

文章编号 2095-1531(2015)05-0744-11

## 光度曲线反演空间目标形状的发展现状

刘浩<sup>1\*</sup>, 杜小平<sup>2</sup>

- (1. 装备学院 研究生管理大队, 北京 101416;  
2. 装备学院 航天指挥系, 北京 101416)

**摘要:**光度曲线反演空间目标形状和姿态等参数为空间目标监视与识别提供了新的技术途径。首先分析了基于光度曲线反演空间目标信息的必要性,之后通过关注和跟踪国内外最新发展情况,全面总结了目前进行形状反演的3种主流方法的研究现状及优缺点,对3种反演方法进行了比较分析,指出基于非线性滤波技术的形状反演方法是未来的主要发展方向,并分析了3种非线性滤波技术的优缺点。最后针对反演存在的问题,指出了基于改进的实时性更好的粒子滤波算法,融合多种传感器信息反演几何形状和表面材料更为复杂的空间目标是下一步研究发展的主要方向。

**关键词:**光测数据处理;空间目标;光度曲线;地基探测;形状模型

中图分类号:V19; V556.5; V557+.4 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20150805.0744

## Development of shape estimation of space target based on lightcurve inversion

LIU Hao<sup>1\*</sup>, DU Xiao-ping<sup>2</sup>

- (1. *Department of Graduate Management, Equipment Academy, Beijing 101416, China;*  
2. *Department of Space Command, Equipment Academy, Beijing 101416, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: haoliu991109@sina.cn*

**Abstract:** Shape and attitude estimation based on lightcurve inversion provide a new technological approach for space target surveillance systems. Firstly, the necessity of space target information inversion based on lightcurve is discussed. Secondly, the performance of the main three methods of shape estimation are comprehensively summarized, and the method of shape estimation based on nonlinear filter technology is the main development direction in the future. Then, the advantages and disadvantages of nonlinear filter technology are analyzed. Finally, aiming at the problem of inversion, we point out the next research and development direction of fusing multiple sensor information based on the particle filter algorithm with better real-time performance to inverse more complex geometrical shape and surface materials of space target.

**Key words:** photometric data processing; space target; lightcurve; ground-based detection; shape model

收稿日期:2015-03-11;修订日期:2015-05-13

基金项目:部委资助项目

## 1 引言

空间态势感知是对空间目标信息获取、信息处理、态势认知与认知产品的生成及其应用,以及空间环境监测的活动及其过程<sup>[1]</sup>。空间目标监视作为其重要任务之一,对在轨所有空间目标进行系统、不间断的观测以及信息收集,以获取有重要价值的空间目标形状、姿态以及尺寸等信息。由于空间目标数量多,传感器数量有限、能力有限,获取的数据信息不充分,不可能保持对空间目标的持续监视,因此提升现有设备观测能力,同时从有限的信息中获取出更多有价值的信息变得愈加重要。

目前获取空间目标信息的手段主要有地基雷达系统、地基光学系统以及天基空间目标监视系统<sup>[2]</sup>。对于低轨目标,地基雷达系统<sup>[3]</sup>和地基光学系统均可以进行探测、识别和编目,比如地基光学系统可以清晰获得哈勃望远镜和国际空间站的图像。对于中高轨道目标,如地球同步轨道(GEO)目标,地基雷达系统由于雷达探测能力与距离的四次方成反比,则需要更大的功率,目前还难以进行探测<sup>[4]</sup>,我国天基空间目标监视系统还处于起步阶段且由于重访周期不均匀,需要在多个高度层部署多颗卫星,技术难度较大<sup>[5]</sup>。因此,目前对于中高轨道目标的信息获取主要还应立足于利用地基光学系统<sup>[6]</sup>,获取空间目标的光度信息,分析基于时间序列的光度曲线和基于相位角序列的光度曲线进行反演研究<sup>[7]</sup>。从有限的光度信息中提取空间目标形状、平台类型、姿态以及运行状态等信息,不仅可以应用于低轨道大目标也适用于高轨道小目标<sup>[8]</sup>,对中高轨道目标分类与识别,提高观测数据的利用效率,提升空间目标监视和识别能力具有重要的意义。

起初,美国天文学家利用光度曲线特征鉴别双子星系统以及太阳系外的星体,推算行星姿态。从1966年,特别是进入太空时代后,研究人员开始利用光度曲线研究地球人造卫星。经过国内外研究人员不断的研究探索,取得了丰硕的成果。本文重点通过分析梳理国内外光度曲线形状反演

方法的研究现状,详细对比分析了3种形状反演方法各自的优势与不足,指出基于非线性滤波技术的形状反演方法是未来发展的主要方向,深入归纳总结了三种非线性滤波算法的优缺点,最后在反演方法、反演内容以及反演手段3个方面详细分析了未来的发展趋势。

## 2 国内外光度曲线形状反演方法研究现状

国内外研究人员从自然天体和人造目标两个方面基于光度曲线信息反演空间目标形状等信息,形成了基于光度曲线特点的形状反演方法、基于高斯面密度的形状反演方法以及基于非线性滤波技术的形状反演方法。目前,国外在物理建模、反演方法、仿真验证等方面研究较为深入,国内的相关研究起步较晚,研究的深度和广度与国外相比都有一定的差距。

### 2.1 基于光度曲线特点的形状反演方法

基本思想是通过分析由单传感器或多传感器获得的基于相位角序列的光度曲线的变化特点,区分不同形状的空间目标,对空间目标进行分类。主要优势具体体现在两个方面:一是理论比较简单,只需对获取的光度曲线进行分析处理;二是如果基于不同观测站、不同形状、不同姿态以及不同相位角建立完善的光度曲线库,可以通过曲线匹配算法,反演未知空间目标的形状等信息。缺点是反演的误差较大,如果未建立完善的光度曲线模型库,只能进行简单的分类,反演出空间目标的形状(圆柱形、立方体、球形等)类型。目前,从信息源角度来看,主要包括基于单传感器和多传感器的两类反演方法。

#### 2.1.1 基于单传感器的空间目标形状反演方法

起初,国内外研究人员利用光度曲线变化特点,对空间目标进行分类,不同状态的空间目标光度曲线如图1所示。2006年,美国空军大学的Charles Wetterer等人<sup>[9]</sup>,通过分析空间目标基于时间序列的光度曲线的周期性变化情况,成功区分出了卫星、火箭箭体和碎片。同年,美国空军实验室的Tamara E. Payne等人<sup>[10]</sup>,结合太阳帆板指

向将 36 颗在美国本土以及太平洋地区的卫星,分为 Canonical Class、A2100 Class、Telstar Class、

BSS702C Class、Peculiar Class 五大类,不同类型的太阳帆板指向如图 2 所示。

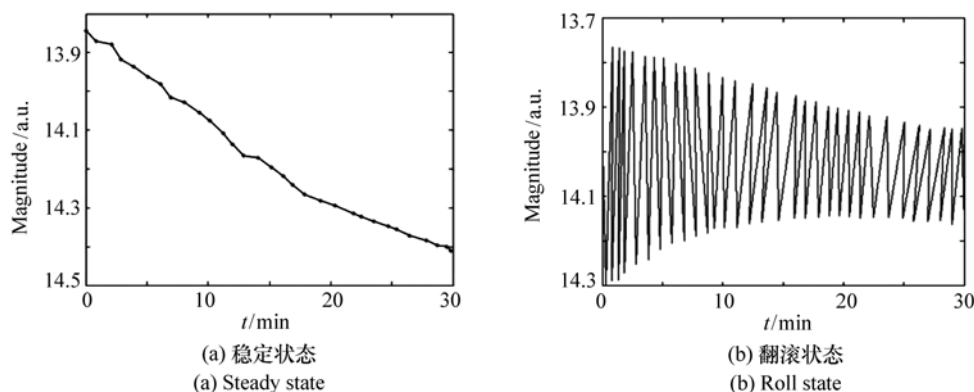


图 1 不同状态目标基于时间序列光度曲线

Fig. 1 Different states target lightcurve based on time sequence

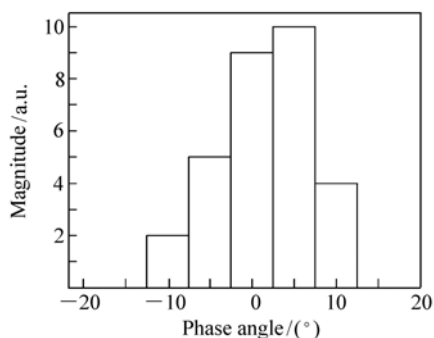


图 2 不同类别的空间目标太阳帆板指向分布图

Fig. 2 Distribution diagram of solar panel offsets on different space target

2007 年,该研究团队<sup>[11]</sup>利用阿尔伯科基的望远镜,搜集了从中大西洋到太平洋的地球同步轨道卫星的光度曲线,对比了工作与不工作、卫星状态有无变化、卫星与箭体、GPS 卫星与闪电卫星等情况的光度曲线的重复性和周期性变化情况,分析卫星的结构组成和工作状态。我国研究人员为研究目标形状和姿态对光度曲线的影响,2009 年,中国科学院国家天文台的姜晓军等人<sup>[12]</sup>,对地球同步轨道通讯卫星进行了可见光波段光学观测,基于相位角序列的测光数据表明,在大相位角区域以卫星主体和太阳帆板的漫反射效应为主,在小相位角区域以太阳帆板的镜面反射为主。同年,中国科学院安徽光学研究所的李雅男等人<sup>[13]</sup>,实验获得了几种简单形状目标和卫星缩比

模型的光度曲线,研究结果表明对于球体和柱体目标光源和探测器的相位角是影响光度曲线的主要因素,对于立体目标光学特性则与特定的入射角和观测角有关,对于静止卫星光学特性主要受太阳能电池板对地夹角和观测面积的影响。2010 年,装备学院的赵阳生<sup>[14]</sup>,对空间目标动态光学特性的建模方法进行了研究,建立了目标光学特性随时间变化的动态特性,相对于过去单个时间点的计算更加具有连续性。该方法不仅能够准确反映空间目标在任一时段内整体的光度特性,还能够准确反映目标各部分表面的受照情况及其光学特性,对于大多数类柱体外形的空间目标都适用。以上国内的研究工作,量化了目标形状和姿态与光度曲线的关系,为下一步基于非线性滤波技术的形状反演提供了理论基础。

### 2.1.2 基于多传感器的空间目标形状反演方法

2012 年,美国空军大学的 Daniel O. Fulcoly 等人<sup>[15]</sup>,证明了通过分析四个不同观测站获得的光度曲线反演形状的可行性。基本思想是空间目标基于相位角序列的光度值的下限曲线的变化,主要与形状有关,受姿态和尺寸的影响较小。研究中所使用的数据均来自于美国空军实验室研发的基于 MATLAB 的光度模型工具。仿真过程中,假设 6 种不同轨道、3 种姿态(静止卫星、单轴稳定以及三轴稳定)、3 种形状(四面体、立方体以及二十面体)共计 54 种情况,通过均方差法(Mean

Squared Error, MSE) 计算由 4 个不同位置传感器测量获得的光度曲线。通过仿真得到 3 种不同形状空间目标光度值的下限曲线,如图 3 所示。

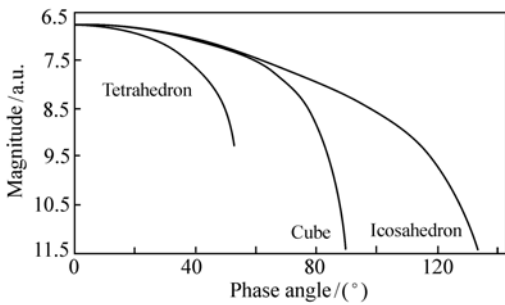


图 3 不同形状空间目标光度值的下限曲线

Fig. 3 Lower limit of lightcurve in different space target shapes

从图 3 中可以得到,四面体目标产生下限曲线的相位角位于 20 ~ 55°、立方体的相位角位于 55 ~ 90°以及二十面体的相位角位于 55 ~ 135°。通过研究证明,通过分析四个传感器获得的基于相位角序列的光度曲线,成功分析出空间目标形状,并证明静止的卫星反演的成功率是 72%,单轴稳定卫星的成功率是 76%,三轴稳定卫星反演的成功率是 80%,姿态变化越大,获得的数据就越充足,反演的成功率越高。

根据上述对基于光度曲线特点的空间目标形状反演现状的分析,形成了基于光度曲线特点的空间目标信息反演方法,如图 4 所示。首先建立以国别、代号、轨道信息、平台类型以及姿态稳定方式为主要内容的基础信息库,然后建立不同轨道、不同卫星在不同观测站测量得到的光度曲线库作为先验信息,通过观测站测量得到卫星的基于相位角序列的光度曲线,利用角匹配算法(SAM)、相关性算法(SC)以及信息散度法(SID)等曲线匹配算法,在曲线库中识别出最可能的光度曲线,最终反演出空间目标的未知信息。

### 2.2 基于高斯面密度的形状反演方法

起初,国外研究人员采用基于三轴椭球体模型建立的 A (Amplitude-Methods) 方法、M (Magnitude-Method) 方法以及不受模型限制的 E (Epoch Method) 方法反演空间目标的自转轴指向以及自转周期。随着光度曲线质量的不断提高,

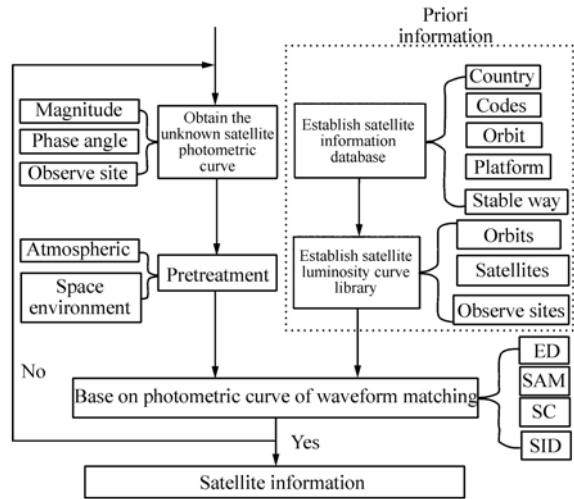


图 4 基于光度曲线特点的空间目标信息反演方法

Fig. 4 Principle diagram of satellite information inversion based on the photometric curve

Kaasalainen 和 Torppa 等人<sup>[16-17]</sup>在高斯面密度法的基础上研究了最优化方法。高斯面密度法是指通过求解高斯面密度函数以及支撑函数确定曲面的唯一形状,但只适用于凸体目标。最优化方法理论上可以反演出凸体和凹体空间目标的形状,甚至是凹陷程度,主要包括多面体法和光滑函数法,通常情况下结合使用。多面体法主要是指将空间目标视为由有限个小面元组成,光滑函数法是指将高斯面密度函数写成指数的求谐函数列,虽然失去了线性但是得到了正约束性,可以获得稳定的反演。该类方法的主要缺点是仅适用于尺寸较大的自然天体,对于人造目标特别是卫星反演的误差较大。2003 年, Kaasalainen 和 Torppa 等人利用测量的 10 000 多条光度曲线,基于多面体法和光滑函数法获得了 80 余颗行星形状<sup>[18]</sup>。2014 年,中国科学院的季江徽研究团队<sup>[19]</sup>,利用光学与热物理学模型,通过多面体法反演得到小行星的三维形状模型,该模型由 2 040 个三角形小平面和 1 022 个顶点组成,直径误差控制在 3% 以内。2014 年美国科罗拉多大学的 Ben K. Bradley 等人<sup>[20]</sup>,利用太阳同步轨道上的探测器获得的地球同步轨道目标的光度曲线,采用最优化方法反演椭球体目标、火箭上面级、高面质比目标、不同大小的立方体目标以及盒状(box-wing)卫星的形状,反演的结果如图 5 所示。

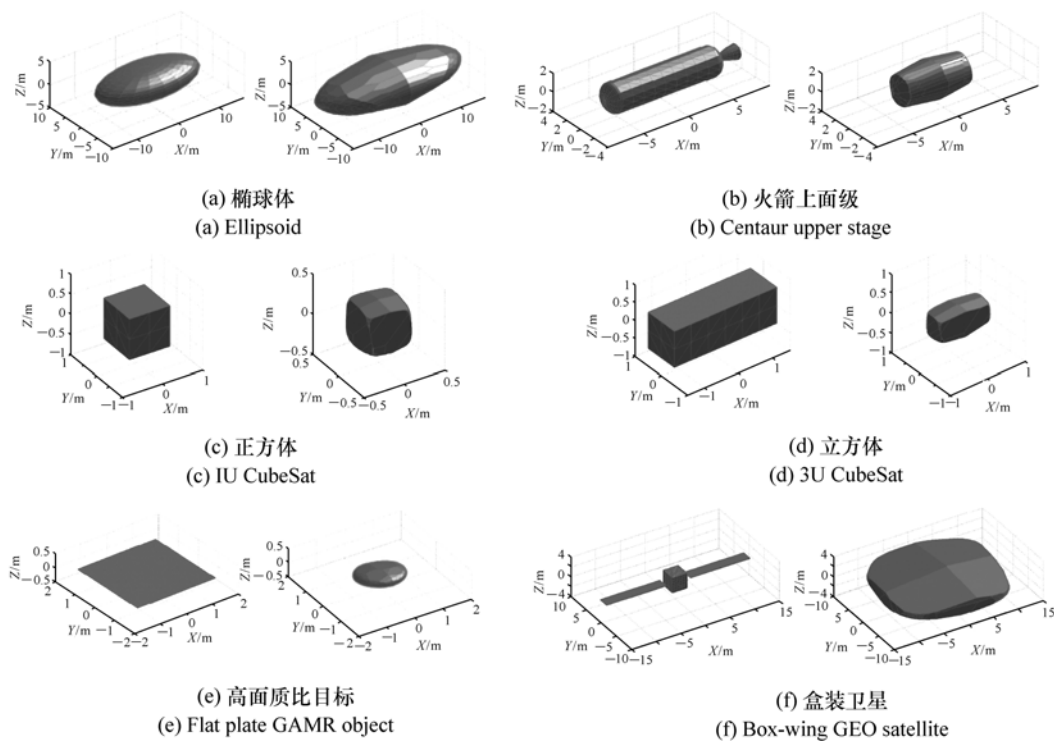


图 5 基于高斯面密度法的空间目标反演结果

Fig. 5 Space target inversion results based on the Gaussian surface density

从图 5 中得出结论,该方法能够较为准确的获得椭球体、火箭上面级以及立方体目标的形状,但是获得的高面质比目标和盒装卫星的形状误差较大。分析原因是该方法主要适用于光度曲线变化幅度较小的空间目标,对于平面目标以及盒装卫星,随着姿态的变化光度曲线的变化幅度较大,获得的反演结果误差较大。只有通过增加计算量,多划分面元才能减小此类误差,但是经过多次仿真发现,该方法始终不能较准确的反演出组

合体空间目标的形状。

### 2.3 基于非线性滤波技术的形状反演方法

近几年,国外研究人员开始利用非线性滤波方法进行形状反演。针对形状反演,建立了三维形状模型、太阳光压模型、天体观测模型以及光度曲线模型等,形成了一套形状反演方法<sup>[21-24]</sup>。目前,从滤波器角度看,主要分为采用基于单滤波器的向量法形状模型的形状反演方法以及采用基于多滤波器的形状模型库的多模型自适应估计方法

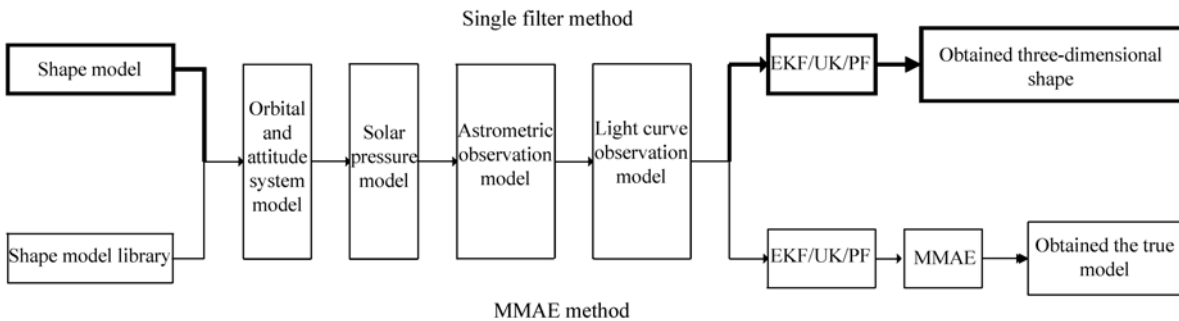


图 6 基于非线性滤波技术的形状反演方法流程图

Fig. 6 Flow chart of the shape inversion method based on nonlinear filter technology

(Multiple Model Adaptive Estimation, MMAE), 反演流程如图 6 所示。

### 2.3.1 基于单滤波器的形状反演方法

该方法主要采用向量法建立的形状模型而不是 MMAE 方法建立的形状模型库,通过获得的大量观测数据并通过非线性滤波反演空间目标的形状。向量法假设空间目标各表面具有相同的材料,通过八分仪三角形模型可以直接反演出空间目标的三维形状。其原理是通过八分仪三角形建立控制点,形成凹凸表面,控制点只允许在径向方向移动,因此可以通过各控制点向量坐标来描述空间目标的形状,也可以通过向量运算获得空间目标的面积。利用向量法,通过建立的光度特性模型,采用非线性滤波可以仿真反演出空间目标的三维形状。主要缺点是向量法不以任何形状模型为基础,若控制点误差较大则获得的形状误差较大,因此,需要大量准确的数据点,稀疏的光度数据会造成形状信息的缺失。向量法虽然只需单滤波器参与运算,但是需要的观测数据量较大,方法的稳定性也不如 MMAE 方法。2012 年,美国空军实验室的 MoribaK. Jah 等人<sup>[22]</sup>,利用八分仪三角形建立的形状模型,在光度曲线基础上通过向量法反演出了空间目标的三维形状,如图 7 所示。由仿真结果分析可知,反演的空间目标形状由若干个三角形组成,反演的误差在 5% 以内,较为准确的反演出目标的凹凸情况。2013 年纽约州立大学的 Richard Linares 等人<sup>[23]</sup>,利用向量法建立

的形状模型基于非线性滤波技术,仿真了圆柱体、带有圆顶的圆柱体、猎鹰九上面级以及宇宙神上面级四种形状,在轨道高度 1 000 km 大气阻尼系数以及光度曲线,通过与 LANL 天文望远镜获得的真实光度曲线进行对比,证实了向量法的准确性。

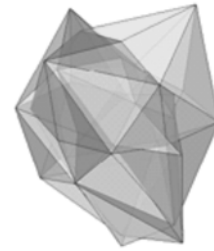


图 7 利用向量法反演的空间目标形状  
Fig. 7 Shape of space target based on UKF

### 2.3.2 基于非线性滤波的 MMAE 多模型自适应估计方法

MMAE 方法的原理是通过比较各滤波器的权值,在空间目标形状模型库中选出最可能的形状。MMAE 由一组单元滤波器组成,每个单元滤波器都可得到一种可能的形状,MMAE 中的单元滤波器均处理同样的测量数据并彼此相互独立地并行工作。利用条件贝叶斯公式和条件全概率公式,可以得到第  $i$  个单元滤波器对应的后验概率。在多模型框架下,状态估计可以通过对各个单元滤波器状态估计的加权平均融合计算得到。

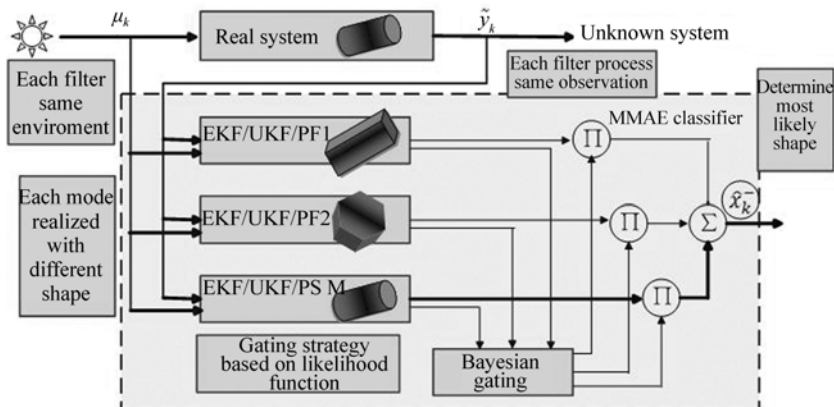


图 8 MMAE 方法结构图

Fig. 8 Sketch diagram of MMAE approach

MMAE 方法的框图如图 8 所示<sup>[8]</sup>。MMAE 方法的优势是 MMAE 方法建立了丰富的形状模型,即使数据较为稀疏也可以通过不断的匹配,弥补数据的不足,反演出准确的空间目标形状。MMAE 方法的稳定性较好,不足之处是由于 MMAE 方法需要使用和形状模型数目一样多的单元滤波器,计算的负载随单元滤波器数目的增加而线性增长。MMAE 方法以扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)、无损卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)以及粒子滤波(Particle Filter, PF)为单元滤波器,但是每种滤波算法都存在自身的优势和局限性。因此需要针对光度曲线反演数据的特点,选择合适的滤波方法。

2010 年,纽约州立大学的 Richard Linares 等人<sup>[24]</sup>,选择观测站位于北纬  $0^\circ$ 、东经  $172^\circ$ 、海拔

0 m,近地球同步轨道,共设置了 5 个候选立方体模型,分为待测模型是候选模型之一和与候选模型形状均不相同两种情况,如图 9 所示。利用基于 UKF 的 MMAE 方法反演未知目标的形状,通过仿真研究证明了 MMAE 方法的正确性,该方法需要较为准确的先验模型作为匹配模板。2014 年<sup>[25]</sup>,选择观测站位于北纬  $20^\circ$ 、东经  $156^\circ$ 、海拔 3 058 m,近地球同步轨道,在建立 25 种多面体模型、25 种立方体模型的形状模型库作为先验模型的前提下,分为待测目标位于模型库内与不在模型库内进行仿真,利用基于 UKF 的 MMAE 方法,经过仿真证实当待测模型位于仿真库内时,很快就可以发现待测模型(大约需要 15 min),不在仿真库内时,仿真出两个比较接近的模型,但是需要的时间比较长(大约需要 60 min)。

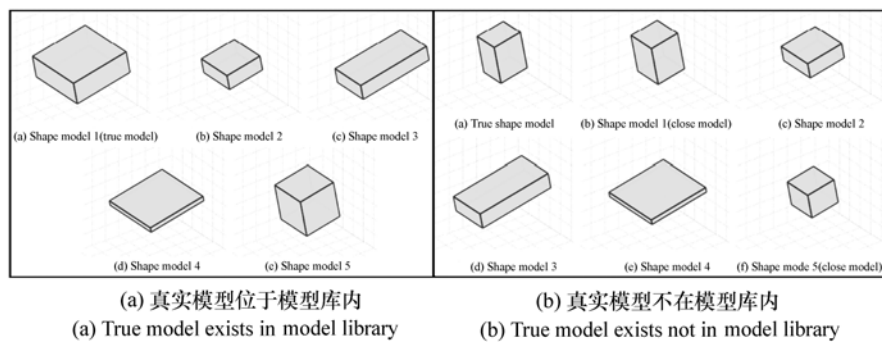


图 9 形状模型库

Fig. 9 Shape model library

### 3 关键技术分析

通过上述文献分析可知,三类方法均有各自的优缺点,基于光度曲线特点的形状反演方法虽然理论简单,但是只能对空间目标进行分类,若实现对任意位置、任意时刻空间目标的形状反演,工程量太大,实用性不高。基于高斯面密度的形状反演方法虽然可以反演椭球体、火箭上面级以及立体状空间目标,但是对于高面质比目标以及盒装卫星反演的效果较差。基于非线性滤波技术的形状反演方法适用范围广、误差较小且具有较好的实时性、鲁棒性。因此,作者认为该方法是未来基于光度曲线进行形状反演研究的主要方法。无论是单滤波器还是 MMAE 方法,都离不开非线性

滤波技术,因此掌握各种非线性滤波技术的优缺点,选择合适的滤波技术是形状反演的关键。目前,应用于光度曲线反演的非线性滤波技术主要包括扩展卡尔曼滤波(EKF)、无损卡尔曼滤波(UKF)以及粒子滤波(PF)。

#### 3.1 扩展卡尔曼滤波(EKF)

EKF 作为处理非线性系统的经典方法,算法流程图如图 10 所示。基本思想是将非线性函数在估计点附近进行泰勒级数展开,进行一阶线性截断,巧妙的利用线性化技巧将非线性问题转化为线性问题解决。存在的主要问题:(1)由于进行了一阶线性截断,导致精度较低,当系统具有强非线性、高维数时,滤波难以稳定,容易发散。(2)由于需要计算雅可比矩阵,因此,计算量较大且需要非线性函数连续可微。(3)如果假设的状

态初始值和初始协方差误差较大,容易导致滤波发散。因此只有当动态模型和测量模型都接近线性时,也就是线性化模型误差较小时,滤波结果才有可能接近真实值。

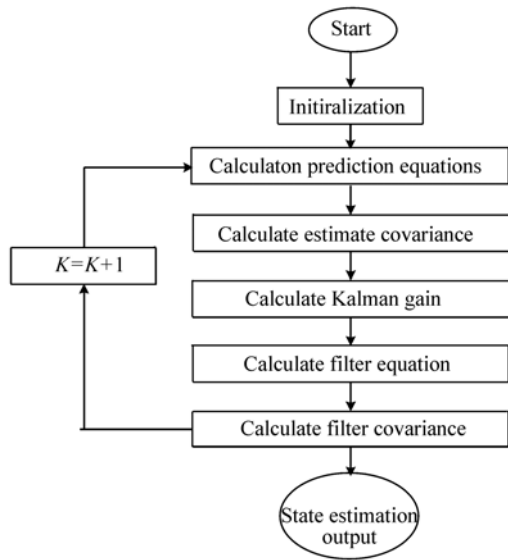


图 10 EKF 算法流程图  
Fig. 10 Algorithm process of EKF

### 3.2 无损卡尔曼滤波(UKF)

无损变换是 UKF 的基础,算法流程图如图 11 所示。基本思想是通过确定性采样,利用完全表

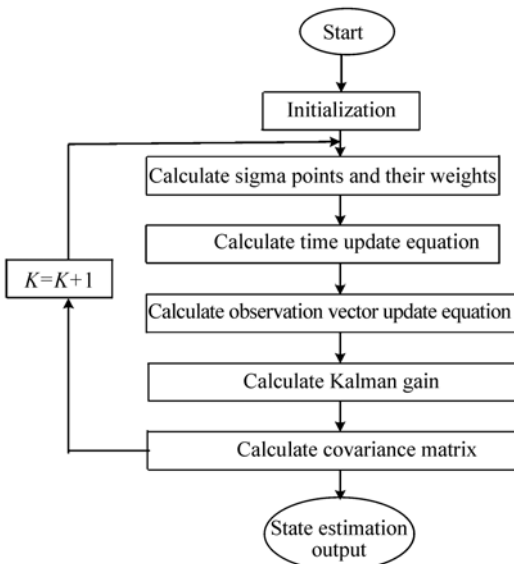


图 11 UKF 算法流程图  
Fig. 11 Algorithm process of UKF

述概率密度函数的均值和方差的有限个样本点进行描述,对状态向量的概率密度函数进行近似化,近似得到的概率密度函数仍是高斯的。采用 UKF 可以得到与三阶泰勒级数展开式相当的均值和方差,精度比 EKF 高。由于无需计算雅克比矩阵,因此不需要非线性函数连续可微。因为采用确定性采样,而不是 PF 的非确定性采样,因此避免了 PF 的粒子点退化问题,且计算量远远小于 PF。存在的主要问题:(1)不适用于非高斯分布的系统。(2)当处理维数高于 20 的非线性状态估计时,滤波性能不佳且容易发散。

### 3.3 粒子滤波(PF)

粒子滤波是基于蒙特卡罗方法和递推贝叶斯估计的统计滤波方法,算法流程图如图 12 所示。基本思想是根据系统状态向量的经验分布在状态空间内通过随机采样产生一组随机组合的粒子,随着粒子数的不断增加,通过测量不断调整粒子的权重和位置,粒子的概率密度函数会逼近状态的真实后验概率密度。因此粒子滤波最大的优点是解决了 EKF 和 UKF 不适用于非线性非高斯系统的问题。存在的主要问题:(1)需要大量的样本数量才能很好地近似系统的后验概率密度,因此,当状态方程和观测方程维数较高时(大于 3 维),需要大量的运算,运算速度比较慢,实时性不好,效率较低。(2)由于采用随机采样方式,随

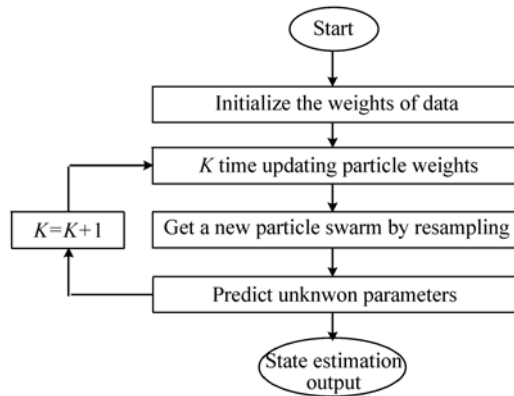


图 12 PF 算法流程图  
Fig. 12 Algorithm process of PF

着迭代次数的增加,会丧失粒子的多样性,产生粒子退化问题,虽然采取“重采样”解决了退化问题,但随之带来了“粒子贫化”和“粒子枯竭”的不



良影响,权值大的粒子在迭代中多次被选取,权值小的容易被剔除,造成滤波发散。(3)粒子滤波目前只用于仿真阶段,由于实时性问题阻碍了粒子滤波的工程应用。2014年7月,北京理工大学的郭已秋等人<sup>[26]</sup>针对粒子群优化算法应用在目标跟踪时,其惯性权重调节机制的局限性,提出了

改进的粒子群优化目标跟踪方法。改进后的粒子群优化算法与使用自适应惯性权重调节机制的粒子群优化目标跟踪方法相比,减少了获取相同适应度所需的迭代次数,运算效率提高了42.9%。

通过以上分析,将3种非线性滤波技术进行了总结对比,如表1所示。

表1 非线性滤波综合分析表

Table 1 Comprehensive analysis of nonlinear filter

	Work condition	Error analysis	Robustness	Instantaneity	Maturity
EKF	linear gaussian	bad	general	general	good
UKF	nonlinear gaussian	general	good	good	general
PF	nonlinear non-gaussian	good	bad	bad	bad

## 4 发展趋势分析

基于光度曲线反演空间目标形状和姿态等信息有很大的发展前景。无论是在反演方法、反演内容还是在反演手段上都有很多的工作需要完成。

(1)在反演方法上,技术难点是如何更好的应用非线性滤波技术解决形状反演问题。未来可能解决的技术途径是通过解决粒子滤波运算量大、实时性差的问题,使粒子滤波应用于形状反演。可以通过改进无损卡尔曼滤波,使之适用于非高斯系统;也可以通过对观测数据进行高斯化处理,使无损卡尔曼滤波应用于形状反演。

(2)在反演内容上,简单的形状反演只是光度曲线反演的第一步,下一步重点研究几何形状和表面材料更为复杂的空间目标,未来趋势是如何实现对稳定方式、材料以及结构等内容的反演,未来可能解决的技术途径是通过分析基于相位角序列光度曲线变化的特点判断目标的稳定方式,通过利用光谱信息分析目标的材料组成,在分析目标材料组成的基础上判断目标的结构。

(3)在反演手段上,技术难点是如何做到多种传感器信息的融合,不能仅仅依靠光度信息进行反演。未来可能解决的技术途径是充分利用每种传感器的技术优点,比如利用红外和雷达传感器获得的热发射和雷达有效截面信息与光度信息

相结合,可以判断空间目标的几何形状信息,利用空间目标的光谱信息与光度信息相结合,可以获得空间目标的材料信息。

## 5 结束语

基于光度曲线反演中高轨道空间目标信息具有巨大的优势,在空间目标监视系统设计与开发过程中具有重大意义。本文通过对比分析基于光度曲线特点、基于高斯面密度函数以及基于非线性滤波技术的形状反演方法,凸显出基于非线性滤波技术的MMAE多模型自适应估计方法的优越性,可以较为准确的从建立的形状模型库中判断出空间目标形状。

目前国内正在建立空间目标动态光学特性模型,进一步的发展趋势可能在于,借鉴美国光度曲线反演的思路,形成一套获取空间目标信息的方法。融合空间目标光度曲线信息与多种传感器信息,基于改进的实时性更强的粒子滤波,是光度曲线反演的基本思路。从国内测得的测光数据中获取更多高价值信息是光度曲线反演的最终目的。相信在科研人员的不断努力下,光度曲线反演技术会较快的应用于工程领域,为空间目标的探测与识别提供一定的技术支撑。本文可为建立完善的空间目标监视体系提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] 耿文东,杜小平,李智,等.空间态势感知导论[M].北京:国防工业出版社,2015.  
GENG W D, DU X P, LI ZH, *et al.*. *An Introduction to Space Situational Awareness*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [2] 高文,朱明,贺柏根,等.目标跟踪技术综述[J].中国光学,2014,7(3):365-375.  
GAO W, ZHU M, HE B G, *et al.*. Overview of target tracking technology[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3):365-375. (in Chinese)
- [3] 李彬.小行星测光和形状反演研究[D].南京:中国科学院紫金山天文台机构知识库,2012.  
LI B. Asteroid photometry and shape inversion research[D]. Nanjing: CASIR GRID, 2012. (in Chinese)
- [4] 黄晨,王建军,薛莉,等.一种空间目标可见光反射特性控制技术[J].北京航空航天大学学报,2014;1-5. HUANG CH, WANG J J, XUE L, *et al.*. A new control technology for visible light reflection characteristics of space target[J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014;1-5. (in Chinese)
- [5] 马志昊,韩蕾,陈磊,等.天基近地轨道空间监视雷达卫星重访效能分析[J].飞行器测控学报,2007,26(6):40-45.  
MA ZH H, HAN L, CHEN L, *et al.*. Recovery analysis of space-based radar for LEO surveillance[J]. *J. Spacecraft TT & C Technology*, 2007, 26(6):40-45. (in Chinese)
- [6] 李冬宁,王成龙,王丽秋,等.地基光度测量方式对比[J].中国光学,2015,8(3):456-463.  
LI D N, WANG CH L, WANG L Q, *et al.*. Comparison of ground-based photometric measurement ways[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3):456-463. (in Chinese)
- [7] 陈思,黄建余,王东亚,等.基于归一化光变函数的空间目标识别研究[J].飞行器测控学报,2013,32(3):273-275.  
CHEN S, HUANG J Y, WANG D Y, *et al.*. Study on space object recognition based on normalized brightness varying function[J]. *J. Spacecraft TT & C Technology*, 2013, 32(3):273-275. (in Chinese)
- [8] RICHARDL. Probabilistic identification and discrimination of deep space objects via astrometric and photometric data fusion[D]. Buffalo: State University of New York at Buffalo, 2013.
- [9] CHARLES W, CLAYTON S, JAMES S. Lightcurve inversion program for non-resolved space object identification[C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies (AMOS), Maui, HI, USA, 2006:100-105.
- [10] PAYNET E, Gregory S A. SSA analysis of GEOS photometric signature classifications and solar panel offsets[C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies (AMOS), Maui, HI, USA, 2006:210-220.
- [11] PAYNET E, GREGORY S A. Satellite monitoring, change detection, and characterization using non-resolved electro-optical data from a small aperture telescope[C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies (AMOS), Maui, HI, USA, 2006:78-84.
- [12] 唐轶峻,姜晓军,王建峰,等.三轴稳定 GEO 卫星漫反射光变特性[J].光子学报,2009,38(11):2863-2866.  
TANG Y J, JIANG X J, WANG J F, *et al.*. Diffuse reflection optical characteristics of three-axis stabilization GEO satellite[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(11):2863-2866. (in Chinese)
- [13] 李雅男,孙晓兵,乔延利,等.空间目标光学特性模拟实验研究[J].应用光学,2009,30(6):895-900.  
LI Y N, SUN X B, QIAO Y L, *et al.*. Space target optical properties simulation experiment research[J]. *J. Applied Optics*, 2009, 30(6):895-900. (in Chinese)
- [14] 赵阳生.空间目标光学特性分析与模型建立[D].北京:装备指挥技术学院,2010.  
ZHAO Y SH. Analysis and modeling of space target optical characteristics[D]. Beijing: The Academy of Equipment Command & Technology, 2010. (in Chinese)
- [15] FULCOL Y, KALAMAROFFK I, CHUNF K, *et al.*. Determining basic satellite shape from photometric light curves[J]. *J. Spacecraft and Rockets*, 2012, 49(1):76-82.
- [16] KASALAINEN M, TORPPAJ. Optimization methods for asteroid lightcurve inversion, I. shape determination[J]. *Icarus*, 2001, 153(4):24-36.
- [17] KASALAINEN M, TORPPA J. Optimization methods for asteroid lightcurve inversion, II. the complete inverse problem

- [J]. *Icarus*,2001,153(4):37-51.
- [18] TORPPA J,KAASALAINEN M. Shapes and rotational properties of thirty asteroids from photometric data[J]. *Icarus*,2003,164(2):346-383.
- [19] 张翔,季江徽. 近地小行星地基雷达探测研究现状[J]. *天文学进展*,2014,32(1):24-37.  
ZHANG X,JI J H. Ground-based radar detection of near-earth asteroids[J]. *Progress in Astronomy*,2014,32(1):24-37. (in Chinese)
- [20] BRADLEYB K,AXELRADP. Lightcurve inversion for shape estimation of geo satellites from space-based sensors[J]. *J. Guidance, Control, and Dynamics*,2014,32(1):33-35.
- [21] KAASALAINEN M,TORPPA J,PIIRONEN J. Models of twenty asteroids from photometric data[J]. *Icarus*,2002,159(1):369-395.
- [22] WETTERER C J. Attitude estimation from light curves[J]. *Guidance, Control, and Dynamics*,2009,32(5):1648 - 1651.
- [23] JAHM K,MADLERR A. Satellite characterization: angles and light curve data fusion for spacecraft state and parameter estimation[C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies(AMOS) Conference. Maui HI,USA,2007:32-49.
- [24] HALL D,AFRICANO J. AMOS observations of NASA's IMAGE satellite[C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies(AMOS) Conference, Maui, HI, USA,2006:31-36.
- [25] JAHM K,LINARES R,CRASSIDISJL. Inactive space object shape estimation via astrometric and photometric data fusion[J]. (*Preprint*)AAS,2012:45-51.
- [26] LINARES R,SHOEMAKER M. Photometric data from non-resolved objects for space object characterization and improved atmospheric modeling[C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies(AMOS) Conference, Maui, HI, USA,2013:112-117.
- [27] LINARES R,CRASSIDIS J L. Astrometric and photometric data fusion for resident space object orbit, attitude, and shape determination via multiple-model adaptive estimation[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control(GNC) Conference. Toronto, Ontario, Canada,2010:23-31.
- [28] LINARES R,JAHM K. Space object shape characterization and tracking using light curve and angles data[J]. *J. Guidance, Control, and Dynamics*,2014,37(1):13-25.
- [29] 郭巴秋,许廷发,王洪庆,等. 改进的粒子群优化目标跟踪方法[J]. *中国光学*,2014,7(5):759-767.  
GUO S Q,XU T F,WANG H Q,*et al.*. Object tracking method based on improved particle swarm optimization[J]. *Chinese Optics*,2014,7(5):759-767. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘浩(1990—),男,山东东阿人,硕士研究生,助理工程师,2010年于空军工程大学获得学士学位,主要从事空间目标监视与识别方面的研究。E-mail: haoliu991109@sina.cn



杜小平(1966—),女,河北昌黎人,博士,教授,博士生导师,主要从事空间态势感知与目标特性方面的研究。E-mail: dxp8600@163.com