

## 典型 GEO 卫星部件光谱散射特性反演方法

徐融<sup>1,2</sup>, 赵飞<sup>1</sup>

(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:** 由整星混合光谱反演卫星特征的核心在于数理模型及反演算法, 基于此建立了光谱混合数理模型并进行了实验验证。首先, 对部件光谱散射模型、线性光谱混合模型、整星光谱解混方法进行了理论分析; 然后, 设计实验定标测量了高保真 GEO 卫星模型及部件的光谱 BRDF 特性, 讨论了部件和材料光谱散射特性的差别; 最后, 采用非负约束最小二乘法对卫星整体光谱进行了解混分析, 最大相对残差小于 10%。实验结果表明, 线性光谱混合模型及非负约束最小二乘解混方法对于描述卫星光谱混合机理、反演卫星状态具有一定实用意义。

**关键词:** 卫星部件; 光谱 BRDF; 线性光谱混合; 非负约束最小二乘; 光谱解混

**中图分类号:** V556.5      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S123001

## Spectral scattering inversion method of GEO satellite components

Xu Rong<sup>1,2</sup>, Zhao Fei<sup>1</sup>

(1. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The core of the satellite characteristics inversion based on mixed satellite spectra is the mathematical model and inversion algorithm. Theoretical model of spectral mixing was built with experiments conducted to justify the model. First, theoretical analysis of components' spectral scattering model, linear spectral mixing model and unmixing methods of satellite's spectral data was conducted. Then, experiments were designed to measure and calibrate the spectral BRDF of a high-fidelity GEO satellite and its components, while the spectral scattering characteristics of component and material were discussed. Finally, nonnegative constrained least square methods were utilized to unmix the satellite's spectral data, with the largest relative residue less than 10%. Experiment results show that the linear spectral mixing model and nonnegative constrained least square unmixing methods have practical meaning in explaining spectral data of satellites and inversing satellite conditions.

**Key words:** satellite components; spectral BRDF; linear spectral mixing;  
non-negative constrained least square; spectral unmixing

收稿日期: 2016-02-17; 修订日期: 2016-03-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(7042015aa6604)

作者简介: 徐融(1991-), 男, 硕士生, 主要从事空间目标光谱探测与识别方面的研究。Email: xurong@aoe.ac.cn

导师简介: 赵飞(1978-), 男, 硕士生导师, 博士, 主要从事空间目标光学探测与识别、光学天文技术与方法方面的研究。

Email: zhaofei@aoe.ac.cn

## 0 引言

空间目标本身不发光,其亮度来自于反射太阳光、地球和月球返照的太阳光及其他星光,其中太阳光直射占主导地位。在探测距离远、成像困难的情况下(如 GEO 卫星),空间目标表现为非分辨点目标,只能测量其光度光谱特性<sup>[1]</sup>。研究目标混合光谱中不同材料光谱的组分变化规律,解混反演目标的外形结构和在轨姿态,可为目标探查、目标编目、空间维护等空间任务的开展提供依据<sup>[2]</sup>。

卫星是最常见的空间目标。受其材料、结构、观测几何等因素共同作用,卫星光度光谱总是处于动态变化之中,直接研究其变化规律十分困难。一个卫星由多个部件组成,反演卫星状态的关键在于感知其上各部件的大小、结构、方向等信息。前人已进行了大量工作。由 Nicodemus 在 1970 年提出的双向反射分布函数(bidirectional reflection distribution function, BRDF)<sup>[3]</sup>,美国已建立庞大的空间目标光谱 BRDF 数据库<sup>[4]</sup>,采用 Maxwell Beard 和 Phong 模型进行描述。加拿大的 Bedard 等人测量了立方工程卫星各面的光谱 BRDF,研究了光谱数据特征,总结了光谱测量的实验流程<sup>[5]</sup>。波音公司研究人员采用一个六个面覆盖不同卫星材料的立方体卫星,仿真测量了旋转和在轨两种情况,并进行反演分析<sup>[6]</sup>。孙成明等人进行实验测量了两种卫星表面材料的光谱 BRDF 特性并尝试反演材料面积<sup>[7]</sup>。

实验发现,因为结构工艺和多种材料的混合影响,航天材料在做成卫星部件之后其散射光谱存在一定变化。以往研究中较多的是统计目标整体光谱变化<sup>[8-9]</sup>或对单一材料进行细致入微的建模<sup>[10-11]</sup>,少有对卫星进行部件化的研究。部件研究相比整星降低了模型复杂度,相比材料又提高了真实性,须通过实验手段加以验证。文中测量并研究了高保真卫星模型及其各典型部件的光谱散射特性,进行了理论建模并运用模型解混反演,所用方法为进一步研究提供参考。

## 1 空间目标光谱散射理论建模

### 1.1 典型部件光谱散射模型

空间目标表面材料光谱散射特性常用光谱

BRDF 模型来描述,然而实际中的卫星及其上部件具有一定的材料混合与结构特性,仅用材料特性难以准确还原其真实的在轨光谱散射特性。例如由于真空放气,卫星包裹的热控聚酯薄膜会产生大量褶皱;真实的太阳帆板表面的半导体材料上密布着大量的金属导线,并以玻璃封装。这些原因使得部件特性有别于其主材料特性,故需整体考虑各部件的光谱散射特性。

部件的光谱散射特性描述可借鉴光谱 BRDF 模型。点目标观测中,目标的结构、尺寸不可分辨,因此可将卫星的各部件平面看作一系列微面元。光谱 BRDF 定义示意图请见图 1,为光辐射在单位面元上反射辐亮度与入射辐照度的比值:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) = \frac{dL_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} \quad (1)$$

则探测器入瞳处的目标反射光通量为:

$$d\Psi_c(\lambda) = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) * dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda) * A_s * \cos\theta_s * d\omega_d \quad (2)$$

式中: $\theta_i, \varphi_i$ 为入射天顶角与方位角; $\theta_s, \varphi_s$ 为散射天顶角与方位角; $\lambda$ 为波长; $dL_s, dE_i$ 为反射辐亮度与入射辐照度; $A_s$ 为目标等效平面; $d\omega_d$ 为探测立体角。

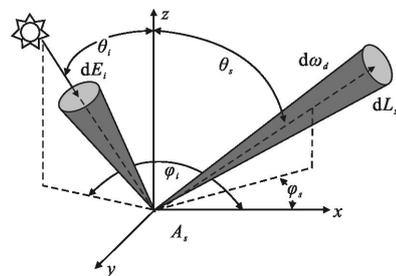


图 1 BRDF 定义示意图

Fig.1 BRDF definition diagram

由光辐射原理可知,当探测距离比辐射源线度尺寸大 10 倍以上时,就可以看成点源。因此在实验室中,虽然十几米外的探测器镜头对一米左右的目标模型所张立体角远大于实际观测中望远镜对数百公里外空间目标张开的立体角,但仍可反映目标辐亮度空间分布。

### 1.2 空间目标线性混合光谱模型

一个完整的航天器由多个部件组成,其光谱散射特性反映为各部件散射光谱的叠加。理想的线性光谱混合模型为探测器入瞳光通量即每个部件在观

测方位上的反射光通量之和。然而由于部件之间的遮挡以及二次反射等非线性因素影响,实际观测得到的整星光谱和部件散射光谱并非完美的线性叠加关系,存在一定的偏差,因此目标光谱混合模型表达式如下。

$$\Psi_{\text{sat}}(\lambda) = \sum_{j=1}^n \Psi_j(\lambda) + \varepsilon(\lambda) \quad (3)$$

式中:  $\Psi_{\text{sat}}(\lambda)$  为目标整体光通量;  $\Psi_j(\lambda)$  为各部件贡献的光通量;  $n$  为部件种类数;  $\varepsilon(\lambda)$  为偏差项。

将公式(2)代入公式(3),整理得:

$$\begin{cases} f_{\text{sat}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) = \sum_{j=1}^n f_j(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) * K_j + \varepsilon'(\lambda) \\ K_j = \frac{E_{\text{sun}}(\theta_{ij}, \varphi_{ij}, \lambda) * A_j * \cos \theta_{ij} * \omega_{ij}}{E_{\text{sun}}(\theta_{j0}, \varphi_{j0}, \lambda) * A_{\text{sat}} * \cos \theta_s * \omega_d} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $K_j$  为部件光谱 BRDF 到目标光谱 BRDF 的合成系数,与入射光方位、部件面积、目标几何构型、探测立体角等因素有关,表达式十分复杂。为进一步简化公式(4),假设部件光谱形状不随入射和反射方位改变,仅幅值发生变化,则有:

$$f_j(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) = f_{0j}(\lambda) * \alpha(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s) \quad (5)$$

式中:  $f_{0j}(\lambda)$  为垂直部件表面测量的光谱 BRDF 值;  $\alpha(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s)$  为归一化调制系数,则:

$$\begin{cases} f_{\text{sat}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) = \sum_{j=1}^m f_{0j}(\lambda) * k_j(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s) + \varepsilon'(\lambda) \\ k_j(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s) = K_j * \alpha(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s) \end{cases} \quad (6)$$

公式(6)为目标光谱 BRDF 的线性混合模型,  $k_j$  为部件垂直测量光谱的混合系数,引入了较多的简化,模型拟合值与测量值的误差用  $\varepsilon'(\lambda)$  表示。

### 1.3 非负约束最小二乘光谱解混

光谱解混的目的在于通过已知的部件光谱数据库和测得的目标光谱计算目标的部件组成,进而反演目标材料、结构、姿态等信息。由混合系数物理意义可知,  $k_j \geq 0$ 。由公式(6)有:

$$f_{\text{sat}} = \sum_{j=1}^n k_j f_j + \varepsilon = Fk + \varepsilon, k_j \geq 0 \quad (7)$$

式中:  $f_{\text{sat}}$  为  $m$  维列向量,即  $m$  个波段上测得的光谱数据;  $F$  为  $m$  行  $n$  列矩阵,表示  $n$  种部件在  $m$  个波段上的光谱;  $k$  为  $n$  维列向量,表示部件光谱混合系数;  $\varepsilon$  为  $m$  维列向量,  $\varepsilon$  表示  $m$  个波段上的数据偏差。

为使残差  $\varepsilon$  最小,求非负约束下最小二乘解:

$$\begin{cases} \min_k \|Fk - f_{\text{sat}}\|_2^2 \\ k \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

定义相对残差  $r$  为残差与测量值之比,描述拟合数据相对测量值的偏差程度:

$$r = \varepsilon / f_{\text{sat}} = 1 - Fk / f_{\text{sat}} \quad (9)$$

## 2 空间目标光谱测量实验方案

### 2.1 测量方案

首先,为对散射模型中目标各入射、散射角度进行测量,需建立天基光照环境模拟系统。空间目标的亮度主要来自对太阳光的反射,其他光源影响很小,故采用大口径太阳模拟器模拟入射太阳光。卫星模型被放置在中央三轴转台上,可绕模型中心旋转到任意姿态。当太阳模拟器发出的平行光照射到卫星模型表面后,可将探测器移动到所需相位角处进行测量,获得目标的光谱辐亮度信息。实验布局见图 2。

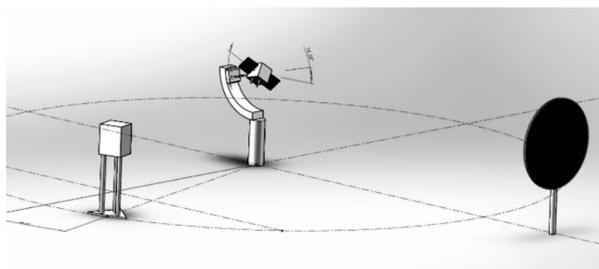


图 2 实验布局示意图

Fig.2 Experiment layout

实验室四周墙壁均涂有黑色消光涂料,转台支架也覆盖有反射率极低的黑绒布,用来模拟宇宙黑背景。经测量,背景辐亮度低于目标亮度 2~4 个数量级。调整探测器测量黑斑视场,使其恰好覆盖目标模型,可最大程度减少背景杂散光的影响。实验中测得的数据视为已经过标准星校正,消除了大气消光及望远镜光学系统的影响,因此不再对大气光学环境进行模拟。

### 2.2 数据定标

实验中探测器可由接收到的光通量计算得到目标的光谱辐亮度信息。为得到反映目标本身光谱反射特性的光谱 BRDF 数据,去除光源、探测器的影响,需进行白板定标。方法是采用相同的光照条件测量目标模型和已知光谱反射率的朗伯体白板的反射光谱辐亮度。将测量结果代入公式(13)可解得光源的光谱辐照度,进一步计算得到目标的光谱 BRDF,过程如下。

由光谱 BRDF 定义公式(1)得:

$$f_{ref}(\theta_i, \varphi_i, \theta_0, \varphi_0, \lambda) = \frac{L_{ref}(\theta_i, \varphi_i, \theta_0, \varphi_0, \lambda)}{E_{sun}(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} \quad (10)$$

$$f_{sat}(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) = \frac{L_{sat}(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda)}{E_{sun}(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} \quad (11)$$

由朗伯体定义得,朗伯体反射面 BRDF 为:

$$f(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) = \frac{\rho(\lambda)}{\pi} \quad (12)$$

将公式(12)代入公式(10)、(11),可求得目标的光谱 BRDF:

$$f_{sat}(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) = \frac{L_{sat}(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) * \rho_{ref}(\lambda)}{L_{ref}(\theta_i, \varphi_i, \theta_0, \varphi_0, \lambda) * \pi} \quad (13)$$

式中: $L_{ref}$ 、 $L_{sat}$  分别为参考白板和卫星的反射光谱辐亮度; $E_{sun}$  为光源光谱辐照度; $f_{ref}$ 、 $f_{sat}$  分别为白板和卫星的光谱 BRDF; $\theta_0$ 、 $\varphi_0$  为垂直测量时的天顶角和方位角; $\lambda$  为波长; $\rho$  为半球光谱反射率。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 典型部件光谱 BRDF 测量与分析

由部件光谱散射模型,利用天基光照环境模拟系统测量典型部件各散射角度下的光谱辐亮度并计算光谱 BRDF。实验中测量并计算了卫星模型 4 种部件表面的光谱 BRDF 特性。方法是保持光源垂直入射部件表面,分光辐射度计的测量黑斑视场始终置于部件区域之内,移动探测器环绕目标测量其光谱辐亮度(为了避免遮挡光源,0°数据用 1°测量代替)。4 种部件测量散射角范围为 0°~90°,在 0°~30°之间按 5°间隔测量,38~60°之间按照 10°间隔测量,每个部件测量数据点数为 13 个,随后测量 1 组参考白板的光谱数据实验设计见表 1。

表 1 部件测量实验设定

Tab.1 Component experiment setup

Component	$\theta_i/(\circ)$	Measuring step/ $(\circ)$	Data num
Multilayer gold	0-90	0:5:30, 40:10:90	13
Silicon panel	0-90	0:5:30, 40:10:90	13
White paint	0-90	0:5:30, 40:10:90	13
Carbon	0-90	0:5:30, 40:10:90	13
Reference board	0	0	1

经白板定标(选取 400~700 nm 谱段,以 10 nm 为间隔定标), $\theta_s=0^\circ$ 时光谱数据见图 3。

由图 3 可见,金色多层包覆膜的光谱 BRDF 远大于其他 3 种材料(约 20 倍),这是由于垂直测量时

金色包覆膜发生了镜面反射。白漆和碳纤维的光谱形状十分平缓,只是幅度高低不同,硅帆板(左高右低)和多层金色膜(左低右高)则有明显特征。

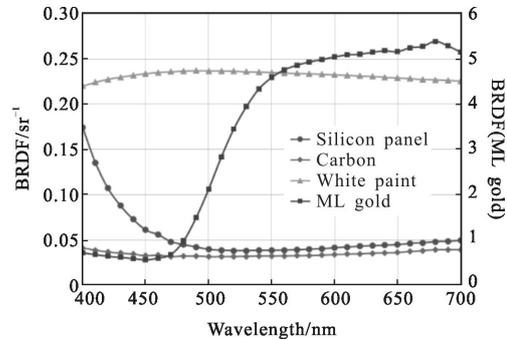


图 3 典型部件光谱 ( $\theta_s=0^\circ$ )

Fig.3 Components' spectra ( $\theta_s=0^\circ$ )

由公式(5),得各部件在峰值处归一化的 BRDF 调制系数,如图 4 所示。图中, a 为调制系数。理想朗伯体 BRDF 在各角度上恒为 1。4 种被测部件中,白漆 BRDF 与理想朗伯体最为接近,碳纤维抛物面天线呈现较弱的镜面反射,总体表现为朗伯体。硅帆板与多层金色膜的镜面反射效应明显,但其半峰宽度仍然大于单一材料的半峰宽度(硅帆板 $<5^\circ$ ,金色膜 $<3^\circ$ )。经分析,这是由于实际部件上的金色包覆层有大量褶皱,帆板上的电池单元也存在装配起伏,使得其整体部件 BRDF 峰值发生展宽,如图 5 所示。其复杂度和差异性决定了部件 BRDF 无法用材料 BRDF 简单代替,有必要对其光谱散射特性进行详细研究。

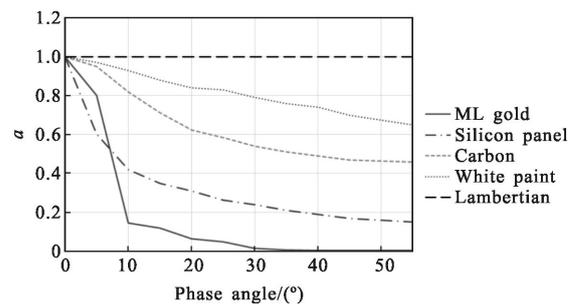


图 4 归一化部件 BRDF

Fig.4 Normalized components' BRDF

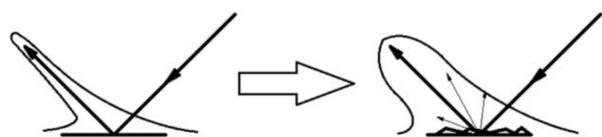


图 5 平整表面与起伏表面的 BRDF

Fig.5 BRDF of smooth surface and fluctuated surface

### 3.2 整星光度光谱解混分析

实验中采用了一颗典型 GEO 轨道通信卫星的高保真模型,长约 1.5 m,按照真实卫星尺寸缩比 6:1 制造,表面覆盖真实航天材料,卫星模型结构如图 6 所示。查阅资料可知一般情况下三轴稳定 GEO 卫星工作姿态为:天线阵列指向地心,两侧帆板分别指向南北方向。帆板可绕本体单轴转动以保持对日定向。

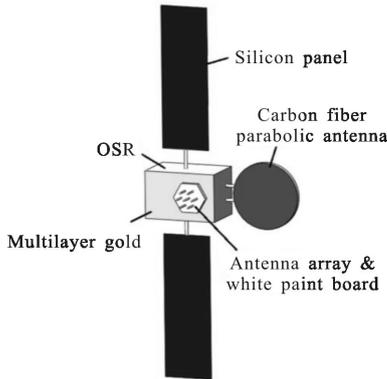


图 6 卫星模型结构示意图

Fig.6 Structure diagram of satellite model

实验中模拟春秋分点的目标光照情况,太阳光照矢量与 GEO 轨道共面。将卫星模型安放在三轴转台上,两侧帆板上下放置,使光源垂直照射帆板,目标本体天线面则相对光源方向转动 5°,偏置固定。

测量时探测器距离目标 12 m,测量视场覆盖整个模型,获取目标整体光谱辐亮度。测量相位角为 0~75°,以 5°步长为间隔,共计 16 个测量点。测量数据按照公式(13)进行白板定标,定标波段取 400~700 nm,10 nm 为步长,共 31 个波段,得到目标混合光谱 BRDF 数据如图 7 所示。

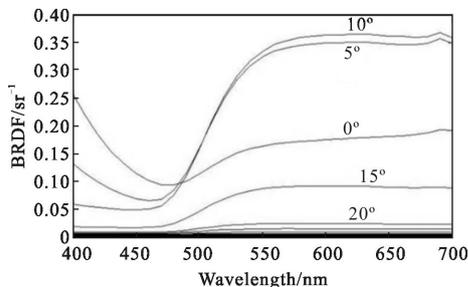


图 7 目标模型混合光谱 BRDF

Fig.7 Mixed spectral BRDF of model

由图 7 可知,目标光谱数据随观测相位角变化,其形状和大小都发生改变,呈现多种材料混合的光

谱。按照公式(8)进行光谱解混,定义部件光谱库  $F$  为 31 行 4 列矩阵,每列保存图 3 中各部件光谱;定义  $F_{\text{sat}}$  为 31 行 16 列矩阵,每列保存图 7 中各相位角处整星光谱。求解非负约束最小二乘问题,解得 4 行 16 列系数矩阵  $K$ ,每列表示各采样点处四种材料对整星光谱的拟合系数。按照公式(9)计算残差矩阵  $E$  与相对残差矩阵  $R$ 。

图 8 为随相位角的增大,4 种主要部件拟合系数的变化情况。金色包覆膜系数  $k_1$  先增后减,在 10° 达到峰值。分析可知,由于模型本体与入射光存在 5° 偏角,故镜面反射发生在 10° 左右,符合预设姿态。同理硅帆板系数  $k_2$  迅速下降,与图 4 中部件 BRDF 趋势相同;白漆系数  $k_4$  平缓下降,符合其朗伯体性质。然而碳纤维系数  $k_3$  始终接近为 0,偶然跳变也仅为 0.002。经分析,此现象是因为碳纤维和白漆光谱形状相似,其贡献系数被计算机归算到白漆系数  $k_4$  中了。

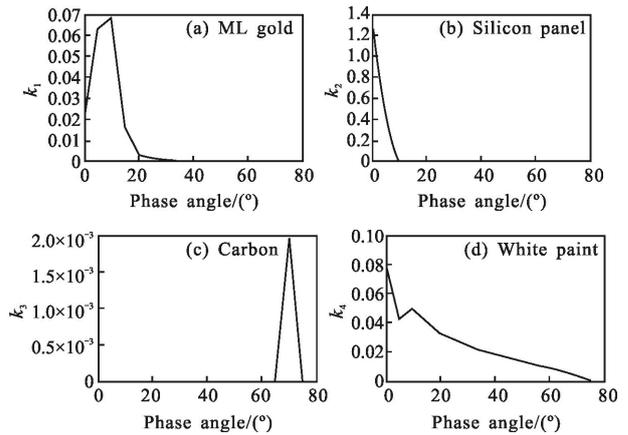


图 8 目标光谱 4 部件拟合系数

Fig.8 Components' fitting factor of model spectrum

由拟合光谱与测量光谱得到相对残差,其分布如图 9 所示,图中  $r$  为相对残差。残差分布较为均匀,全局最大相对残差小于 10%,拟合效果良好。

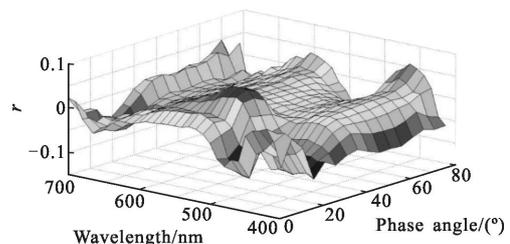


图 9 相对残差分布

Fig.9 Relative residual distribution

## 4 结 论

采用了高保真卫星模型及良好的天基光照模拟环境进行实验,测量了典型 GEO 轨道通信卫星及其主要部件的光谱 BRDF。建立了空间目标光谱 BRDF 线性混合模型,并提出了利用非负约束最小二乘法进行光谱反演,研究得到结论如下:

(1) 由于实际部件表面结构作用,部件光谱 BRDF 与材料光谱 BRDF 存在差异,如表面起伏使部件 BRDF 波峰展宽,因此实际应用中需对部件光谱 BRDF 进行详细研究;

(2) 光谱形状相近的部件贡献系数难以分离,如白漆和碳纤维,需通过其他先验条件考虑;

(3) 非负约束最小二乘法解混目标光谱效果较好,拟合光谱相对残差不大于 10%,证明线性光谱混合模型具有一定可信度;

(4) 通过非负约束最小二乘法反演所得各部件贡献系数变化与预设目标状态相符,证明该方法对于目标姿态反演具有一定实用意义。

为克服本研究的不足,未来研究将重点围绕以下几点:

(1) 部件系数与部件实际的姿态、构型、面积等因素的映射关系;

(2) 非完备光谱库反演目标状态的可行性;

(3) 线性光谱混合模型中的非线性因素;

(4) 面向实际应用,研究多波段光度数据最小二乘反演的可行性、波段选择及误差分析。

## 参考文献:

- [1] Tang Yijun, Jiang Xiaoju, Wei Jianyan, et al. Review of optical observations of high apogee space debris [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(4): 1094–1098. (in Chinese)  
唐轶峻, 姜晓军, 魏建彦, 等. 高轨空间碎片光电观测技术综述[J]. *宇航学报*, 2008, 29(4): 1094–1098.
- [2] Han Yi, Sun Huayan. Advances in space target optical scattering character research [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 758–766. (in Chinese)  
韩意, 孙华燕. 空间目标光学散射特性研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 758–766.
- [3] Nicodemus F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity [J]. *Applied Optics*, 1970, 9(6): 1474–1475.
- [4] 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.
- [5] Bedard D, Lévesque M, Wallace B. Measurement of the photometric and spectral BRDF of small Canadian satellites in a controlled environment[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2011: 1–10.
- [6] Doyle Hall. Surface material characterization from multi-band optical observations[C]//AMOS, 2010: 1–15.
- [7] Sun Chengming, Zhao Fei, Yuan Yan. Feature extraction and recognition of non-resolved space object from space-based spectral data [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(3): 3420–3422. (in Chinese)  
孙成明, 赵飞, 袁艳. 基于光谱的天基空间点目标特征提取与识别[J]. *物理学报*, 2015, 64(3): 3420–3422.
- [8] Murray-Krezan J, Inbody W C, Dao P, et al. Algorithms for automated characterization of three-axis stabilized GEOS using non-resolved optical observations [R]. Air Force Research LAB Kirt and AFB NM Space Vehicles Directorate, 2012.
- [9] Bédard D, Wade G, Jolley A. Interpretation of spectrometric measurements of active geostationary satellites [C]//Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2014, 1: 31.
- [10] Renhorn I G E, Boreman G D. Analytical fitting model for rough-surface BRDF [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 12892–12898.
- [11] Cao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu, et al. Experimental measurement and statistical modeling of spectral bidirectional reflectance distribution function of rough target samples [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 792–798. (in Chinese)  
曹运华, 吴振森, 张涵璐, 等. 粗糙目标样片光谱双向反射分布函数的实验测量及其建模[J]. *光学学报*, 2008, 28(4): 792–798.