

光度数据反演空间目标姿态的研究进展

苟瑞新¹ 杜小平² 刘浩¹

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 针对空间高轨目标、微纳卫星等点目标姿态信息难以获取的问题,跟踪了国内外基于光度数据反演目标特征信息的最新动态,分析了目前基于光度数据姿态反演的主要方法及特点。分析结果表明,基于非线性滤波的姿态反演方法能够高精度地反演目标姿态,近实时地解决目标稳定以及机动状态的姿态反演问题,是未来姿态反演的主要方向。在此基础上,进一步剖析了非线性滤波姿态反演需要突破的关键问题,包括形状模型反演、双向反射分布函数模型选取和参数确定以及非线性滤波算法的讨论。

关键词 测量; 目标识别; 光度数据; 姿态反演; 非线性滤波; 点目标

中图分类号 V19; V556.5; V557 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.100002

Advances in Attitude Inversion of Space Object Based on Photometric Data

Gou Ruixin¹ Du Xiaoping² Liu Hao¹

¹Department of Graduate Management, Equipment Academy, Beijing 101416, China

²Department of Space Command, Equipment Academy, Beijing 101416, China

Abstract For estimating attitude of unresolved targets, such as high earth orbit targets and micro-nano satellites, according to the analysis of correlational research at home and abroad, the main attitude estimation methods based on photometric data are comprehensively summarized. Then both the advantages and disadvantages of these methods are analyzed. The attitude inversion method based on the nonlinear filter has high precision and near-realtime efficiency in the cases of steady state and maneuvering condition, and it is the dominant method in the future. On this basis, the key issues of attitude inversion based on nonlinear filter are studied, such as shape inversion, selection of bidirectional reflectance distribution function models and its parameters, and the nonlinear filtering algorithm is discussed.

Key words measurement; object identification; photometric data; attitude inversion; nonlinear filter; point target

OCIS codes 150.1135; 280.4788; 350.6090; 200.4560

1 引言

空间态势感知对维护国家空间安全、保证空间任务完成、监督国际条约和协议履行等具有至关重要的意义^[1]。作为空间态势感知的主要组成部分,空间目标监视通过对在轨目标进行不间断的、系统的跟踪监视,获取和收集空间目标特征信息。在该任务中,确定目标的姿态对空间目标的识别、姿态控制、运行状态判断具有重要意义。

目前获取空间目标姿态信息的监视系统有天基监视系统、地基雷达监视系统和地基光学监视系统。天基监视系统虽然突破了地基系统的众多限制,但难以实现抵近详察;地基雷达监视系统主要用于中低轨空间

收稿日期: 2016-05-23; **收到修改稿日期:** 2016-06-27; **网络出版日期:** 2016-09-20

作者简介: 苟瑞新(1992—),男,硕士研究生,主要从事空间目标监视与识别方面的研究。E-mail: ld-gou@163.com

导师简介: 杜小平(1966—),女,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

目标的探测、跟踪和成像,增程后虽然能覆盖高轨目标,但仍不能进行姿态特征测量。地基光学监视系统不仅能够探测中低轨目标,还可以探测高轨以上目标,但由于望远镜成像分辨率的约束,不能获得清晰的图像信息。中高轨目标多以点目标的形式呈现在探测设备上,很难获取准确的特征信息,目前只能获得中高轨目标的光度值和灰度值,但是这类光度数据及其变化规律中包含了大量与目标轨道、形状、表面材质和姿态等紧密相关的目标特征信息。因此,针对空间点目标姿态信息难以获取的问题,研究了基于地基光学系统的目标姿态反演的空间目标识别技术,利用光度数据萃取出有用信息,反演出目标的姿态等信息,对于空间态势感知具有重要意义。

本文根据国内外文献的归纳总结,全面阐述了目前基于光度数据的姿态反演技术,归纳为3类方法:基于相位角的姿态反演方法、基于极值点的姿态反演方法和基于非线性滤波的姿态反演方法。重点分析了基于非线性滤波的姿态反演方法,对影响非线性滤波姿态反演的关键问题进行了详细分析,包括形状反演、双向反射分布函数(BRDF)模型与材料识别、非线性滤波算法等。

2 基于光度数据的姿态反演进展

光度数据的价值体现在光度随时间变化,不仅与太阳-目标-观测者角度(相位角)有关,还与目标的位置、速度、形状、姿态、表面积以及表面材料等因素有关。基于光度数据的空间目标特征反演作为目标特征获取的有效途径,已经发展了近30年^[2-3]。借鉴天文学基于光度数据对行星形状反演的思想,根据空间目标的特殊性,进一步从光度数据中获取高价值的空间目标信息,并能够反演出空间目标形状、姿态、质量、反射比以及表面特性等信息^[4]。

为了便于分析比较,从处理光度数据方式的角度,将基于光度数据的姿态反演方法总结归类为:基于相位角的姿态反演方法、基于极值点的姿态反演方法和基于非线性滤波的姿态反演方法。

2.1 基于相位角的姿态反演方法

光度数据随时间变化的序列值称为光度曲线,其实质是相位角随时间变化而引起观测亮度的变化。基于相位角的姿态反演早期用于天文学上行星姿态反演,直接应用就是利用基于三轴椭球模型的振幅方法即A方法、量级方法即M方法或者不依靠任何假设模型的纪元方法即E方法等经典方法确定行星自转速率和自转轴指向的研究,具体分析过程如图1所示。

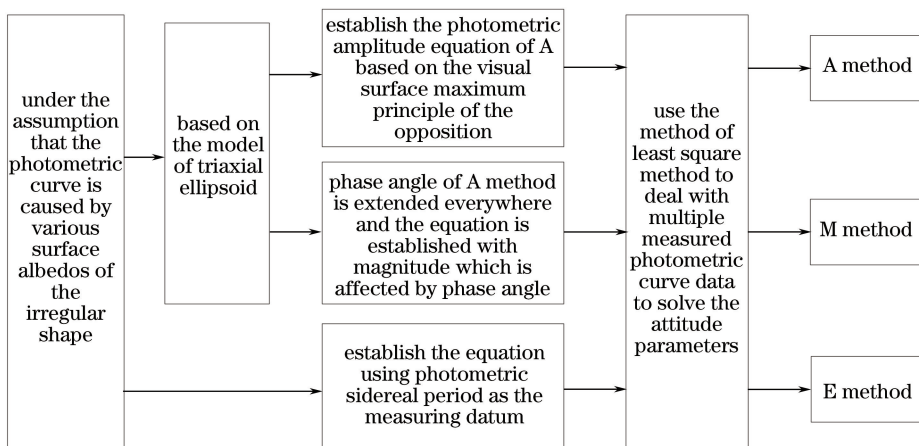


图1 基于相位角的姿态反演方法分析过程

Fig. 1 Flow chart of attitude estimation based on phase angle

应用方面,1959年起张钰哲等运用此方法反演小行星的自转轴指向和自转周期^[5-6]。2001年Kaasalainen等^[7]利用测量的10000多条光度数据,获得80多个行星模型的同时反演出了35个行星模型的公转周期以及自转轴指向。2005年Hall等^[8]首次将光度数据反演行星姿态的思想应用到人造空间目标姿态反演和形状确定上,2006年其基于E方法思想^[9],利用空军毛伊岛光学和超级计算(AMOS)天文台的AEOS 3.6 m望远镜观测数据反演了美国宇航局(NASA)的IMAGE卫星的自转速率和天线状态,卫星在遥

测信号消失的 170 天内自转轴保持稳定,但自转速率逐渐减缓,而且丧失了接受任何指令的能力,判断出了卫星运行状态。2014 年美国海军实验室的 Binz 等^[10]利用该研究中心的 1 m 望远镜,在相位角允许的前提下重复多次测量了近轨道退役卫星的光度数据,并且从中提取出了卫星的翻滚速率,误差保持在 1% 以内。

基于相位角的姿态反演方法利用不同相位光度幅值的特殊变化规律,能够反演目标的自转轴指向,适用于体积较大的目标。其中 A、M、E 方法均能够反演目标的自转轴指向,M 方法摆脱了相位角强约束的制约,比 A 方法具有更强的相位角适用范围;E 方法相比 A、M 方法不需要先验模型即可反演目标的自转轴指向和公转恒星周期,具有更强的应用价值(表 1)。因此,可以利用基于相位角的姿态反演方法对空间稳定高轨道卫星的姿态状态进行周期性监视。

表 1 基于相位角的姿态反演方法

Table 1 Attitude estimation based on phase angle

| Method | Prior shape model | Phase angle range | Advantage | Disadvantage | Inversion content |
|--------|--------------------|-------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------|
| A | Triaxial ellipsoid | Opposition | Only need three sets of datas for inversion | Couldn't meet the opposition always | Polar direction |
| M | Triaxial ellipsoid | Any | None limit of phase angle | Just use special point of the photometric data | Polar direction |
| E | None | Any | Suitable for the irregular light curves of planets | Good repeatability of the light curves | Polar direction and sidereal period |

基于相位角的姿态反演方法的缺点是难以对特定目标进行连续跟踪观测,如图 1 所示,其需要多条光度曲线数据进行求解,而且多周期测量的光度数据重复性不稳定,导致反演精度低。同时,对于具有太阳帆板的卫星等大目标,此类方法不能反演单个面的指向,也不能反演目标本体的详细姿态变化,因而制约了其应用。

2.2 基于极值点的姿态反演

与 2.1 节不同,2.2 节所提方法主要针对太阳帆板等大平面目标的指向反演。极值点是光度曲线中的最大值点或突变亮点,也称闪点。基于极值点的姿态反演方法是一种根据光度曲线极值点位置确定目标指向的姿态定性分析方法,其基本思想是当相位角二等分线(PAB)指向与平面目标表面法向一致,或与圆柱体目标轴向矢量垂直时,发生镜面反射导致目标亮度突变,据此确定目标指向。发生镜面反射时,能够根据观测者相对太阳和目标的位置确定极值点时刻的 PAB 指向^[11],原理分析如图 2 所示。对于高轨道卫星(GEO)和地球同步轨道卫星(GSO),由于卫星帆板追踪太阳,在地球阴影外,可利用目标亮度最大时的 PAB 指向确定帆板的指向;对于纳卫星,利用极值点的微变幅值判断卫星是否带有柱状天线,根据极值点的 PAB 指向判断天线指向,根据光度数据观测序列值判断天线的姿态变化。

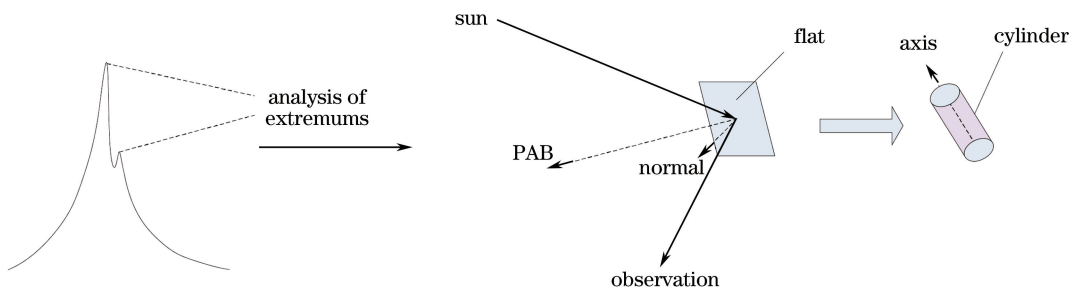


图 2 基于极值点的姿态反演方法示意图

Fig. 2 Illustration of attitude estimation based on extremums

由于空间目标包含大面积单面(太阳帆板等),稳定卫星、低速旋转卫星经过观测路径时观测亮度会产生明显的亮暗变化,卫星表面不同结构相对光源和探测器的姿态变化也会造成观测亮度的明暗变化,因此能够利用这些特征判断卫星大平面的存在及其指向。

2006 年 Payne 等^[12]基于光度曲线极值点位置,系统分析了美国本土及太平洋地区的 36 颗 GEO 卫星的光度特征,确定了卫星帆板的指向补偿角。Scott 等^[13]利用 GEO 卫星光度数据极值点位置变化成功地

卫星总线型号进行分类,对翻滚卫星和三轴稳定卫星的状态进行了区分识别。Schildknecht 等^[14]利用光度曲线极值点信息分析了卫星的稳定状态。2010 年 Hall^[15]分析了美国 Galaxy15 卫星失控前后的光度曲线,发现在光度曲线变化趋势一致性比较强时,卫星保持着正常的稳定姿态;而在两个极值点出现后,卫星经历了复杂的旋转,太阳能帆板不能正常指向太阳而失去了作用;系统自动断电重启后,卫星开始接收、执行地面指令且重获稳定姿态。整个光度数据极值点分析过程证实了基于光度曲线变化趋势及极值点用于卫星故障分析的可能性。

国内尚未开展利用光度数据极值点方法反演卫星姿态的研究。通过分析可知,基于极值点的姿态反演方法能够定性分析大多数 GEO 稳定目标指向,且利用相位角二等分线方向确定目标指向简单方便。对于空间高轨非合作目标,可以根据光度曲线的极值点变化规律确定目标的帆板指向及其功能性结构组成;对于空间失控目标,可以根据极值点的特殊变化规律分析目标的运转状态及其翻滚周期。但是此类方法存在与 A、M、E 方法类似的缺陷,即需要对目标进行连续的观测,而且对于单个测站,因受位置约束不一定总能观测到极值点。同时,此类方法因不能反演目标本体的姿态变化,进而不能充分识别目标,这是制约该方法应用的最大因素。

2.3 基于非线性滤波的姿态反演

上述两种方法只能获得目标的自转轴指向、旋转速率和大平面法线指向等姿态,无法获取目标本体准确的姿态角信息,并实时监控目标机动状态和稳定状态。为解决该问题,2007 年 Ronald 等提出了基于非线性滤波的姿态反演方法。该方法通过建立包含过程噪声和量测噪声在内的系统状态方程和观测方程,如(1)式和(2)式所示,将目标姿态等参数反演看作非线性动态系统的滤波估计问题,利用光度数据(星等值)作为观测值估计目标的状态。

用欧拉角描述姿态状态, ω 表示旋转速率, θ^p 表示从惯性坐标系到本体坐标系按 3-2-1 顺序旋转的欧拉角,分析目标的运动特性,则状态方程可描述为

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^p \\ J\dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B(\theta^p)\omega \\ -\omega \times J\omega \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 θ 为描述姿态的 3 个欧拉角, J 为对角化的目标转动惯量。

用欧拉角描述姿态时,从惯性坐标系到本体坐标系统的姿态矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos \theta_2 & \sin \theta_1 \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \\ -\cos \theta_3 \sin \theta_1 + \sin \theta_3 \sin \theta_2 \cos \theta_1 & \cos \theta_3 \sin \theta_1 + \sin \theta_3 \sin \theta_2 \sin \theta_1 & \sin \theta_3 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_3 \sin \theta_2 \cos \theta_1 & -\sin \theta_3 \cos \theta_1 + \cos \theta_3 \sin \theta_2 \sin \theta_1 & \cos \theta_3 \cos \theta_2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

用星等值作为观测值的观测方程为

$$H = M + \tau, \quad (3)$$

式中 $M = -26.74 - 2.5 \lg [I(\rho, A, s, t)]$ 为折算的星等值, ρ 为 BRDF 模型的参数集, A 为观测目标可视面的面积, s 和 t 分别为经过姿态矩阵旋转的太阳方向矢量和测站方向矢量, I 为观测光强, τ 为观测噪声。

通过分析可知上述状态空间表示的动态系统为非线性系统,可以利用非线性滤波的方法进行姿态等状态估计。

2007 年 Jah 等^[16]首次使用滤波技术反演目标特征,采用 Phong 模型^[17]光度数据,融合相位角和光度数据,用 Sigma 点滤波器框架(ODESSA)完成了对卫星特性的描述。2009 年 Wetterer 等^[18]在假设形状、轨道以及观测环境已知前提下,首次使用无迹卡尔曼滤波(UKF)处理 Cook-Torrance 模型^[19]光度数据,估计了火箭弹体模型的姿态。2013 年纽约州立大学 Linares 等^[20]利用基于 UKF 的多模型自适应估计(MMAE)方法反演未知目标的形状和姿态,仿真反演目标位于模型库内与不在模型库内两种情形的姿态,反演使用的光度数据由各项异性的 Phong 模型生成。仿真模型不在模型库时,姿态估计和旋转速率估计的精度因形状模型的不确定而降低,当且仅当初始姿态与真实姿态的偏差在 30° 之内时,才能收敛到真实姿态。2014 年 Wetterer^[21]采用 Ashikhmin-Shirley 光照模型^[22],利用 UKF 处理不同假设形状/姿态的 GEO 卫星的光度数据,反演了目标姿态、角速率以及表面参数,成功区别了几种假设卫星的形状和姿态。

UKF 对非线性高斯系统的姿态反演精度高、稳健性好、速度快,但在姿态反演中存在严重的不适用性。采用包含镜面反射的 BRDF 模型(如 Cook-Torrance 模型)对光度数据进行仿真,观测方程的非线性极强时存在多解问题,而且后验概率密度函数呈现非高斯性并存在多峰现象,由于 UKF 收敛半径有限,仅能够推迟必然的发散,无法从根本上解决发散问题。另外,当姿态反演采用的形状模型存在偏差时,系统具有很强的非线性,UKF 只有在姿态初始值与真实值的偏差很小时才能收敛。为解决此类问题,可以采用适用性更强的粒子滤波进行姿态反演。

2014 年纽约州立大学 Linares 等^[23]采用 Phong 模型仿真目标在太空的光度,利用粒子滤波(PF)处理光度数据,以足够的准确度反演了形状已知目标的姿态和旋转速率。PF 对非线性问题和对称形状的姿态估计问题展现了明显的优势。对于形状对称目标,姿态反演中可能出现多峰现象。随着样本粒子数量的增加,PF 成功抑制了多峰现象,展现出对处理光度数据引起的非高斯问题、多峰问题的明显优势。

2012 年美国德州农工大学 Holzinger 等^[24]结合 Lambertian 漫反射模型和 Cook-Torrance 模型仿真光度数据,利用重要性重采样粒子滤波技术研究了外力矩、质量、形状模型未知情形下机动、被动旋转目标的姿态估计问题。尽管在动态模型中引入角速度不确定模型和噪声会增大状态的不确定性,但 PF 仍能使误差收敛到零值。2015 年 Coder 等^[25]采用组合的时变零均值高斯白噪声辐射模型代替时不变零均值高斯白噪声经验模型,并采用时变马尔可夫过程加速度动态模型作为目标机动的未知力矩,应用 MPF 成功反演了单自由度的目标姿态。

UKF 在形状模型存在偏差以及系统获取的测量模型非线性很强时,难以维持收敛。PF 作为一种基于概率的状态近似算法,在处理非线性非高斯系统的参数估计和状态滤波问题中具有一定的优势。对于空间非合作目标而言,目标的真实形状难以获取,在形状模型偏差方程中引入形状模型不确定性可以消除滤波中模型不确定性带来的影响,粒子滤波能够以较高精度反演目标的姿态,具有较强的稳健性和适用性。

综上,基于相位角的态度反演方法能够反演目标的自转轴指向和自转周期,但不能反演目标特殊结构的指向以及本体运转的姿态变化;基于极值点的姿态反演方法能够反演稳定目标大平面的指向和不稳定目标的翻滚周期,但仍不能反演目标本体的姿态变化;而基于非线性滤波的姿态反演方法能够高精度地解决目标本体姿态反演的问题,是姿态反演研究的热点。

3 基于非线性滤波的姿态反演关键问题

基于非线性滤波的姿态反演技术通过批量处理多种光照条件和相对姿态下的光度数据,能够近实时地滤波估计目标姿态、角速率、相对惯性矩和形状模型,是目前姿态反演的热点,也是空间目标特征反演的主要方向。但其仍需突破以下 3 个关键问题。

3.1 形状反演

形状反演是姿态反演的重要前提。空间目标的形状模型是非线性滤波姿态反演前向模型的输入,直接影响目标姿态估计的精确性和定向参数的观测性。姿态和形状耦合性高,形状已知模型姿态估计精度高,形状模糊模型姿态估计精度差。假设观测目标由多个微面元构成,目标有效观测亮度则是目标所有可视面亮度之和。对于一般棱柱体,观测亮度与棱柱面的数量相关。棱柱面增加时,观测亮度变化的频率和幅值均增加;棱柱面个数为无穷大时,棱柱近似于圆柱,趋于光滑的对称形状,观测亮度变化较弱,很难从中提取任何姿态信息,估计可观性差。

在非线性滤波姿态反演过程中,为了解耦形状对姿态反演的影响,除 MMAE 算法采用丰富的模型库规避形状模型不确定性带来的不利影响之外,国外学者多以已知凸体形状模型作为输入,然后针对该空间目标的姿态反演问题进行研究。然而对于空间非合作目标,无法准确已知目标形状,采用非线性滤波方法时,如果不考虑形状模型和真实形状之间的偏差,滤波器很难收敛,即形状反演的精度严重影响姿态反演的精度。

通过对文献[7,12,20,26-39]的总结,将空间目标形状反演的方法进行比较归纳,如表 2 所示。

表 2 形状反演的方法比较
Table 2 Comparison of shape inversion methods

| Method | Principle | Advantage | Disadvantage | Applicable condition |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Gaussian density function | Use the Gaussian density function with support function to determinate the unique shape | Easy to estimate the convex and concave body theoretically | Significant error about the estimation of satellite's shape | Heavy natural objects |
| | Matching the curve of unknown object with one of the known models | To directly estimate the true shape with rich model library | Observation curves are various about different station | Objects that could be continuously observed |
| Vector | Use the octant to obtain the removable control points | No prior information | Significant error about control points with weak stability | Arbitrary objects |
| Nonlinear filtering | Multiple filters corresponding to more shapes are used to estimate the unknown shape | Could match the true shape with abundant shape models quickly | Need more filters with the number of known shapes | Need accurate shape models and the Cr/A is known |

由表 2 可知,形状反演的方法有 4 种:高斯面密度法、模型匹配法、基于非线性滤波的向量法以及多模型自适应估计法。每种方法都有其优缺点和适用性,基于非线性滤波的多模型自适应估计法建立了丰富的形状模型库,可以利用稀疏的数据通过不断的匹配,滤波估计出准确的空间目标形状,且该方法的稳定性好、精度高,优于其他 3 种方法,成为形状反演的热点。

3.2 光谱 BRDF 模型及材料识别

光谱 BRDF 描述的是入射光线在某个反射方向的相对能量,可以近似表征不同材料的表面光学散射特性。对于行星表面散射特性的描述,可以在选取 BRDF 模型时将镜面反射所占比重近似为零,即表面反射特性为朗伯体漫反射。卫星的典型部件如本体、帆板和天线的组成材料均不相同,预示着不同结构具有不同的表面散射特性,所以仿真的光度数据需要严格按照卫星不同结构的表面特性选用不同的 BRDF 模型来模拟合成。

BRDF 模型作为非线性滤波姿态反演的基础,关乎仿真光度数据的逼真度和一致性,且在非线性滤波姿态反演过程中,其是系统观测方程的主要部分,直接影响姿态反演的准确性和稳定性,所以模型的正确选取及其参数确定是姿态反演的一个重点问题。即便 BRDF 模型经过很多年的研究已经形成了经验统计模型、物理模型和半物理模型 3 类,而且国内学者也进行了相关的改进和基于 BRDF 模型的空间目标光度研究^[40-42],但是空间目标的表面特性不是一个简单模型所能准确描述的。所有 BRDF 模型都有其适用的材质和环境^[43],适当的模型能够高保真地模拟材质表面散射特性。但是,即便已知目标的计算机辅助设计(CAD)结构和微面元的 BRDF 模型,在大气环境的影响下,测得的光度数据也只有理论意义,实际偏差很大,目前没有一种 BRDF 模型仿真出 GEO 卫星帆板作用下极值点的存在^[44],所以其改进将是影响姿态反演精度的重点。但是空间目标受外太空环境影响表面材料会发生褶皱、材质属性退化,表面光学特性将发生变化。即便在实验室内对已知空间目标的材质属性,有了合适的 BRDF 模型,仿真的光度数据和实测的光度数据也存在一定偏差。对于空间未知目标,表面材料属性难以获悉,只能估计其表面的 BRDF 数值,这就要求对空间目标部分材料进行识别,确定仿真所适用的模型及其参数。

空间目标材料识别与碎片识别的方式类似,通过与已知材料的连续反射光谱特性和多波段光谱特性曲线比较,从而分辨空间材料的类型。光谱解混技术采用数学算法对混合光谱信号进行分解,将获取的点目标混合光谱集分解为单个光谱,根据不同材料连续反射光谱特性曲线的峰值、斜率、形态、特征窄波段和吸收谱线等特征确定相应的材料,分析混合光谱中材料的成分。光谱解混技术最早应用于地物识别中,2003 年被引入到空间目标材料识别中^[45],目前光谱解混技术在空间目标材料识别中的应用还在进一步研究中^[46-47]。利用多波段反射光谱的色指数差异也可以识别空间材料。2010 年 Cowardin 等^[48]对常用空间材料的色指

数进行了测定,通过比较不同材料在太阳光修正前的色指数差异,证实了通过观测碎片色指数估计目标表面材料组成在理论上是完全可行的。

合适的 BRDF 模型能够高逼真地模拟目标表面散射特性,准确地仿真目标观测光度数据,进而能够准确地反演目标姿态;空间目标材料识别技术能够为 BRDF 模型的正确选用提供现实依据和参考,对目标姿态等特征的反演具有推进作用。因此,BRDF 模型的选取、改进与空间目标材料识别技术将是空间目标姿态等特征反演需要研究的重点问题。

3.3 非线性滤波

非线性滤波算法作为光度数据处理的中枢,是非线性滤波姿态反演的核心技术,决定着反演的精度和实时性。无损卡尔曼滤波和 PF 是目前基于非线性滤波的姿态反演中主要采用的方法。UKF 相比 PF 在非线性和高斯系统中的精度和稳定性较好,但是在非线性非高斯系统中,因为 UKF 的样本点根据确定算法算出,其估计误差并不是一直收敛,而 PF 的粒子是随机选择的,样本量足够大时估计误差可以收敛,使得 PF 具有更优的精度和稳定性。

在姿态反演过程中,系统的测量方程非线性很强时,UKF 因收敛半径有限,不能收敛到真实状态。PF 继承了贝叶斯估计的优点,初始概率密度函数满足均匀分布,可以生成更大范围的参数空间,能够解决对称目标姿态反演中的多解问题。通过近似遍及姿态状态的均匀分布,能够处理非线性反演问题,克服了非线性带来的姿态协方差受限的约束。滤波反演过程中添加额外参数(形状、质量、相对惯量等辅助信息)进行多状态估计,会带来新的非线性问题,卫星机动状态的姿态滤波估计也会引入新的非线性问题,所以需要研究针对非线性非高斯分布的反演方法。

PF 已在同时定位和绘图(SLAM)、计算机视觉和可视化跟踪、现代目标跟踪和数据融合等领域解决了复杂的非线性非高斯问题,而且运行结果精度高、可靠性强^[49-51],能够解决卫星姿态反演方面的相关问题,具有广阔的应用前景。随着计算机性能的快速提升,PF 计算量大的问题将得到很好地解决,PF 将得到更广泛的应用。

4 结 论

通过对基于光度数据的空间目标姿态反演相关文献进行分析总结,可得出如下结论:

1) 基于相位角的姿态反演方法可用于稳定大目标的周期性姿态监视;基于极值点的姿态反演方法可用于卫星大平面结构的指向确定以及卫星翻滚状态的判断。但这两种方法,均不能近实时地反演空间点目标本体的姿态变化。

2) 基于非线性滤波的姿态反演方法可以连续、稳健地估计姿态参数,高精度地反演出目标本体的姿态等特征,能够解决卫星稳定状态和机动状态的姿态反演问题,是未来姿态反演的热点。而 PF 能够处理非线性非高斯问题,更适合复杂的非线性滤波的姿态反演问题。在未来空间目标监视中,PF 不仅可以应用于空间稳定目标的姿态反演,也可以用于机动目标的姿态反演。

3) 目标形状影响目标姿态反演的精度和定向参数的观测性,非线性滤波姿态反演的精度高度依赖形状模型,形状模型的反演是姿态反演的一个关键问题。相比其他方法,基于非线性滤波的形状反演法可以通过不断的匹配,估计出准确的空间目标形状,具有稳定性好、精度高的优势。

随着空间态势感知地位的不不断提升,亟需开展类似基于光度数据的姿态反演的研究以及相关 BRDF 模型和材料识别的基础研究,从而提升地基光学设备的空间目标监视能力。基于光度数据的姿态反演为空间目标监视、识别和预警提供了新的技术支持。但影响空间目标光度数据的因素众多,给空间目标姿态等特征反演带来了许多挑战,在进行多状态估计的同时,因缺少必要信息可能导致反演结果不唯一。解决此类问题,需要综合多种因素,融合多元数据如轨道数据、热辐射数据和光谱数据等,或者引入不同波段的光度数据,在丰富相关信息的基础上,研究适用性更强、实时性更好的反演方法。

致谢 感谢宋一铎和王阳对论文写作的指导。

参 考 文 献

- 1 Geng Wendong, Du Xiaoping, Li Zhi, *et al.* Introduction to space situational awareness[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2015: 8-13.
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: 8-13.
- 2 Kaasalainen M, Lamberg L, Lumme K, *et al.* Interpretation of lightcurves of atmosphereless bodies, I: General theory and new inversion schemes[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1992, 259(4): 318-332.
- 3 Kaasalainen M, Lamberg L, Lumme K, *et al.* Interpretation of lightcurves of atmosphereless bodies, II: Practical aspects of inversion[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1992, 259(4): 333-340.
- 4 Richard L. Probabilistic identification and discrimination of deep space objects via astrometric and photometric data fusion [D]. Buffalo: State University of New York at Buffalo, 2013: 193-333.
- 5 Yu Xiaoping, Zhao Haibin, You Zhong. Inverse problem research about shape determinant of asteroid from lightcurves [J]. *Macau University of Science and Technology Daily*, 2013, 7(1): 102-106.
虞晓平, 赵海滨, 尤 众. 小行星光变曲线反演形状模型的算法研究[J]. *澳门科技大学报*, 2013, 7(1): 102-106.
- 6 Li Bin. The photometry and shape inversion study of asteroids[D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2012.
李 彬. 小行星测光和形状反演研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- 7 Kaasalainen M, Torppa J. Optimization methods for asteroid lightcurve inversion shape determination[J]. *Icarus*, 2001, 153(4): 24-36.
- 8 Hall D, Africano J, Kervin P, *et al.* Non-imaging attitude and shape determination[C]. *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, 2005.
- 9 Hall D, Africano J, Archambeault D, *et al.* Amos observations of NASA's image satellite[C]. *The 2006 AMOS Technical Conference Proceedings*. 2006: E76.
- 10 Binz C R, Davis M A, Kelm B E, *et al.* Optical survey of the tumble rates of retired GEO satellites[R]. Washington DC: Naval Research Lab, 2014.
- 11 Hall D, Calef B, Knox K, *et al.* Separating attitude and shape effects for non-resolved objects[C]. *The 2007 AMOS Technical Conference Proceedings*, 2007: 464-475.
- 12 Payne T, Gregory S, Luu K. SSA analysis of GEOS photometric signature classifications and solar panel offsets[C]. *The Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, 2006, 1: 73.
- 13 Scott R, Wallace B. Satellite characterization using small aperture instruments at DRDC Ottawa[C]. *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, 2008: 337-347.
- 14 Schildknecht T, Vannanti A, Krag H, *et al.* Reflectance spectral of space debris in GEO[C]. *Advanced Maui Optical & Space Surveillance Technologies Conference*, 2009: 220-227.
- 15 Hall D. AMOS galaxy 15 satellite observations and analysis [C]. *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. 2011: E12.
- 16 Jah M, Madler R A. Satellite characterization: angles and light curve data fusion for spacecraft state and parameter estimation[C]. *Advanced Maui Optical & Space Surveillance Technologies Conference*, 2007: 49.
- 17 Phong B T. Illumination for computer generated pictures[J]. *Communications of the ACM*, 1975, 18(6): 311-317.
- 18 Wetterer C J, Jah M. Attitude estimation from light curves[J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 2009, 32(5): 1648-1651.
- 19 Cook R L, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics[J]. *Computer Graphics*, 1981, 15(3): 307-316.
- 20 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*, 2013, 37(1): 13-25.
- 21 Wetterer C J. Shape, surface parameter, and attitude profile estimation using a multiple hypothesis unscented Kalman filter[C]. *AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, 2014: 14-303.
- 22 Ashikhmin M, Shirley P. An anisotropic Phong BRDF model[J]. *Journal of Graphical Tools*, 2000, 5(2): 25-32.
- 23 Linares R, Crassidis J L, Jah M K. Particle filtering light curve based attitude estimation for non-resolved space objects [C]. *AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, 2014: 14-210.

- 24 Holzinger M J, Alfriend K T, Wetterer C J, *et al.* Attitude estimation for unresolved agile space objects with shape model uncertainty[C]. Advanced Maui Optical & Space Surveillance Technologies Conference, 2012: 25.
- 25 Coder R D, Linares R, Holzinger M J. Improved models for attitude estimation of agile space objects[C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies (AMOS), 2015: 15-231.
- 26 Liu Hao, Du Xiaoping. Development of shape estimation of space target based on lightcurve inversion[J]. Chinese Journal of Optics, 2015, 8(5): 744-754.
刘浩, 杜小平. 光度曲线反演空间目标形状的发展现状[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 744-754.
- 27 Kaasalainen M, Torppa J. Optimization methods for asteroid lightcurve inversion, II. The complete inverse problem[J]. Icarus, 2001, 153(4): 37-51.
- 28 Calef B, Africano J, Birge B, *et al.* Photometric signature inversion[J]. SPIE, 2006, 6307: 63070E.
- 29 Ben K B, Penina A. Lightcurve inversion for shape estimation of geo satellites from space-based sensors[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2014, 32(1): 33-35.
- 30 Zhang Xiang, Ji Jianghui. Ground-based Radar detection of near-earth asteroids[J]. Progress in Astronomy, 2014, 32(1): 24-37.
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.
- 31 Wetterer C J, Clayton S, Stikeleather J. Lightcurve inversion program for non-resolved space object identification[J]. Maui High Performance Computing Center: Application Briefs, 2006: 8-9.
- 32 Tang Yijun, Jiang Xiaojun, Wang Jianfeng, *et al.* Diffuse reflection optical characteristics of three-axis stabilization GEO satellite[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(11): 2863-2866.
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.
- 33 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.
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.
- 34 Zhao Yangsheng. Analysis and modeling of optical properties of space target[D]. Beijing: Equipment Academy, 2010.
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.
- 35 Payne T, Gregory S, Tombasco J, *et al.* 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 Conference, 2007: 50.
- 36 Fulcoly D O, Kalamaroff K I, Chun F K. Determining basic satellite shape from photometric light curves[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2012, 49(1): 76-82.
- 37 Linares R, Jah M K, Crassidis J L. Inactive space object shape estimation via astrometric and photometric data fusion[C]. AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 2012.
- 38 Linares R, Shoemaker M, Walker A, *et al.* Photometric data from non-resolved objects for space object characterization and improved atmospheric modeling [C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies (AMOS) Conference, 2013: 112-117.
- 39 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]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2010: 2-5.
- 40 Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Practical six-parameter bidirectional reflectance distribution function model for rough surface[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0229001.
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 一种实用型粗糙面六参数双向反射分布函数模型[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0229001.
- 41 Liu Hao, Du Xiaoping, Gou Ruixin. Apparent magnitude measurement of geosynchronous orbit space object based on Phong model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 041502.
刘浩, 杜小平, 苟瑞新. 基于 Phong 模型的地球同步轨道目标视星等仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 041502.
- 42 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, 2013, 37(1): 185-196.
- 43 Ceniceros A, Gaylor D E, Anderson J, *et al.* Comparison of BRDF-predicted and observed light curves of GEO satellites

- [C]. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Maui, Hawaii: the Maui Economic Development Board, 2015, 1: 54.
- 44 Luu K K, Matson C L, Snodgrass J, *et al.* Object characterization from spectral data[R]. Air Force Research Lab Kihei Maui Hi Detachment 15, 2003.
- 45 Cauquy M A A, Roggemann M C, Schulz T J. Approaches for processing spectral measurements of reflected sunlight for space situational awareness[C]. SPIE, 2004, 5428: 48-57.
- 46 Phan D, Patrick M, Anthony D. Unmixing space object's moderate resolution spectra[C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2013: E36.
- 47 Cowardin H, Seitzer P, Abercromby K, *et al.* Characterization of orbital debris photometric properties derived from laboratory-based measurements[C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2010: E25.
- 48 Cheng Shuiying, Zhang Jianyun. Review on particle filters[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(4): 1099-1111.
程水英, 张剑云. 粒子滤波评述[J]. 宇航学报, 2008, 4(4): 1099-1111.
- 49 Wang Chen, Fang Jiancheng. Unscented quaternion particle filter application in micro-satellite estimating attitude[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(5): 552-556.
王 晨, 房建成. 基于 Unscented 四元数粒子滤波的微小卫星姿态估计[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(5): 552-556.
- 50 Chen Xi. Study on particle filter based track-before-detect [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2009.
陈 曦. 基于粒子滤波的检测前跟踪算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- 51 Nie Qi. Nonlinear filtering and its application in navigation system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
聂 奇. 非线性滤波及其在导航系统中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.