量条件的限制,很多空间目标无法直接测量,或者只能在实验室对缩比模型进行测量。而实验室测量时受实际测量条件限制,难以获得各种条件下的数据。仿真分析的方式尽管可以获得大量的数据,但缺少必要的

检验验证。

因此,在实际的研究中需要有机结合这几种方式,首先通过实验室和外场测量获得目标表面材料的大量 BRDF 数据,进而对这些数据进行 BRDF 模型参数拟合和优化,得到各种材料的 BRDF 模型参数,再结合空间目标几何建模技术,理论计算复杂空间目标静态的和在轨动态的光学散射特性。同时开展真实空间目标、全尺寸模型和缩比模型 OCS 及 LRCS 的测量工作,将测量数据与仿真数据相互对比和分析,寻求全尺寸模型和缩比模型的散射特性与几何缩比因子的内在联系,促进仿真计算与实验测量的精度提高,预估和修正真实空间目标的光学散射特性。

2 研究进展

2.1 卫星表面材料 BRDF 测量与建模方面

关于卫星表面材料的光学散射特性,主要有两类研究方式:一是将表面材料视为漫反射朗伯面,用漫反射率来表征;二是利用 BRDF 来表征。前一种相对简单,但与实际情况相差较大;后一种虽然比较复杂,但可以精确反映材料与目标的散射特性,因此得到越来越多的应用。国内外用于卫星表面材料方面的比较典型的 BRDF 模型主要有以下几项。

(1) Maxwell Beard 模型^[4],表达式为:

$$f_r = \frac{R(\alpha)\rho_\pi \cos^2 \theta_N}{R(0)\cos\theta \cos\theta_t} \left[\frac{1 + \theta_N}{1 + \frac{\theta_N}{\Omega} e^{-2\omega/\tau}} \right] + \rho_d + \frac{2\rho_v}{\cos\theta + \cos\theta_t} \quad (4)$$

式中: ρ_d 为 BRDF 的漫反射分量; ρ_v 为 BRDF 的体散射分量; θ_N 为小面元法线与粗糙平面法线之间的夹角; Ω 和 τ 是遮蔽和掩饰函数的参数; ρ_π 是上层表面的反射分量。该模型描述了涂漆层的 BRDF,假设上层表面反射是极化的,下层表面反射是去极化的。式中第一项表示上层表面的反射系数,第二项表示理想漫反射分量,第三项表示体散射分量。

(2) Davies BRDF 模型^[5],表达式为:

$$f_r = \frac{132\rho}{\pi \cos\theta} \exp\left[-\left(4\pi \frac{\sigma}{\lambda} \cos\theta\right)^2\right] + \frac{\rho}{\cos\theta \cos\theta_t} \pi^3 (\cos\theta + \cos\theta_t)^4 \left(\frac{a}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{\sigma}{\lambda}\right)^2 \cdot \exp\left[-\left(\frac{\pi a}{\lambda}\right)^2 (\sin^2\theta + \sin^2\theta_t + 2\sin\theta \sin\theta_t \cos(\varphi_1 - \varphi_2))\right] \quad (5)$$

式中:第一项为电磁波项; ρ 为方向半球反射率; λ 为波长; σ 为表面粗糙度均方根; a 为表面自相关长度。该模型假定目标表面起伏高度符合高斯分布,适用条件是 $\sigma/(\cos\theta) < 0.2$ 且 $\sigma/\lambda < 2$,入射角大于 2° 。

(3) Torrance-Sparrow 模型^[6],表达式为:

$$f_r = gR(2\beta, \hat{n}) \frac{G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{4\cos\theta_t} \exp(-c^2\alpha^2) + \frac{\rho_0}{\pi} \cos\theta \quad (6)$$

式中:第一项代表镜反射分量;第二项表示漫反射分量; $R(2\beta, \hat{n})$ 为非涅耳反射函数; $G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为遮蔽函数;指数项 $\exp(-c^2\alpha^2)$ 为斜率分布函数,是表征粗糙度统计特性的特征函数。该模型假设表面由小面元组成,小面元的法线方向呈高斯分布,并且小面元反射遵循非涅耳关系。模型适用条件是材料表面高度均方根远远大于波长。

(4) 五参数半经验统计模型^[7],表达式为:

$$f_r = k_b \frac{k_r^2 \cos\alpha}{1 + (k_r^2 - 1)\cos\alpha} G(\theta_i, \theta_r, \varphi_i) \cdot \frac{\exp[b(1 - \cos\gamma)^a]}{\cos\theta \cos\theta_t} + \frac{k_d}{\cos\theta} \quad (7)$$

式中: $\cos^2\gamma = (\cos\theta_i \cos\theta_r + \sin\theta_i \sin\theta_r \cos\varphi_i)/2$; $\cos\alpha = (\cos\theta_i + \cos\theta_r)/2\cos\gamma$; 指数项为表征粗糙度统计特性的特征函数; k_b 、 k_d 、 k_r 、 a 、 b 为五个待定系数,其中 k_b 为镜面反射系数, k_d 为漫反射系数。该模型是西安电子科技大学吴振森等人对 Torrance Sparrow 模型进行的修正,将粗糙表面的高度起伏分布和斜率分布推广到非高斯分布的一般情况。

(5) Sun BRDF 模型^[8],表达式为:

$$f_r = \frac{\bar{F}V(\theta)V(\theta_t)}{16\pi\sigma^2 \cos\theta \cos\theta_t \cos^4\theta_h} \exp\left(-\frac{\tan^2\theta_h}{\sigma^2}\right) \quad (8)$$

式中: \bar{F} 为非涅耳反射函数; $V(\theta)$ 为遮挡因子函数; σ 为材料表面均方根粗糙度; θ_h 为微面元法线与表面平均法线之间的夹角。该模型由美国 Purdue 大学的 Sun Yinlong 于 2007 年提出,是基于微面元高斯分布统计概率而建立的,可以很好地匹配光滑表面和粗糙表面。

(6) 四参数单站 BRDF 模型^[9],表达式为:

$$f_r = \frac{A}{\cos^6\theta} \cdot \exp\left(-\frac{\tan^2\theta}{s^2}\right) + B\cos^m(\theta) \quad (9)$$

式中: θ 为入射角,即入射方向与材质面元法向矢量的夹角; A 、 B 、 s 、 m 为待定系数,其中 s 为镜面反射系数, $s < 1$; m 为漫反射系数; A 、 B 分别为镜面反射和漫

反射幅度分量。该模型由瑞典国防研究院的 Ove Steinvall 于 2000 年提出,经大量实验表明该模型能够很好地描述许多不同类型材质的单站散射特性。

(7) Phong 模型^[10],表达式为:

$$I = k_a I_a + k_d I_i \cos \theta + k_s I_i \cos^n \alpha \quad (10)$$

式中: I 为目标表面在视线方向上的光亮度; I_a 和 I_i 分别为环境光和入射光亮度; k_a 为表面对环境光的漫反射系数; k_d 为对入射光的漫反射系数; k_s 为镜向反射系数; θ 为入射角; α 为镜反射方向和视线之间的夹角; n 为镜向指数。

上述各 BRDF 模型中,第(1)~(5)项主要用于研究太阳光照射条件下的目标散射情况以及激光单站、双站探测的情况,但表达式复杂,精确地材质模型参数获取比较困难;第(6)项适合于激光单站探测的情况,针对性较强,不适合描述目标的可见光散射特性;第(7)项并没有实际的物理意义,主要是作为光照模型被计算机图形学广泛使用。

西安电子科技大学相关研究人员在军事目标的可见光和激光散射特性领域开展了大量理论分析与实验测量研究,利用 BRDF 五参数半经验统计模型,对一些典型目标(如飞机、坦克、导弹、卫星等)表面材料样片的 BRDF 进行了不同光谱段的实验测量和模型参数拟合,分析了目标的光学散射特性。

北京航空航天大学相关研究人员采用五参数统计模型对空间目标表面材料在 400~2 500 nm 的光谱 BRDF 进行了实验室测量,应用模拟退火算法获得了各波长对应的 BRDF 模型参数,并获得了任意入射角和散射角的光谱 BRDF 随波长的变化规律^[11]。

西安工程大学相关研究人员进行了波长为 808 nm 时的卫星硅和砷化镓太阳能电池板光学散射特性的实验测试^[12],采用指数分布的 BRDF 模型,利用遗传模拟退火算法得到了优化参数后的 BRDF 模型。他们还在可见光波段对表面包覆材料和白漆进行了测量,通过谱积分预处理,结合五参数统计模型,获取了样片的 BRDF 模型参数和三维空间 BRDF 分布^[13]。

中国科学院软件研究所相关研究人员开发了卫星表面光学反射特性仿真软件,利用 Maya 软件进行几何建模、对卫星表面分别使用漫反射和 Torrance-Sparrow BRDF 模型进行了仿真实验,结果表明 BRDF 模型比漫反射模型更能使成像效果逼真和准确^[14]。

中国科学院安徽光学精密机械研究所相关人员

多角度测量了卫星材质样片和卫星缩比模型的可见光特性和偏振特性^[15-16],分析了空间目标可见光特性、偏振特性及其变化机理。他们还测量了空间目标常用材料的反射率细分光谱特性,选择出了用于地基空间目标光学探测的最佳波段。中国工程物理研究院相关人员搭建了 BRDF 光谱特性和激光散射特性测量平台,对空间目标几种典型热控涂层的反射率进行了实验测量^[17]。结果表明在入射角为 0°时 SR107 白漆涂层的反射率为 0.785;OSR、F46 和聚酰亚胺薄膜对 532 nm 激光的反射率均大于 90%。

美国国防部建立了一个卫星光学特性数据库,由新墨西哥州科特兰空军基地的卫星评估中心 SAC 负责管理和维护^[18]。库中不同型号卫星表面材质的反射率数据是通过多年实验室测量得到的。SAC 采用 BRDF 来描述目标散射特性,每种材质都对应 2 种 BRDF 模型参数,即 Maxwell Beard 模型参数和 Phong 模型参数。前者与实际情况较为吻合,但表达式相对复杂;后者表达式相对简单,但不够精确。

美国空军研究实验室(AFRL)的高级跟踪时域分析仿真软件 TASAT,能够高精度仿真分析光电探测系统和动能武器对卫星、导弹等目标进行主、被动光电跟踪和成像的过程^[19]。TASAT 使用了卫星评估中心的卫星光学特性数据库,采用 Maxwell-Beard 模型来表征卫星表面材质的激光散射特性。波音公司开发的卫星可视化和信号仿真工具 SVST,有一个通过实际测量得到的材质 BRDF 参数数据库^[20]。利用 SVST 能够预测在轨空间目标材质光学特性,根据校正过的空间目标外场实测图像来反演目标材质的 BRDF 参数。

美国应用技术公司相关研究人员提出了空间目标“BRDF 图像”的概念、定义和实验测量途径,研究了 BRDF 图像处理方法和基于图像的复杂目标 OCS 计算方法^[21]。他们和 AFRL 的相关人员利用宽波段光谱-偏振 BRDF 测量系统测量了从 350 nm 到 2 500 nm 的卫星表面材料(铝板、电池片和包覆材料等)的偏振 BRDF 特性,分析了材料样片在不同波长时的 OCS,并提出了根据光谱 BRDF 数据判断卫星在轨姿态的方法^[22]。

加拿大皇家军事学院和国防研发中心相关研究人员在实验室环境下测量了小卫星工程模型的 BRDF 特性^[23],为预估真实小卫星在轨状态奠定基础。他们

研究了五个面均贴有太阳能电池片的长方体小卫星在不同的姿态、入射角和波长等情况下的光谱反射率因子,实验结果表明了该小卫星主要是一个镜面反射体。

2.2 卫星可见光散射特性测量与仿真计算方面

哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心相关研究人员采用了 Davies BRDF 模型对空间目标材质进行实验测量,根据给定的目标参数,基于计算几何的面元网格化思想,建立了空间目标几何结构、面元网格划分、遮挡和照度计算的数学模型,仿真研究了目标的可见光和紫外动态特性^[24-27]。结果表明:虽然卫星太阳帆板反射率比卫星主体低,但由于其面积大,在某一观测角度下在探测系统处产生的辐照度值与卫星本体接近。另外,空间目标的可见光和紫外特性不仅与太阳、地球和目标三者之间的实时位置有关,还与其几何形状、表面材料等有关。通过将计算结果分别与解析法计算结果和试验测量结果进行比较,表明面元网格化的计算精度优于解析方法,满足工程应用的要求。

他们还基于高次余弦散射分布分析了目标的可见光散射特性^[28],其函数表达式为 $I_n = I_0 \cos^n \theta$,其中 θ 为固定偏移散射角, n 为高次余弦散射分布指数, I_0 为镜反射方向的光强, I_n 为与镜反射方向成 θ 角方向的光强。研究中认为卫星表面近似服从三次余弦散射分布。他们还实验测量了卫星表面三种常用材料典型角度的 BRDF,采用改进了的 Sun BRDF 模型仿真计算了在轨卫星在不同时刻的可见光反射特性^[29]。

另外,他们还研究了目标特性计算模型校验方法。通过构建目标光学特性实验测量系统,采集目标三种表面材料与缩比模型在不同条件下的光学特性数据,建立了基于实验测量数据的校验算法,对表面材料、目标组成结构和目标整体的光学特性计算模型参数进行分步校验^[30]。结果表明校验后的目标特性计算结果与实验结果在统计意义上趋近一致。

北京航空航天大学相关研究人员进行了深空背景下空间目标红外、紫外及可见光特性的仿真分析^[31-33]。其中在研究紫外特性时采用了忽略电磁波项的 Davies BRDF 模型。他们建立了不同目标卫星的三维模型,基于有限元的思想对目标表面进行区域分解和网格划分,分别提出了卫星在探测器入瞳处的红外、紫外和可见光辐照度分布随时间变化情

况的计算方法和步骤。结果表明空间目标各种散射特性与目标几何结构、在轨姿态以及位置有关,且目标的可见光、红外和紫外特性均具有较强的方向性。

解放军信息工程大学相关研究人员利用一体化建模方法 M-GBML,针对复杂空间目标的精细几何模型,采用了材料光散射经验模型,即不包含环境光项的 Phong 模型,推导出了利用有效入射截面积和平均反射率表示的复杂目标可见光散射模型,研究了基于计算机图形学精确计算目标有效入射截面与平均反射率的方法^[34]。通过仿真实验计算了目标的辐照度变化情况,将结果与 STK 软件的计算结果相比对,验证了复杂目标的实际建模效果以及光散射模型的正确性。

西安电子科技大学相关研究人员实验测量了某种卫星包覆材料和太阳能电池板样片在可见光波段的光谱 BRDF,采用了五参数半经验统计模型,将样片的光谱 BRDF 对可见光波段内的太阳谱辐射照度加权平均,获得了目标样片表面的平均 BRDF,利用遗传算法建立了统计模型,计算了给定太阳入射角下的卫星可见光散射强度空间分布情况^[35]。

电子工程学院相关研究人员利用测量的卫星包覆材料和太阳电池帆板表面的光谱 BRDF,根据加权平均公式得到目标样片表面可见光 BRDF 值在上半球空间的三维分布^[36]。在此基础上建立了卫星几何模型,分别在漫反射和非漫反射两种条件下计算了卫星可见光散射强度的空间分布情况。

美国 Sandia 国家实验室相关人员研究了低轨微小卫星的光学散射特性^[2]。他们推导了球体和立方体在表面材料不同特性时 OCS 的计算公式,根据 6 种材料的实测 BRDF 数据计算了形状和表面材料不同的真实微小卫星的 OCS,在此基础上研究了地基光学观测系统的设计指标和搜索策略。

美国空军理工大学相关人员仿真分析了白天光学探测空间目标应用背景下的目标特性^[37],利用 Matlab 构造了铱星三维模型,基于 STK 获得目标、太阳与探测系统之间的实时相对位置关系,根据空军研究实验室的材质 BRDF 模型参数,仿真计算了铱星的辐照度和信噪比随时间变化情况,重点分析了白天和夜间条件下铱星成像闪光的程度及其影响因素,包括镜面发射特性较强的表面材质、大气衰减、探测波段等。

美国空军学院相关人员开展了根据卫星反射可见光强度曲线随时间或太阳相位角变化情况判断目标形状的研究^[38],采用了 Cook-Torrance BRDF 模型,仿真分析了多个地面光学测量站的布站方式以获得最佳的目标外形判定结果。他们还改进了由空军实验室开发的卫星光亮度特性仿真软件,建立了比简单几何体更为复杂的卫星三维模型,并仿真了地基可见光传感器对在轨运动卫星的探测情况^[39]。

波音公司相关人员研究了多波段光学观测时空间目标光学特性^[40],以一个立方体卫星为目标,其六个面分别为不同的材料,包括铝合金、太阳能电池、隔热涂层、聚脂薄膜等,根据 TASAT 数据库中各材料的 Maxwell Beard BRDF 模型参数,仿真分析了实验室目标旋转运动和地基光学观测卫星在轨运动两种条件下的目标卫星 RCS 随时间的变化情况。

分析图形公司 AGI 在 9.2.1 版本的卫星仿真工具包 STK 中,新增了由太空动力学实验室开发的光电红外 EOIR 模块^[41]。EOIR 覆盖了从紫外到红外的波段,能够设定导弹、卫星等军事目标材质和形状参数,仿真多种平台光电有效载荷的探测、跟踪与成像性能。EOIR 采用了不依赖于波长的四参数 BRDF 模型,目前能够模拟 28 种目标表面材质,并能输出仿真时段内空间目标和背景的辐亮度/辐照度、信噪比、等效噪声辐照度/辐亮度等参数随时间变化的报告和图表。

2.3 卫星 LRCS 测量与仿真计算方面

西安电子科技大学和安徽光学精密机械研究所相关人员提出了一种覆盖多种材料的复杂目标的 LRCS 可视化计算方法^[42],使用颜色标签建立含材料信息的目标模型,通过标签计算目标的单站和双站 LRCS。他们利用五参数统计模型,计算了由平板和长方体构成的空间目标在入射激光波长分别为 808 nm 和 905 nm 时的 LRCS^[43]。表面材质有三种,当天顶角为 30°,方位角从 0°变化到 360°过程中,波长为 808 nm 时目标后向 LRCS 的变化范围为 0.1 m² 到 0.5 m²,波长为 905 nm 时目标后向 LRCS 的变化范围为 0.08 m² 到 0.33 m²。

航天科工集团二院 207 所建立了目标与环境光学重点实验室,具有高精度红外成像动态测量系统及外场激光散射测量系统,开展了外场全尺寸目标单站和双站激光散射特性的研究。上海航天科技集团

八院 802 所相关人员采用 BRDF 五参数统计模型,计算了某典型形状的卫星在激光波长为 800 nm 时的 LRCS 概率分布情况,其中 LRCS 最大值为 40 dBm²,并对方位角从 0°变化到 360°时白漆样品 LRCS 和目标 LRCS 的仿真计算结果与测量数据进行了对比,结果比较吻合,反映出目标具有很强的镜面反射特性^[44]。

装备学院相关研究人员采用了四参数单站 BRDF 模型,提出了一种基于 OpenGL 的空间目标 LRCS 可视化计算方法^[45-46],仿真计算了不同卫星在不同姿态下的 LRCS 值。研究结果表明目标 LRCS 值随着姿态的变化也发生了显著的变化。由于目标外形结构具有一定的对称性,相应地 LRCS 变化曲线也呈对称性。总体来说,目标卫星的 LRCS 为 1~200 m²,最大值比最小值大 2 个数量级左右,在进行激光探测系统指标参数设计时,应当考虑目标 LRCS 的变化范围。

美国洛克希德-马丁公司开发了高级激光雷达信号仿真工具 ALASS,采用 BRDF 和 LRCS 描述包括卫星、飞机、轮船等在内的目标表面材料的激光散射特性^[47]。对于 1 个半径 1 m 的球体,理论计算的 LRCS 值为 8.38 m²,ALASS 的计算值为 8.42 m²。美国 Nukove 公司的相关研究人员研究了地基激光主动探测空间目标过程中卫星主动光学散射截面的估计方法^[48],将卫星视为理想漫反射朗伯体,LRCS 计算公式为 $\rho \cdot A / \pi$,其中 ρ 为卫星表面材料的漫反射率, A 为卫星在垂直于视轴方向上的有效面积。在实际研究中卫星表面材料漫反射率取值为 0.2。

3 发展方向

纵观空间目标光学特性研究发展趋势,在研究波段范围上,由可见光、红外特性研究向激光、紫外和偏振特性等多波段覆盖、多光谱融合的方向发展;在目标特性信息获取方式上,由可见光、红外等被动探测向包含激光雷达在内的主被动复合探测的方向发展;在计算方法上,由简化的漫反射朗伯体向高精度 BRDF 建模的方向发展;在研究途径上,由单独的外场、实验测量或理论分析等方式向测量、仿真计算、结果检验验证有机结合的方向发展。而最终建立工程实用化的空间目标光学特性数据库则是必然趋势。

世界军事强国特别是美国对目标与环境光学特

性测量与研究极为重视,先后采用地基、空基、天基等多种技术途径,建立了复杂的光学特性测量体系,获得了大量的试验数据,已经建立了比较权威的空间目标光学特性数据库,并开发了多个仿真软件来分析、反演目标的光学特性。空军毛伊岛光学观测站 AMOS 在美国地基光学特性测量技术领域最具代表性,既能完成从低轨到地球同步轨道的空间目标观测,还可在雷达引导下对处于飞行中段的导弹、火箭和处于大气层内的飞机、导弹模拟靶标等目标进行跟踪测量。天基(箭载、弹载和星载)光学特性测量系统能够对卫星和导弹、诱饵和假目标等进行测试。整体来说,美国的空间目标光学特性测量技术具有传感器配置庞杂、探测波段分类细、覆盖范围宽的发展特点。俄罗斯也研制了世界先进水平的光电与环境测量系统,在动态、静态测量、理论计算等方面形成了完整的体系,建立了各种国内外空间目标模型和环境特性数据库,具有很强的工程实用性。

我国多年来逐步加强对空间目标监视系统的研制与开发,发展了一定的空间目标光学测量手段,目标范围主要集中在低轨道上。目前已经建立了目标与环境光学特性地面测量系统和机载测量系统,全尺寸目标激光 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $10.6\ \mu\text{m}$ 散射测量系统和目标缩比模型散射特性模拟研究实验室,初步建立了目标与环境光学特性数据库。在空间目标光学散射特性仿真分析方面,之前大都将目标视为由几种典型形状组成的漫反射朗伯体,近几年来逐渐采用了 BRDF 模型,根据表面材料测量数据进行 BRDF 参量拟合。

在空间目标光学散射特性研究领域,当前面临的困难问题之一是目标表面材料 BRDF 的建模与参量优化。目前还没有一个得到公认的 BRDF 模型,各家单位采用不同的 BRDF 模型进行计算分析,计算方法和得到的结论各有不同,不便于对各自的研究成果进行比对和评判。在目标特性实验室测量和仿真计算方面,针对空间目标缩比模型开展光学散射特性测量的研究还不多,仿真计算结果也缺乏必要的检验和验证。

下一步的主要研究方向包括:(1) 研究思路应兼顾科研性和工程性,在兼顾计算速度和计算精度的基础上,提出或选用合适的 BRDF 模型并进行推广和应用,以预估真实在轨复杂空间目标的光学特性,

为空间目标探测系统性能分析和关键技术验证提供必要的数据源;(2) 国内在空间目标可见光特性研究方面比较深入,下一步主要是结合外场实际测量数据来检验、验证理论计算模型和分析结果,提高研究成果的准确度和可信度;(3) 在目标的单站激光散射特性研究方面,目前的工作主要集中在激光波段材料 BRDF 测量、LRCS 理论计算方面,在缩比模型和全尺寸目标 LRCS 测量方面开展的研究还比较少。随着器件水平和激光雷达技术的发展,复杂空间目标的单站激光散射特性将是需要深入研究的重点和热点问题之一。(4) 需要深入分析空间目标光学特性的特征融合方法,研究目标光学特征在目标识别领域的应用途径与方法。如何根据在轨卫星的光谱 OCS、LRCS 和亮度等参数的实时变化情况,并结合测轨数据等参考信息,来综合判断未知卫星表面的材质组成、姿态和卫星的类型,是下一步成果转化应用过程中将要面临的难点问题。总的来说,只有通过国内各家单位取长补短、资源整合、数据共享等方式,才能加快推进空间目标光学散射特性研究,完成目标光学特性数据库的建立与工程实用化,追赶国外先进水平。

4 结 论

空间目标的光学散射特性研究在目标光学监视系统设计与开发过程中具有重要的应用价值。文中综述了空间目标光学散射特性的基本研究内容和方法,从卫星表面材料 BRDF 建模、空间目标可见光散射特性测量与仿真计算、目标 LRCS 测量与仿真计算三个方面,介绍了国内外典型研究单位的研究成果以及下一步的研究发展方向,包括选用或提出合适的 BRDF 模型并进行推广和应用、结合实际测量数据来校验理论计算模型、开展空间目标缩比模型和全尺寸目标 LRCS 的外场测试、深入研究空间目标光学特性在目标识别领域的应用途径和方法等。文中可为空间目标光学散射特性研究思路与方法提供借鉴。

参考文献:

- [1] Dai Yongjiang. Laser Radar Technology[M]. Beijing: Publish House of Electronics Industry, 2010: 409-412. (in Chinese)
- [2] Mark Ackermann, John McGraw, Jeffrey Martion, et al.

- Blind search for micro satellites in LEO: optical signatures and search strategies[C]//AMOS, 2003: 1-24.
- [3] Xu Genxing. Optical Characteristics of Target and Environment [M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 1995: 280-281. (in Chinese)
- [4] Maxwell J R, Beard J, Weiner S, et al. Bidirectional reflectance model validation and utilization[R]. Ann Arbor: Environmental Research Institute of Michigan, 1973: 10-35.
- [5] Shen Y J, Zhang Z M, Tsai B K. Bidirectional reflectance distribution function of rough silicon wafers[J]. International Journal of Thermophysics, 2001, 22(4): 1311-1326.
- [6] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces [J]. Journal of the Optical Society of America, 1967, 57(9): 1105-1114.
- [7] Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinhua, et al. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(8): 897-901. (in Chinese)
- [8] Sun Yinlong. Statistical ray method for deriving reflection models of rough surfaces [J]. Journal of the Optical Society of America, 2007, 24(3): 1105-1114.
- [9] Ove Steinvall. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections[J]. Applied Optics, 2000, 39(24): 4381-4391.
- [10] Bui Tuong Phong. Illumination for computer generated pictures[J]. Communications of ACM, 1975, 18(6): 311-317.
- [11] Yuan Yan, Sun Chengming, Zhang Xiubao. Measuring and modeling the spectral bidirectional reflection distribution function of space target's surface material [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(3): 2097-2103. (in Chinese)
- [12] Wang Anxiang, Li Ping, Zeng Zhenchao. Experiment measurements on scattering characteristic of solar panels for satellite [J]. Basic Science Journal of Textile Universities, 2007, 20(3): 294-297. (in Chinese)
- [13] Wang Anxiang, Zhang Hanlu, Wu Zhensen, et al. Experiment measurements and optimal modeling of goal surface' visible spectrum BRDF [J]. Optical Technique, 2008, 34(5): 655-658. (in Chinese)
- [14] Zhang Yi, Zheng Changwen, Wu Jiaye. Research on modeling and simulation of satellite surface optical reflection characteristics[J]. Computer Simulation, 2010, 27(9): 57-61. (in Chinese)
- [15] Li Yanan, Sun Xiaobing, Qiao Yanli, et al. Experiment of optical characteristic simulation of space target [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 895-900. (in Chinese)
- [16] Li Yanan, Sun Xiaobing, Qiao Yanli, et al. Photopolarimetric characteristic of space target[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(7): 24-29. (in Chinese)
- [17] Lu Daju, Wan Min, Yang Rui, et al. Reflectivity of measurement of spatial target's surface material [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(8): 1383-1386. (in Chinese)
- [18] Kennedy P K, Keppler K S, Thomas R J, et al. Validation and verification of the Laser Range Safety Tool (LRST)[C]//SPIE, 2003, 4953: 143-153.
- [19] Bush K, Crockett G A, Barnard C. Satellite discrimination from active and passive polarization signatures: simulation predictions using the TASAT satellite model[C]//SPIE, 2002, 4481: 46-57.
- [20] Crockett G A, Brunson R L. Visualization tool for advanced laser system development[C]//SPIE, 2002, 4724: 69-77.
- [21] David Welles, David Bowers. Laboratory imaging of satellites and orbital appearance estimation [C]//Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), 2007: 1-12.
- [22] David Bowers, David Welles. Broadband spectral-polarimetric BRDF scan system and data for spacecraft materials[C]//AMOS, 2011: 1-9.
- [23] Major Donald Bédard, Martin Lévesque, Brad Wallace. Measurement of the photometric and spectral BRDF of small Canadian satellites in a controlled environment [C]//AMOS, 2011: 1-10.
- [24] Sun Chengming, Zhang Wei, Wang Zhile. Application of BRDF for modeling on the visible reflection characteristics of spatial targets[J]. Optical Technique, 2008, 34(5): 750-757. (in Chinese)
- [25] Zhang Wei, Wang Hongyuan, Wang Zhile, et al. Modeling method for visible scattering properties of space target [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(12): 2462-2467. (in Chinese)
- [26] Wang Hongyuan, Zhang Wei, Wang Zhile. Ultraviolet dynamic characteristics of space satellites based on bidirectional reflection distribution function[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(3): 410-416. (in Chinese)
- [27] Bao Wenzhuo, Cong Mingyu, Zhang Wei, et al. An optical characteristics calculating method based on surface mesh-creation for space targets [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(5): 710-715. (in Chinese)
- [28] Wang Hongyuan, Zhang Wei, Wang Zhile. Visible characteristics of space satellite based on Nth cosine scattering distribution [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 593-598. (in Chinese)

- [29] Wang Fugang, Zhang Wei, Wang Hongyuan. Reflection characteristics of on-orbit satellite based on bidirectional reflectance distribution function[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(9): 6-12. (in Chinese)
- [30] Bao Wenzhuo, Cong Mingyu, Zhang Wei, et al. A verification and validation method for calculation model of space target characteristics used for short range optical navigation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2249-2256. (in Chinese)
- [31] Sun Chengming, Yuan Yan, Zhang Xiubao. Modeling of infrared characteristics of deep space target [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(10): 7523-7530. (in Chinese)
- [32] Yuan Yan, Sun Chengming, Zhang Xiubao, et al. Analysis of influence of attitude variation on visible characteristics of space target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2748-2752. (in Chinese)
- [33] Yuan Yan, Sun Chengming, Huang Fengzhen, et al. Modeling of ultraviolet characteristics of deep space target[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(8): 0895011-8. (in Chinese)
- [34] Lan Chaozhen. Modeling and detecting capability analysis of space-based space object optical observation system [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2009: 49-72. (in Chinese)
- [35] Cao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu, et al. Research on visible light scattering of spatial targets based on spectral BRDF of target samples [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(11): 2264-2268. (in Chinese)
- [36] Yang Ming, Han Lei, Wu Xiaodi, et al. Visible light scattering of satellite based on bidirectional reflectance distribution function [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 11, 112901: 1-5. (in Chinese)
- [37] Funge, Alistair D. Daytime detection of space objects [D]. Air Force Institute of Technology, 2005: 1-65.
- [38] Daniel Fulcoy, Katharine Kalamaroff, Francis Chun. Optimizing site locations for determining shape from photometric light curves[C]//AMOS, 2009: 1-11.
- [39] Cody Singletary, Francis Chun. Simulating complex satellite and a space-based surveillance sensor simulation[C]//AMOS, 2009: 1-10.
- [40] Doyle Hall. Surface Material Characterization from Multi-band Optical Observations[C]//AMOS, 2010: 1-15.
- [41] <https://www.agi.com>
- [42] Li Liangchao, Wu Zhensen, Guo Lixin. Study of LRCS of a multi-material coated complex object [J]. *Journal of Xidian University*, 2006, 33(2): 211-214. (in Chinese)
- [43] Zhang Geng, Wu Zhensen, Jin Yan, et al. Calculation of space object LRCS [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007, 22(S): 83-85. (in Chinese)
- [44] Gu Jun, Wang Xiaobing, Dai Fei. A study on theoretical modeling of LRCS of targets based on BRDF data [C]// IEEE Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference, 2011: 1165-1168.
- [45] Han Yi, Sun Huayan, Li Yingchun, et al. Simulation of space object laser radar cross section[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 819-823. (in Chinese)
- [46] Sun Huayan, Han Yi. Research of space object active detection ladar system imaging simulation [C]//SPIE, 2009, 7651(0D):1-7.
- [47] Jacob D, Gatt P, Nichols T. Overview of LMCT's advanced ladar signal simulator (ALASS)[C]//SPIE, 2008, 6950(0L): 1-12.
- [48] Lukesh G, Chandler S, Voelz D. Analysis of satellite laser optical cross sections from the active imaging testbed [C]// SPIE, 2002, 4538: 24-33.