

文章编号 1004-924X(2017)07-1738-10

# 光度数据反演临近空间低速点目标形状尺寸信息

荆楠<sup>1,2</sup>, 李创<sup>1\*</sup>, 钟培峰<sup>1,2</sup>, 崇雅琴<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为了获取临近空间低速点目标的形状尺寸信息,进行了高空气球光学观测实验,研究了如何从光度数据中反演低速点目标形状尺寸信息。利用孔径测光技术处理地基探测装备所拍摄的实验图像数据获取目标光度数据。在反演过程中,采用球谐函数法和细分控制点法两种形状描述方法来参数化描述目标形状,利用球谐函数法的正则化函数、三角面元正则化函数和基于目标物理特性的正则化函数约束目标的形状变化,在对目标光度数据以及由两种形状描述方法产生的模型数据进行傅里叶变换的基础上,结合光学系统点扩散函数来反演空间目标形状尺寸信息。结果表明:两种形状描述方法反演的目标形状主要特征相似,表明这种形状特征是从光度数据提取到的。球谐函数法和细分控制点法反演出的目标等效直径相对误差分别为 11.3% 和 22.6%,长度相对误差分别为 11.6% 和 21.8%。由此表明:球谐函数法反演的临近空间低速目标形状误差较小,更能准确地反演出临近空间低速目标形状。

**关键词:**光度数据;临近空间低速目标;反演;目标形状

**中图分类号:** P413.22; P182.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172507.1738

## Inversion of low dynamic vehicle shape and dimension information using non-resolved photometric data in near space

JING Nan<sup>1,2</sup>, LI Chuang<sup>1\*</sup>, ZHONG Pei-feng<sup>1,2</sup>, CHONG Ya-qin<sup>1,2</sup>

(1. *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;*

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

*\* Corresponding author, E-mail: lichuang@opt.ac.cn*

**Abstract:** In order to obtain the shape and dimension information of low dynamic non-resolved object in near space, an experiment on optical detection of high altitude balloon was performed to investigate how to calculate object shape and dimension information from photometric data. In the experiment, experimental images captured by the ground-based detector were processed by aperture photometry technology, thus obtaining non-resolved photometric data. During the inversion process, two shape representation methods as well as three sets of regularization functions were adopted to describe and restrict object shape, respectively. The methods contained spherical harmonics function and subdivision control points, and the functions involved spherical harmonics regularization function, triangle panel regularization function and physical characteristics regularization function. Based on the Fourier transform of photometric data and model data of the shape

收稿日期:2016-12-27;修订日期:2017-02-18.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2013AA7031020A)

representation methods, the shape and dimension information of the non-resolved object was inverted by the Point Spread Function (PSF) of the optical system. The result shows that the prominent features presented in the object shape are similar, which indicates that the features are extracted from the photometric data. The relative errors of object equivalent diameter inverted by spherical harmonics function and subdivision control points are 11.3% and 22.6%, and the relative errors of object length are 11.6% and 21.8%, respectively. The comparison of the relative errors proves that the shape representation method based on the spherical harmonics function has smaller error and is more suitable to represent the low dynamic object shape.

**Key words:** photometric data; low dynamic vehicle in near space; inversion; object shape

## 1 引言

近年来,随着世界航空航天科技的发展,各国对临近空间的认识逐渐深入,其战略价值逐渐得到重视。临近空间是指距离地面 20~100 km 的区域,位于目前飞机所能飞行的最高高度及卫星绕轨运行的最低高度之间<sup>[1]</sup>。常见的临近空间飞行器有高超声速飞行器、平流层飞艇、高空气球等。国内外已将临近空间飞行器应用于多个领域,包括商业通信、天文观测、气象探测等<sup>[2]</sup>。为了监控临近空间飞行器的运动轨迹,保障国家安全,迫切需要发展临近空间飞行器地基探测技术。

临近空间地基探测设备对远距离目标成像时,在像面上成点源光斑像,只包含了目标亮度等信息,损失了目标形状、姿态、表面材料参数等信息<sup>[3-8]</sup>。孙成明等人在实验室条件下研究了基于光谱特性的空间点源目标状态和材料等特征的提取<sup>[9-11]</sup>。Calef 等人在实验室条件下从时序光度测量结果中恢复三维目标体的表面特性参数<sup>[12]</sup>。Fulcoly 等人讨论了从光度模拟数据中恢复目标形状尺寸以及表面材料信息的可行性<sup>[13]</sup>。Linares 等人从理论方面研究了光度数据反演空间点源目标的姿态、轨道等特征信息的可行性<sup>[14]</sup>。但是,目前尚未发现有人进行光度数据反演临近空间点目标形状尺寸信息的实验验证。目标形状尺寸信息是目标观测、侦察和监视中的重要信息,影响着目标的分类和识别<sup>[15-16]</sup>。光度数据反演临近空间点目标形状尺寸信息具有重要的作用。这种方法不仅可以用于临近空间目标监视,也可以用于中高轨暗弱目标的监视,使空间目标监视不再局限于高分辨力成像监视(例如国际太空站、哈勃太空望远镜目标),从而为光度数据反演目标姿态、运动状态和表面材料参数等特征

打下深厚的基础<sup>[17]</sup>。

光度数据是基于时间序列的目标视星等数据和目标光度图像数据,目标视星等随其位置、尺寸以及表面材料参数的变化而变化,原理上可以从时序光度数据中恢复其位置、形状尺寸和表面材料参数等信息。本文针对临近空间目标的由于成像距离远只能点源光斑成像,无法获取目标形状尺寸信息的现状,进行了临近空间目标探测实验,获得了临近空间目标的光度数据,并研究如何从光度数据中反演临近空间点目标的形状尺寸信息,从而为中高轨暗弱目标监视提供支持。

## 2 光度数据反演目标形状的理论

考虑到目标形状的多样性,从光度数据反演目标形状的过程中,首先需要一种有效的数学方法对目标形状进行参数化描述;此外,选择合适可行的正则化函数也是解决问题的重要部分。

### 2.1 两种目标形状描述方法

目标形状描述方法是光度数据反演目标形状模型的重要基础。由于在计算目标亮度时需要将目标离散成有限个网格面元以便计算光照遮蔽效应,因此形状描述方法应能够参数化描述目标形状为三角面元组成的多面体,以及面元的顶点坐标。假定典型目标形状和单位球同胚,则面元顶点坐标是单位球坐标的函数,然后选择合适的基函数并在此基函数的基础上展开面元顶点坐标函数,这种方法对于生成多面体模型来说是比较简单的。通常情况下,选择球谐波函数和球面波函数为典型基函数,然而采用这种参数化描述方法分别展开面元顶点坐标函数,忽略了相邻坐标之间的约束关系,导致生成非最优结果。因此,本文采用球谐函数法和细分控制点法两种形状描述方法来对比说明参数化描述目标形状的准确性。

### 2.1.1 球谐函数法

通常情况下,球谐函数方法用球谐基函数来描述任意面元的顶点坐标,但是在反演过程中,这种描述方法需要较多的光滑正则化函数来约束目标的形状变化;而且如果相邻面元之间没有约束,面元会自由移动从而导致面元相交甚至重合。因此,本文选择一种形状描述方法,这种方法比基本球谐函数法更稳定,且能够描述任意典型目标形状:

$$f(\theta, \varphi) = \begin{cases} x(\theta, \varphi) = e^{a(\theta, \varphi)} \sin \theta \cos \varphi \\ y(\theta, \varphi) = e^{a(\theta, \varphi) + b(\theta, \varphi)} \sin \theta \sin \varphi, \\ z(\theta, \varphi) = e^{a(\theta, \varphi) + c(\theta, \varphi)} \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $a(\theta, \varphi)$ ,  $b(\theta, \varphi)$  和  $c(\theta, \varphi)$  是球谐波函数  $Y_m^l(\theta, \varphi)$  的线性组合,  $a_m, b_m, c_m$  是与  $a(\theta, \varphi)$ ,  $b(\theta, \varphi)$  和  $c(\theta, \varphi)$  相对应的系数,  $0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$ 。球谐波函数  $Y_m^l(\theta, \varphi)$  的表达式为:

$$Y_m^l(\theta, \varphi) = (i)^{m+|m|} \sqrt{\frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!}} P_l^m(\cos \theta) e^{im\varphi}, \quad (2)$$

式中  $P_l^m(x)$  为勒让德多项式,其表达式为:

$$P_l^m(x) = \frac{1}{2^l l!} \frac{d^l}{dx^l} (x^2 - 1)^l. \quad (3)$$

当目标局部形状需要优化时,即需要局部正则化约束时,面元顶点坐标选择球面波函数为基函数进行展开。

### 2.1.2 细分控制点法

相对于球谐函数法,细分控制点法对目标局部形状的参数化描述更为细致。本文的细分控制点法采用 Loop 细分法,以一组顶点和三角网格面元为基础,通过增加新顶点和新边点计算顶点迭代位置来不断地更新目标的表面形状。假设共享同一条边的相邻三角面元的顶点坐标为  $(N_0, N_1, N_2)$ ,  $(N_0, N_1, N_3)$ , 则生成的新边点为:

$$N_E = \frac{3}{8}(N_0 + N_1) + \frac{1}{8}(N_2 + N_3). \quad (4)$$

顶点  $N$  的边邻点为  $N_0, N_1, \dots, N_{n-1}$ ,  $n$  为顶点  $N$  邻域内不同于  $N$  的顶点个数,则生成的新顶点为:

$$N_V = (1 - n\beta_n)N + \beta_n \sum_{i=0}^{n-1} N_i. \quad (5)$$

从式(5)可以看出,新顶点为顶点  $N$  和其邻

域内顶点  $N_0, N_1, \dots, N_{n-1}$  的加权和。 $\beta_n$  的表达式为:

$$\beta_n = \frac{1}{n} \left( \frac{5}{8} - \frac{(3 + 2\cos(2\pi/n))^2}{64} \right). \quad (6)$$

此外,细分控制点法的主要特征是细分面元总数随着  $m$  次细分步而增加为  $4^m$  个。

## 2.2 正则化函数

在反演过程中,约束目标形状变化的正则化函数主要有球谐函数法的正则化函数、三角面元正则化函数、基于目标物理特性的正则化函数 3 类。

### 2.2.1 球谐函数法的正则化函数

球谐函数法的正则化函数为球谐函数系数  $a_m, b_m, c_m$  的权重标准化,因此表达式为:

$$\alpha = \sum_{l,m} l (b_{lm}^2 + c_{lm}^2), \quad (7)$$

$$\alpha_0 = \sum_{l,m} l (a_{lm}^2 + b_{lm}^2 + c_{lm}^2). \quad (8)$$

当  $\alpha_0$  最小时,球谐函数法参数化描述的目标形状结果最优。

### 2.2.2 三角面元正则化函数

2.2.1 节的正则化函数仅适用于球谐函数法,且通常情况下约束着目标全局形状,而在反演过程中,需要不依赖于目标形状描述方法的正则化函数,以修匀目标局部形状的不规则性。因此定义局部修匀正则化函数为:

$$\delta_1 = \frac{1}{\sum_i A_i} \sum_{i,j} A_j (1 - \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}_j), \quad (9)$$

式中:  $A_i$  和  $A_j$  分别是面元  $i$  和  $j$  的面积,面元  $j$  为面元  $i$  水平上方的邻域面元,  $\mathbf{r}_i$  和  $\mathbf{r}_j$  分别为面元  $i$  和  $j$  的法线矢量。在反演过程中,局部修匀正则化函数约束的目标形状结果为局部凸状特征。

对于目标形状表面面元来说,相邻面元之间应该平滑过渡,因此定义平滑正则化函数为:

$$\delta_2 = \sum_{i,j \in \Delta} W_{ij} (1 - \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}_j), \quad (10)$$

式中:面元  $j$  为面元  $i$  水平上方的邻域面元;  $W_{ij}$  为权重系数,通常取 1;  $\Delta$  为目标所划分的所有面元。在反演过程中,平滑正则化函数约束的目标形状更光滑。

为了避免面元退化以及面元面积发生较大的变化,因此定义面元面积正则化函数为:

$$\delta_3 = \sum_i \left( \frac{A_i}{A} - 1 \right)^2, \quad (11)$$

式中  $\bar{A}$  为目标三角面元的平均面积。在反演过程中,面元面积正则化函数约束的目标面元更均匀。

### 2.2.3 基于目标物理特性的正则化函数

反演过程中,需要利用目标物理特性来约束目标形状变化,例如目标的动力学状态。因此,定义目标物理特性正则化函数为:

$$\delta_i = \frac{1}{\sum_i A_i} \sum_i A_i (1 - r_i \cdot \nabla E(x_i)), \quad (12)$$

式中:  $E(x)$  为目标势能,  $x_i$  为目标面元的质心。在反演过程中,基于目标物理特性的正则化函数约束目标在外力状态下的形状。

### 2.3 面元散射定律和可见性

双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)模型用来描述目标面元光线的反射特性。一般情况下, BRDF 由漫反射和镜反射两部分组成,漫反射在各个方向均匀反射光线,而镜反射依赖于入射光方向。图 1 为 BRDF 模型的矢量参数。

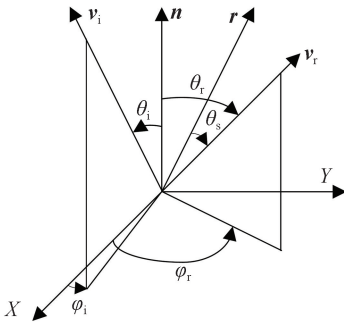


图 1 面元光线的反射特性

Fig. 1 Reflective characteristic of micro-facet ray

根据 Phong 模型<sup>[18-21]</sup>,目标亮度函数的表达式为:

$$L_r(\lambda) = k_d(\lambda) \sum_i L_i(\lambda) [v_i \cdot n]^+ + k_s(\lambda) \sum_i L_i(\lambda) [v_r \cdot r]^{k_c}, \quad (13)$$

式中:当入射光均匀漫反射时,  $f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r, \lambda) = k_d(\lambda)$ ,  $k_d$  为漫反射率;当入射光发生镜反射时,  $f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r, \lambda) = k_s(\lambda) \cos^{k_c} \theta_s$ ,  $k_s$  为镜反射率,  $k_c$  为指数系数;  $\theta_s$  为  $v_r$  和  $r$  的夹角,  $\theta_s = \arccos(v_r \cdot r)$ ,  $v_r$  为反射光矢量,  $r$  为入射光镜反射矢量;  $r = (2nn^T - I)v_i$ ,  $v_i$  为入射光矢量,  $n$  为面元法线矢

量;  $L_i(\lambda)$  为入射光亮度,由 MODTRAN 软件计算得出;  $[v_i \cdot n]^+ = \max(0, v_i \cdot n)$ 。

根据应用光学辐射理论,目标在探测器入瞳处的总照度为:

$$E_r(\lambda) = k_d(\lambda) \sum_i A(i) L_i(\lambda) [v_i \cdot n]^+ / S^2 + k_s(\lambda) \sum_i A(i) L_i(\lambda) [v_r \cdot r]^{k_c} / S^2, \quad (14)$$

式中:  $A(i)$  是面元面积,  $S$  是目标和探测器之间的距离。因此,目标的视星等为:

$$M_v = -26.7 - 2.5 \log_{10}(E_r / E_{sun}), \quad (15)$$

式中:  $E_{sun}$  为太阳在探测系统入瞳处的照度,  $E_{sun} = 642.86 \text{ W/cm}^2$ 。

### 2.4 傅里叶变换

考虑到在图像频域内反演目标形状具有以下优点:傅里叶变换比直接像素拟合目标形状方法简单,且收敛稳定;频域内任何一点的信息都来自灰度图像中所有点的信息,鲁棒性更好;傅里叶变换采样可以过滤任何频率点的图像信息;目标形状反演过程中包含了光学系统的点扩散函数。因此,选择在频域内反演目标形状。

在空域内  $(x, y) \in \mathfrak{R}^2$ , 函数  $f(x, y)$  的二维傅里叶变换为:

$$\mathfrak{F}(u, v) = \iint_{\mathfrak{R}^2} f(x, y) e^{-2\pi i (ux + vy)} dx dy. \quad (16)$$

设  $\Gamma$  为构成目标形状的总面元,目标亮度函数的二维傅里叶变换为:

$$\mathfrak{F}(u, v) = \sum_{T_i \in \Gamma} \iint_{PT_i} L_r(x, y) e^{-2\pi i (ux + vy)} dx dy = \sum_i \sum_j l_{ij}(u, v), \quad (17)$$

式中:  $T_i$  为构成目标形状的单个面元,  $L_r(x, y)$  为目标亮度函数,  $P$  为面元从三维空间到相机焦平面二维空间的线性映射算子。由 BRDF 决定每个映射面元  $PT_i$  的可见性,若同时满足这两个条件  $v_i \cdot n > 0, v_r \cdot r > 0$ ,则目标面元可见。

## 3 临近空间目标光学探测实验

为了验证此反演方法的可行性,本文进行了临近空间高空气球探测实验。实验设备由可见光近红外 CCD 相机、手动调节 Nikon 镜头、滤光片、二维电动转台、重型三脚架等组成,如图 2 所示;此外,还包括相机图像采集系统和电动转台控制系统等。



图 2 临近空间地基探测试验装备

Fig. 2 Experimental equipment for ground-based detection in near space

临近空间目标探测试验需要在场地开阔、能见度高的地区进行,要求天气晴朗,水平能见度大于 15 km。试验观测对象为 1 000 m<sup>3</sup> 的高空气球,气球最大横截面为圆,其等效直径为 13.8 m,长为 14.6 m。高空气球表面的常用材料有聚氯乙烯(PVC),聚四氟乙烯(PTFE)和聚乙烯(PE)。通常情况下,BRDF 用来描述光线在物体表面的反射特性。这里测量了不同入射角度下气球表面常用材料的 BRDF,为后续计算目标在探测器焦平面的反射亮度做准备,测得的 BRDF 如图 3 所示。

观测实验开始前,首先需要拍摄零秒曝光的本底图像,以及黄昏或者清晨时段的天空平场图像。气球放飞后,相机开始跟踪拍摄目标,如图 4 所示。图 4(a)是目标飞行的快速上升阶段,图像拉长。图 4(b)为放飞 11 min 后的图像,可以清楚地看到气球的细节。随着高度和距离的变大,目标在图像中变小,但是仍然可以分辨目标结构,

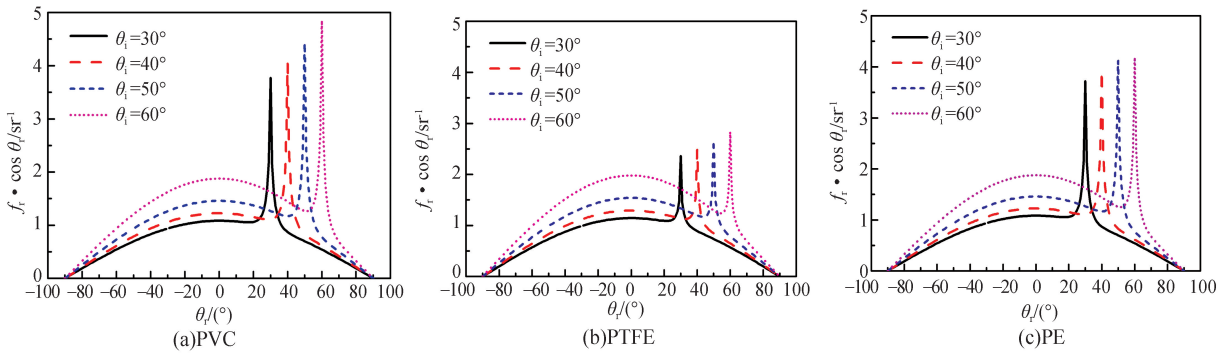


图 3 高空气球表面常用材料的反射特性

Fig. 3 Reflective characteristics of common materials of high altitude balloon

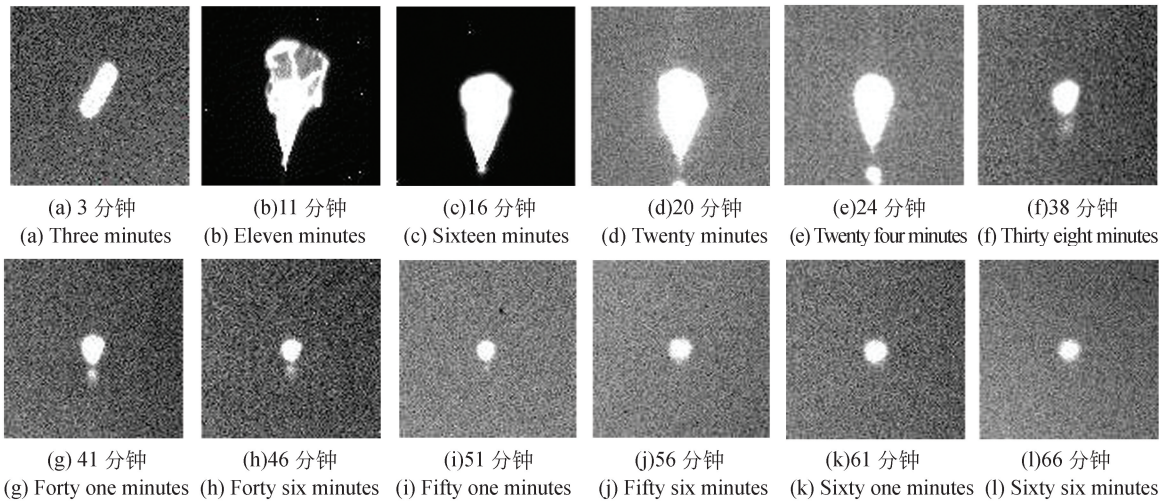


图 4 不同观测时刻的高空气球观测图

Fig. 4 Observation images of high altitude balloon at different observation time

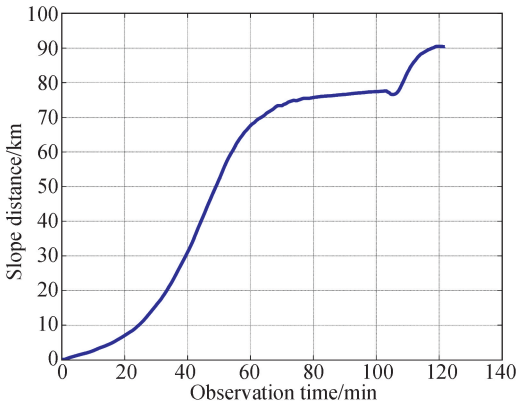


图 5 目标斜距随时间的变化

Fig. 5 Object slope range versus observation time

在图 4(h)中气球的仪器盒仍清晰可见。从图 4(j)开始,目标的细节不能分辨,目标像成点源结构。点目标是指不能够分辨形状,在像面上近似成圆形像且占据多个像元的目标。观测目的是获得点源结构目标,这种点目标不具有形态纹理信息,所反演的目标形状不是从图像直接获得,而是从光度数据反演而来,有利于后续的孔径测光。

气球放飞时,气球尾部悬挂的 GPS 仪器盒以每秒一次的频率把气球的位置信息发送回来,包括高度、斜距、俯仰角和方位角等。观测结束时,目标飞行了近 105 min,此时高度为 26 km,斜距为 77 km 左右,如图 5 所示。此后,气球所悬挂的 GPS 仪器盒自动与气球分离。

基于时间序列的目标观测图经过本底校正和平场校正后,对观测图中的点源结构目标进行孔径测光处理以获取视星等数据。孔径测光原理如下:

$$M = M_{\text{zero}} - 2.5 \log\left(\frac{f}{t}\right) - 2.5 \log\left(\frac{ND}{apc}\right), \quad (18)$$

式中: $M$  为目标星等, $f$  为减去天光背景的目标灰度积分值, $M_{\text{zero}}$  为星等零点, $t$  为曝光时间, $ND$  为中性减光片的减光倍数, $apc$  为光圈的改正值。通过观测已知星等恒星的方法对系统(包括光学,滤光片及探测器)的综合探测效率进行定标。首先,通过认证视场中的恒星以及测光方法确定恒星 I 波段的流量。然后与星表(第谷 II, USNO B1.0 星表)比较,确定 I 波段的星等零点(1 s 积分时间的 1 个 ADU(灰度值)对应的星等)。测得目标星等在 I 波段范围的误差为 9%。经过孔径

测光后,所获得的目标视星等数据如图 6 所示。

从图 6 可以看出,在观测过程中,气球亮度变化了 6 个星等左右。气球放飞一小时内,亮度从 -9.2 星等骤降到 -2.8 星等,推测气球此时处于上升运动过程中,且斜距越来越大,与图 5 相吻合。气球放飞一小时后,其亮度在 -3 星等左右变化,推测气球此时上升到最高处,在平流层中飘浮,此现象也与图 5 相吻合。

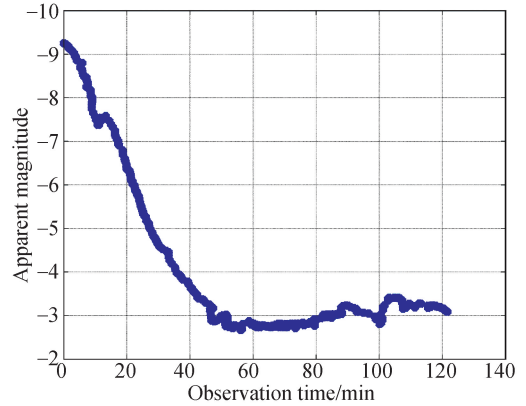


图 6 目标视星等随时间变化

Fig. 6 Object apparent magnitude versus observation time

## 4 光度数据反演目标形状结果

### 4.1 目标形状反演流程

通过傅里叶变换进行目标形状反演的流程如图 7 所示。首先进行观测实验,利用孔径测光处理目标光度图像,获取目标视星等数据。然后对

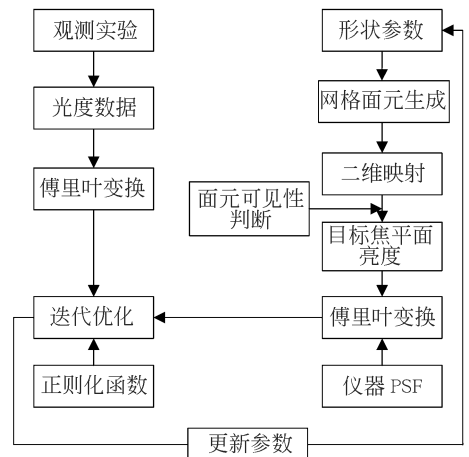


图 7 目标形状反演流程

Fig. 7 Flow chart of object shape inversion

目标光度图像数据进行傅里叶变换。对于目标形状模型映射图像的获取,首先利用形状参数初始化目标的三维形状模型,划分目标网格面元,将目标形状映射到相机焦平面上,并判断网格面元是否可见,接着对目标模型映射图像进行傅里叶变换,同时考虑了观测仪器的点扩散函数的影响。在此基础上,目标光度图像数据和模型映射图像的傅里叶变换相减形成以形状参数为自变量的目标函数,并利用迭代函数求解目标函数的最小值。当目标函数最小时,此时形状参数构成的形状模型即为反演出的目标形状。

对于每幅实验图像数据  $D_i$  以及相对应的几何位置数据  $\omega_i$ , 在图像数据  $D_i$  的空域平面上对其进行二维傅里叶变换  $\mathfrak{S}D_i(u, v)$ 。假定图像数

$$O^2 = \sum_i \lambda_i \sum_{j=1}^{N_i} \left\| \mathfrak{S}D_i(u_{ij}, v_{ij}) - e^{2\pi i(\epsilon_i^x u_{ij} + \epsilon_i^y v_{ij})} \mathfrak{S}P_i(u_{ij}, v_{ij}) \mathfrak{S}M_i(u_{ij}, v_{ij}) \right\|^2 + \lambda \delta^2, \quad (19)$$

式中:  $M_i$  为模型图像数据,  $D_i$  为实验图像数据,  $\mathfrak{S}P_i$  为光学系统点扩散函数的傅里叶变换,  $(\epsilon_i^x, \epsilon_i^y)$  为模型图像数据对实验图像数据的补偿值,  $\lambda \delta^2$  为目标形状反演过程中的约束项。正则化函数  $\delta$  对应式(7)~式(12), 权重系数  $\lambda$  表示不同正则化函数在目标形状反演过程中的比重。由于正则化函数没有先验信息可供选择, 因此对权重系数的最佳选择方法是最大兼容性估计。选择 Levenberg-Marquardt 迭代算法, 当目标函数值最小时, 迭代出目标形状参数以及映射图像数据  $M_i$  的补偿值  $(\epsilon_i^x, \epsilon_i^y)$ 。

总体来说, 利用傅里叶变换在频域平面上反演目标形状的方法具有以下特点: 基于多边形模型的二维平面映射面元傅里叶变换计算简单, 并且存在关于顶点坐标的偏微分,  $\mathfrak{S}^{-1}\mathfrak{S}=1$ , 使得傅里叶变换保留了原始图像数据的全部信息; 但是, 傅里叶变换方法增加了计算复杂度, 因此增加了计算时间。

#### 4.2 目标形状反演结果

这里采用临近空间地基探测装备拍摄的 150 幅可见光近红外目标观测图来反演目标形状, 部分图片如图 4 所示。目标观测图使用 Apogee 公司生产的数字式行间扫描 CCD 相机进行拍摄。相机型号为 Kodak KAI-16000M, 镜头由 Nikon 公司生产, 焦距为 180 mm, 最大光圈数为 2.8。对每幅实验图都在 1 582 万个正方形像元上采样

据中的每个像元均为多边形, 根据式(16)对多边形进行傅里叶变换, 或者对映射面元进行傅里叶变换。

初始化球谐函数法中的形状参数  $a_{lm}, b_{lm}, c_{lm}$ , 使得此系数可以将目标形状参数化描述为近似等于其尺寸的球形(因为目标形状和单位球是同胚), 同时初始化细分控制点法的控制面元。

对于每组观测几何位置数据  $\omega_i$  以及初始化形状模型的二维映射图像数据  $M_i$ , 根据 2.4 节, 对映射图像数据  $M_i$  进行傅里叶变换  $\mathfrak{S}M_i(u, v)$ , 并且计算  $\mathfrak{S}M_i(u, v)$  关于形状参数  $a_{lm}, b_{lm}, c_{lm}$  的偏导数。

形成的形状反演目标函数如下:

进行傅里叶变换。

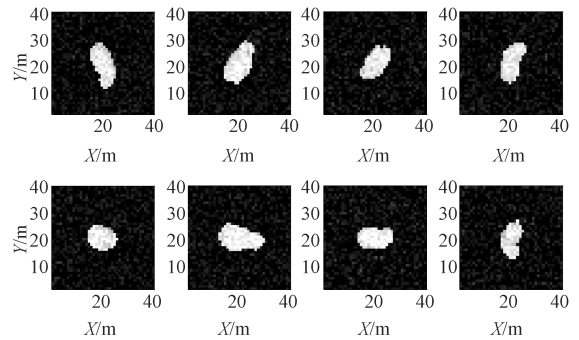


图 8 球谐函数法反演的目标形状变化过程

Fig. 8 Variation of object shape inverted by spherical harmonics function method

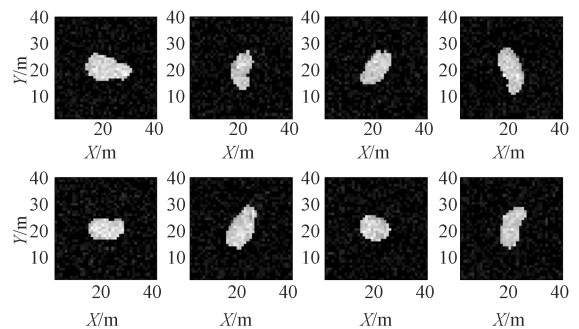


图 9 细分控制点法反演的目标形状变化过程

Fig. 9 Variation of object shape inverted by subdivision control points method

本实验采用球谐函数法和细分控制点法两种方法进行目标形状反演。球谐函数法反演的目标形状变化过程如图8所示,目标形状最终的反演结果如图10所示。球谐函数法最终反演的目标形状模型具有9 600个面元,1 602个顶点以及由4 806个形状参数组成的顶点坐标,反演中球谐函数最高次为9,反演出的目标等效直径为31.75 m,长度为32.9 m。细分控制点法反演的目标形状变化过程如图9所示,目标形状的最终反演结果如图11所示。细分控制点法重构的目标形状模型有5 400个面元,902个顶点以及由2 706个形状参数组成的顶点坐标,反演出的目标等效直径为27.71 m,长度为29.1 m。对比图10和11的反演结果可知,由于单幅图像的点源结构目标并不包含目标的形状、大小等细节特征,而两种方法反演出的目标的主要形状特征相似,表明这种主要形状特征是从时序光度数据中提取的。

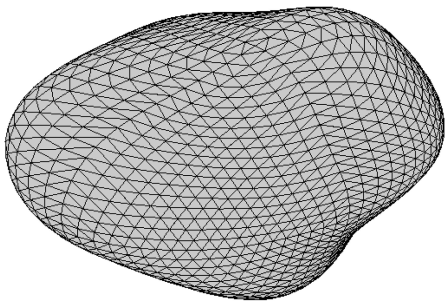


图10 球谐函数法反演的目标最终形状结果

Fig. 10 Final object shape inverted by spherical harmonics function method

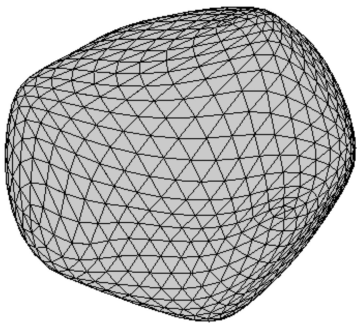


图11 细分控制点法反演的目标最终形状结果

Fig. 11 Final object shape inverted by subdivision control points method

由式(19)可以看出,给定一幅初始实验图像数据 $D_i$ ,可以估计出一个目标初始形状,这个初始形状与目标实际形状的误差比较大。本文在实验中给定150幅实验图像数据,通过不断迭代更新目标形状参数来更新目标形状,当式(19)的函数值最小时迭代出目标的最终形状参数,如图10和图11所示。所以当目标函数值最小时,迭代运算终止,算法稳定地收敛到最小值。

高空气球内部充满氦气,根据理想气体状态方程 $V = m_{\text{He}} R_{\text{He}} T_{\text{He}} / P_{\text{He}}$ ,以及气球直径计算公式 $d = 1.383V^{1/3}$ ,计算26 km处的气球直径为35.8 m,长度为37.22 m。式中 $V$ 为气球体积, $m_{\text{He}}$ 为氦气质量, $R_{\text{He}}$ 为氦气的气体常数, $T_{\text{He}}$ 为氦气温度, $P_{\text{He}}$ 为氦气压力。球谐函数法最终反演的目标形状直径的相对误差为11.3%,长度为11.6%。细分控制点法反演出的目标形状直径的相对误差为22.6%,长度为21.8%。对比等效直径和长度的相对误差可知,球谐函数法反演的临近空间低速目标形状误差较小,更能准确地反演出临近空间低速目标的形状。

## 5 结 论

本文研究了从光度数据中反演临近空间低速点目标形状尺寸信息的方法。首先介绍了两种目标形状描述方法,三种用于反演过程中约束目标形状变化的正则化函数,目标面元散射定律和可见性以及傅里叶变换。然后进行了临近空间地基探测实验,对观测实验图进行本底和平场校正后,利用孔径测光处理图像获取目标的亮度。在此基础上,对实验图像数据以及模型图像数据进行傅里叶变换来反演目标形状。最终得到球谐函数法和细分控制点法反演出的目标等效直径的相对误差分别为11.3%和22.6%,长度相对误差分别为11.6%和21.8%。反演结果表明:球谐函数法能够更好地描述临近空间低速目标的形状。这种反演方法不仅可以应用于监视识别临近空间目标,还可以应用到中高轨微弱目标监视中,使空间目标监视不再局限于低轨大目标。

## 参考文献:

- [1] STEPHENS H. Near-space [J]. *Air Force Magazine*, 2005, 88(7): 36-40.
- [2] SMITH I S Jr. Advancements in NASA balloon research and development [J]. *Advances in Space Research*, 1996, 17(9): 37-44.
- [3] LINARES R, JAH M K, CRASSIDIS J L, *et al.*. Astrometric and photometric data fusion for inactive space object feature estimation [C]. *Proceedings of 62nd International Astronautical Congress (IAC)*, IAF, 2011: 2289-2306.
- [4] LINARES R, JAH M K, CRASSIDIS J L. Inactive space object shape estimation via astrometric and photometric data fusion [J]. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2012, 143: 217-232.
- [5] LINARES R, SHOEMAKER M, WALKER A, *et al.*. Photometric data from non-resolved objects for space object characterization and improved atmospheric modeling [C]. *Proceedings of Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui Economic Development Board, 2014: 1889-1899.
- [6] LINARES R, CRASSIDIS J L, JAH M K, *et al.*. Astrometric and photometric data fusion for resident space object orbit, attitude, and shape determination via multiple-model adaptive estimation [C]. *Proceeding of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, AIAA, 2010: 1-18.
- [7] FRÜH C, KELECY T M, JAH M K. Coupled orbit-attitude dynamics of high area-to-mass ratio (HAMR) objects: influence of solar radiation pressure, earth's shadow and the visibility in light curves [J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2013, 117(4): 385-404.
- [8] HALL D, CALEF B, KNOX K, *et al.*. Separating attitude and shape effects for non-resolved objects [C]. *Proceedings of Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui Economic Development Board, 2007: 464-475.
- [9] 袁艳, 孙成明, 张修宝. 空间目标表面材料光谱双向反射分布函数测量与建模[J]. *物理学报*, 2010, 59(3): 2097-2103.
- YUAN Y, SUN CH M, ZHANG X B. 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)
- [10] 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): 034202.
- SUN CH M, ZHAO F, YUAN Y. Feature extraction and recognition of non-resolved space object from space-based spectral data [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(3): 034202. (in Chinese)
- [11] 吴斌, 叶东, 张鑫, 等. 非合作目标姿态测量的嵌入式算法 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11): 2804-2813.
- WU B, YE D, ZHANG X, *et al.*. Embedded algorithm for relative pose measurement between non-cooperative targets [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2804-2813. (in Chinese)
- [12] CALEF B, AFRICANO J, BIRGE B, *et al.*. Photometric signature inversion [J]. *SPIE*, 2006, 6307: 63070E.
- [13] FULCOLY D O, KALAMAROFF K I, CHUN F. Determining basic satellite shape from photometric light curves [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2012, 49(1): 76-82.
- [14] LINARES R, JAH M K, CRASSIDIS J L, *et al.*. Space object shape characterization and tracking using light curve and angles data [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, 37(1): 13-25.
- [15] KAASALAINEN M, TORPPA J. Optimization methods for asteroid lightcurve inversion: I. Shape determination [J]. *Icarus*, 2001, 153(1): 24-36.
- [16] KAASALAINEN M, TORPPA J, MUINONEN K. Optimization methods for asteroid lightcurve inversion: II. The complete inverse problem [J]. *Icarus*, 2001, 153(1): 37-51.
- [17] HOLZINGER M, ALFRIEND K T, WETTERER C J, *et al.*. Attitude estimation for unresolved agile space objects with shape model uncertainty [C]. *Proceedings of Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui Economic Development Board, 2012: 921-932.
- [18] ASHIKHMEN M, SHIRLEY P. An anisotropic phong BRDF model [J]. *Journal of Graphics Tools*, 2000, 5(2): 25-32.
- [19] 赵青, 赵建科, 徐亮, 等. 航天消光黑漆双向反射分布函数的测量与应用 [J]. *光学精密工程*,

2016, 24(11): 2627-2635.

ZHAO Q, ZHAO J K, XU L, *et al.*. BRDF measurement of matte coating and its application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2627-2635. (in Chinese)

- [20] 李俊麟, 张黎明, 司孝龙, 等. 基于六轴串联机械手的双向反射分布函数测量装置[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11): 2983-2989.

LI J L, ZHANG L M, SI X L, *et al.*. BRDF device based on six-axis robot [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2983-2989. (in Chinese)

- [21] WETTERER C J, LINARES R, CRASSIDIS J L, *et al.*. Refining space object radiation pressure modeling with bidirectional reflectance distribution functions [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, 37(1): 185-196.

#### 作者简介:



荆楠(1990—),男,山西运城人,博士研究生,2013年于长春理工大学获得学士学位,主要从事临近空间目标探测与识别的研究。E-mail: jingnanopt@163.com

#### 导师简介:



李创(1970—),男,陕西宝鸡人,博士,研究员,1992年、1999年于西北工业大学分别获得学士、硕士学位,2005年于西安交通大学获得博士学位,主要从事空间相机结构设计、临近空间目标探测与识别等方面的研究。E-mail: lichuang@opt.ac.cn