科学通报 2017 年 第 62 卷 第 15 期: 1578 ~ 1590
进 展
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

地基光度曲线反演空间目标特征技术研究进展

王阳[1*], 杜小平[2], 范椿林[3]

1. 装备学院研究生院, 北京 101416;
2. 装备学院航天指挥系, 北京 101416;
3. 太原卫星发射中心, 忻州 036303
* 联系人, E-mail: youngerpla@163.com

2016-09-28 收稿, 2016-12-09 修回, 2016-12-09 接受, 2017-02-17 网络版发表

摘要 空间目标的形状、尺寸、姿态、角速度、反射率和材质等特征对目标识别、轨道预测、碰撞规避等应用有重要意义. 地基光学观测系统是目前空间目标观测主要手段之一, 但受大气、距离及自身分辨率的影响, 难以对中高轨或尺寸较小的空间目标进行高分辨成像, 只能呈现几个像素亮度变化的光斑. 空间目标的亮度与目标特征密切相关, 利用地基光学观测系统获取的目标光度曲线, 可以对目标特征进行反演. 本文分析了近10年国际上地基光度曲线反演空间目标特征技术的研究进展, 系统梳理了基于地基光度曲线特征和基于模型构建的空间目标特征反演技术, 详细分析了各技术的用途和优缺点, 提出了未来该领域的研究发展方向.

关键词 光度曲线, 光学观测, 空间目标, 目标特征, 特征反演

地基光学观测系统是进行空间目标观测的重要手段. 随着卫星技术的发展, 卫星尺寸渐小、距地渐远, 通过地基光学观测系统对空间目标进行高分辨率成像已愈加困难, 如图1所示[1], 但是, 仍然可以利用一些技术对空间目标的特征进行提取. 光度曲线表征了目标的观察亮度随时间的变化, 利用地基光学观测系统获取空间目标的光度曲线, 结合一些可行的反演技术, 可以萃取空间目标的形状、尺寸、姿态、反射率、材质等特征[2~6]. 早在1966年, Kissell和Vanderburgh[7]就利用光度特性分析了卫星的特征, 验证了基于地基光度曲线的空间目标特征反演技术的可行性. 此后, 国外有数十家单位先后开展了该技术的研究, 并在近10年取得了突飞猛进的发展, 我国对该技术的研究起步较晚, 尚处于开始阶段. 研究基于地基光度曲线的空间目标特征反演技术, 可以完善空间目标编目、明确空间目标来源、提高地基数据应用效益, 进而提升地基光学系统观测能力.

1 基于光度曲线特征的空间目标特征反演技术

在对空间目标没有先验认知的情况下, 可以通过对光度曲线特征的直接分析, 直观辨识出空间目标的平台类型、角速度、自旋周期等特征. 目前国际上在这一领域的研究主要有基于光度曲线的总体特征、极值特征和周期特征三类方法.

1.1 基于光度曲线总体特征的目标平台类型反演

不同平台类型的卫星, 其呈现的光度曲线的总体特征不同, 根据光度曲线总体特征的不同可以对卫星的平台类型进行反演. 2006年, Payne等人[8]分析了位于美国本土及太平洋地区的36个地球同步轨道(geosynchronous orbit, GEO)卫星的光度特征, 并定义了一种新型的基于光度曲线的分类系统, 按照光度曲线的总体特征将36个卫星分成5大类: 典型类、

引用格式: 王阳, 杜小平, 范椿林. 地基光度曲线反演空间目标特征技术研究进展. 科学通报, 2017, 62: 1578–1590
Wang Y, Du X P, Fan C L. Progress of light curve inversion technology for resident space object characteristics (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 1578–1590, doi: 10.1360/N972016-01082

© 2017《中国科学》杂志社

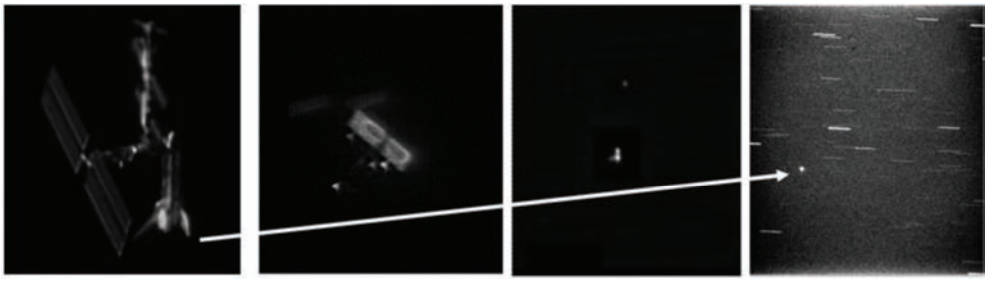


图 1 2.5 m口径光学望远镜对 7 m×10 m目标在不同轨道高度下的成像效果. (a) 200 km; (b) 800 km; (c) 8000 km; (d) 40000 km

Figure 1 2.5 m diameter optical telescope images of a 7 m×10 m space object in different heights. (a) 200 km; (b) 800 km; (c) 8000 km; (d) 40000 km

A2100类、通信类、BSS702C类和特殊类，如表1所示. 以典型类和A2100类为例，两类光度曲线之间的总体特征区别明显，在0相角附近典型类光度曲线呈现为波峰，A2100类光度曲线呈现为波谷，同时两类光度曲线的数量占总体样本的78%，可以利用0相角附近的光度曲线特征快速对两类卫星进行分类[8,9]. 典型类和A2100类光度曲线及对应卫星模型分别如图2和3所示[8]，在图2(a)和3(a)中，横坐标代表相位角，即太阳-空间目标-观测站之间的夹角，纵坐标代表星等，是空间目标亮度的度量单位，星等越小亮度越高.

1.2 基于光度曲线极值特征的目标角速度与典型部件反演

空间目标的闪烁特征是能够在光度观测数据中获取的一个明显特征，在光度曲线中体现为星等的一系列极小值点，如图4所示[10]. 太阳-空间目标-观测站之间的镜面反射是空间目标闪烁特征的主要成因，利用闪烁特征可以确定空间目标太阳能帆板倾斜角度、组件构成及角速度等特征，提高对空间目标的分辨能力.

美国海军天文台的Vrba等人[10]详细分析了卫星闪烁特征的成因，并利用闪烁特征对空间目标太阳能帆板的倾斜角度进行了反演. 基于海军天文台的海军原型光学干涉仪(navy prototype optical interferometer, NPOI)对地球同步轨道卫星进行光度观测，获得了两年4个时段卫星的光度数据，并选取卫星DirecTV-9S在2009年秋分前后连续8夜的观测数据进行了分析，如图5所示. 经过分析，可知卫星存在1 h左右闪烁的原因是因为其太阳能电池阵列存在±3.75°的倾斜而形成的. 而且，基于此特征还能进一步反演空间目标的面积、反射率等参数[10].

2016年，Crassidis和Hinks[11]通过分析空间目标闪烁的持续时间和空间目标角速度的关系，提出了一种通过分析空间目标单个镜面反射的闪烁时长反演空间目标角速度的方法. 该方法的优点是能够不依赖卫星的多光谱数据或频率特性，直接建立光度曲线闪烁时长和空间目标角速度之间的关系. 该方法不够精确，不能给出角速度的准确估值，仅能提供角速度的上下限，但足以分析空间目标非常规的姿态运动.

除了镜面反射导致的空间目标闪烁之外，在一些光度曲线中还存在卫星主体部件、太阳能帆板结构或其他外围结构上一些反射性部件的微弱闪烁，一般幅度约为0.2星等，且持续时间一般只有几分钟，

表 1 光度曲线分类

Table 1 Lightcurve classification

分类	特点	数量	比例(%)
典型类	0相角附近有峰值，在0相角的两边呈对称、平滑单调形式	17	47.2
A2100类	0相角附近有极小值；在0相角两边，光度曲线以不同的平滑方式增加；在±40°左右，曲线平滑衰减，多数曲线不完全对称	11	30.6
通信星类	在典型类基础上, ±40°上有极小值	2	5.6
BSS702C类	在典型类基础上, ±60°上有极大值，极大值比通信星类更亮更宽	1	2.8
特殊类	关于0相角对称性弱，曲线变化不平稳	5	13.9

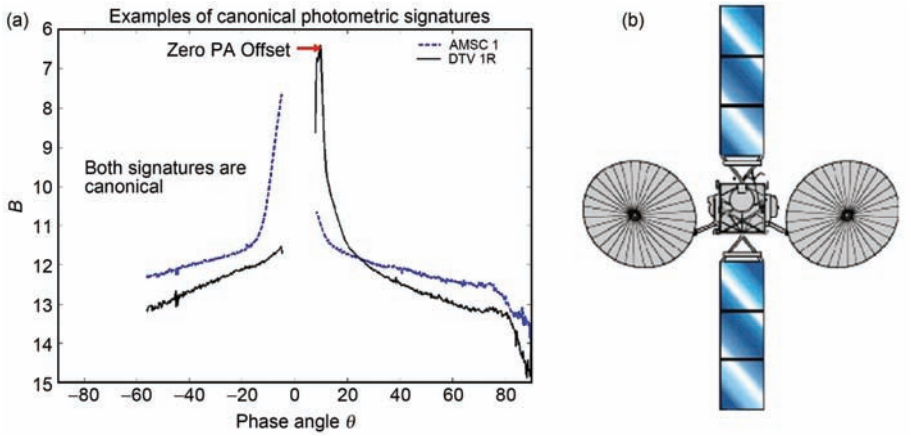


图 2 (网络版彩色)(a) 典型类光度曲线; (b) 典型类卫星模型

Figure 2 (Color online) (a) Canonical lightcurves; (b) canonical satellite model

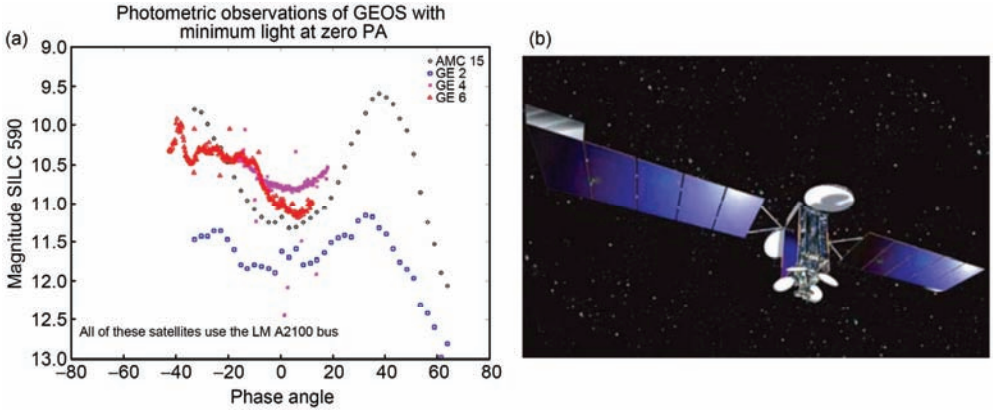


图 3 (网络版彩色)(a) A2100 类光度曲线; (b) A2100 类卫星模型

Figure 3 (Color online) (a) A2100 lightcurves; (b) A2100 satellite model

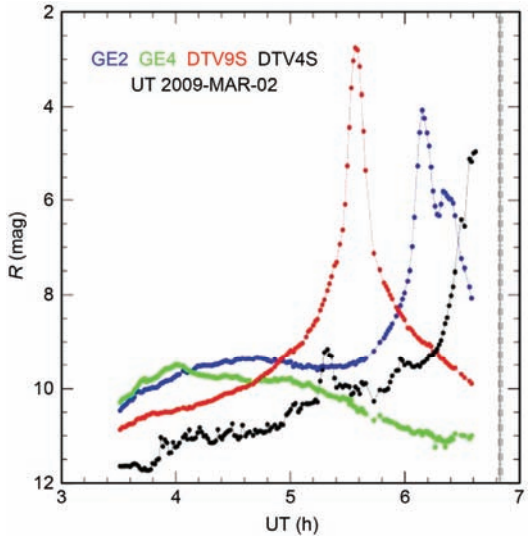


图 4 (网络版彩色)空间目标的闪烁特征

Figure 4 (Color online) Space object glints

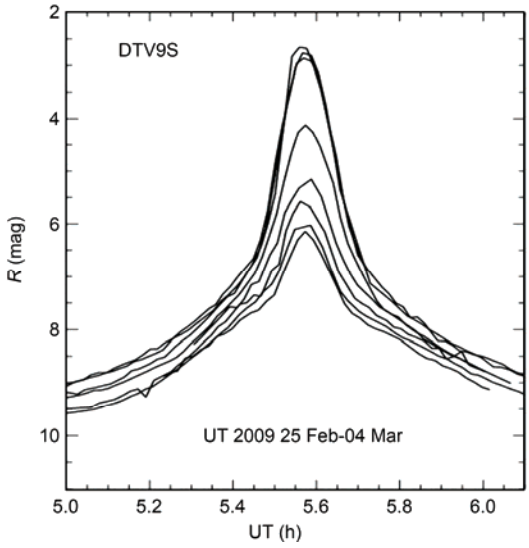


图 5 DTV9S连续 8 夜的光度曲线

Figure 5 DTV-9S glints measured on 8 nighs

同一观测站中会反复出现，基于这些微弱的闪烁能够反演出卫星的部件位置. 由于在本体坐标系下卫星发生闪烁的相角基本相同，通过图6和7所示的本体坐标系下亮度-相角和帆板坐标系下亮度-相角分布可确定该闪烁是卫星本体上的某个部件造成的[12].

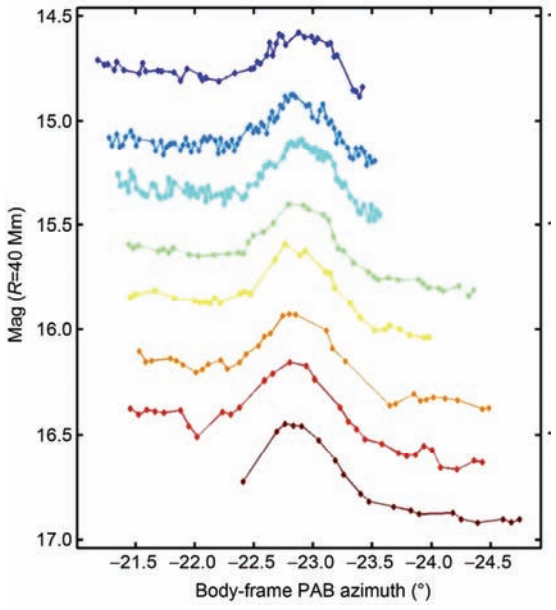


图 6 (网络版彩色)本体坐标系下的目标亮度-方位角分布

Figure 6 (Color online) The magnitude sequence plotted as a function of phase-angle in body-frame

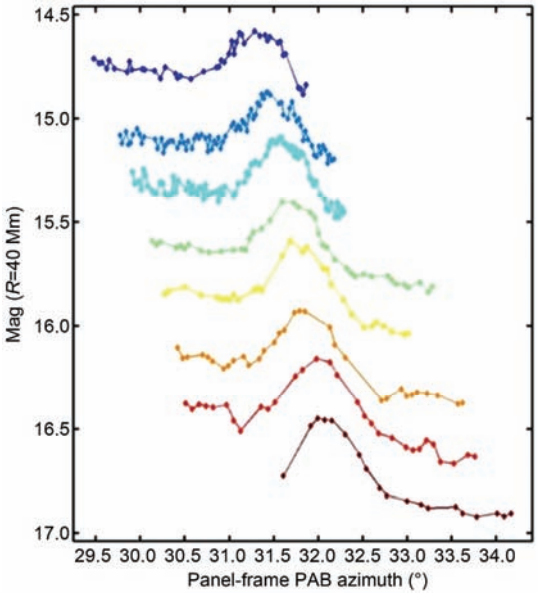


图 7 (网络版彩色)帆板坐标系下的目标亮度-方位角分布

Figure 7 (Color online) The magnitude sequence plotted as a function of phase-angle in panel-frame

1.3 基于光度曲线周期特征的目标自旋周期与工作状态反演

空间目标一般有三轴稳定、自旋稳定和重力梯度稳定三种姿态稳定方式. 对于自旋稳定的空间目标，其光度曲线往往呈现周期性或者准周期性的变化，变化周期与空间目标的旋转周期相对应. 因为光度曲线的周期特征只取决于目标的自旋周期，因此利用该特征能够反演目标的自旋周期和工作状态.

美国NASA和瑞典斯德哥尔摩天文台先后对此开展了研究[13,14]，在此基础上，波音公司综合了卫星、观测站和太阳之间相对运动的影响，将光度曲线周期转换成与其最为匹配的目标自旋周期，对空间目标的自旋周期进行了精确反演[15]. 虽然这种基于光度曲线周期特征的反演方法计算效率很高，但该方法必须满足以下约束条件: (1) 在观测周期内目标处于稳定状态，或者其自旋状态变化缓慢; (2) 自旋速度必须足够快，以保证在单个观测周期内能够测量到光度曲线的周期特征; (3) 目标必须足够快地在观测站上空经过，以测量光度曲线周期与目标自旋周期之间的差异. 该方法2006年已被NASA成功应用于分析与地面测控站失联卫星的稳定状况，并进而判断了其与地面站的联系状态[16].

对于三轴稳定的空间目标，其工作失效时常常处于“翻滚”的状态，可以利用光度曲线的周期特征判断三轴稳定空间目标的工作状态. 2015年，哈尔滨工业大学[17]通过STK仿真卫星三轴稳定和失效翻滚的两种状态，并基于对目标光度曲线的时频分析，判断失效翻滚状态、卫星的不同运动状态及所对应的光度曲线，如图8和9所示. 但该方法仅适用于轨道高度小于400 km的目标，且观测时间不低于目标卫星的2个自转周期.

2 基于模型构建的空间目标特征反演技术

模型构建的空间目标特征反演技术基于所建立的空间目标的形状模型或光度曲线模型，定量估计空间目标形状的姿态、角速度和表面材料等属性特征. 目前主要有基于非线性滤波、建立封闭面元模型、二面元模型和机器学习等方法.

2.1 基于非线性滤波的反演方法

滤波的实质是对系统进行最优的状态估计，利

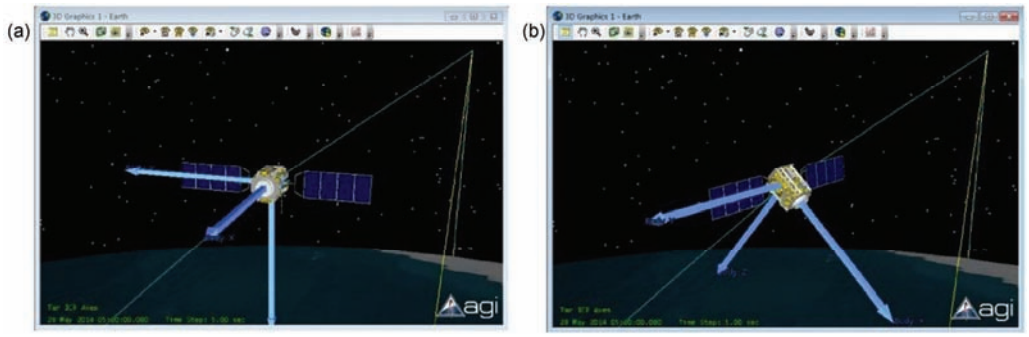


图 8 (网络版彩色) STK仿真的卫星的不同运行状态. (a) 三轴稳定正常工作状态; (b) 失效翻滚状态

Figure 8 (Color online) Simulation of different satellite states by STK. (a) Normal three-axis stabilized working state; (b) failure rollover state

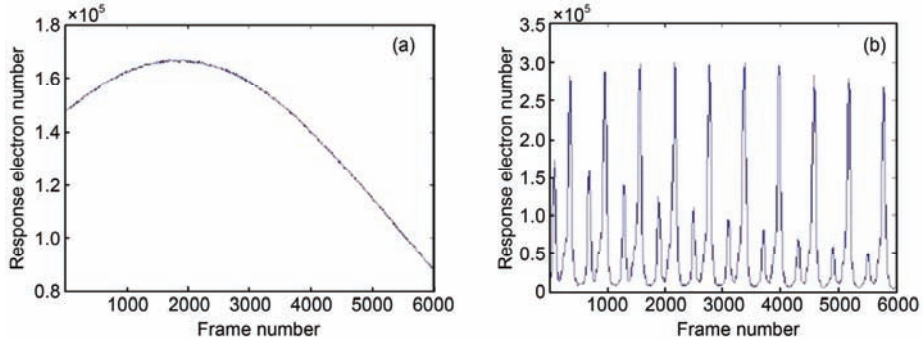


图 9 (网络版彩色)不同运行状态卫星的光度曲线. (a) 三轴稳定正常工作状态; (b) 失效翻滚状态

Figure 9 (Color online) Lightcurves of different satellite states. (a) Normal three-axis stabilized working state; (b) failure rollover state

用滤波技术进行反演的原理是将待反演的空间目标特征参数作为系统的未知状态参数进行最优估计. 空间目标精确的相角数据能够近实时地更新轨道信息, 而空间目标的光度曲线能够提供空间目标的形状和姿态信息, 因此滤波方法需要将相角数据和光度数据进行融合.

美国海洋实验室公司采用无损卡尔曼滤波(unscented Kalman filter, UKF)技术, 通过仿真将空间目标模型化为由多层绝热材料组成的60 m^2太阳指向的平板, 基于卫星TDRS-5的轨道得到了空间目标的相角和光度数据, 利用UKF成功地反演出了空间目标的轨道、面积和反射率, 空间目标轨道及面积反演结果如图10和11所示[18]. 因为UKF是当前状态滤波器, 该方法的实时性很高. 另外, 该方法有很好的扩展性, 若综合太阳辐射压(solar radiation pressure, SRP)加速度对空间目标轨道及其观察亮度的耦合影响, 可以建立与目标物理特征一致的BRDF-SRP模型, 使目标的观察亮度、姿态动力学和轨道动力学之间建立准确的物理关联, 然后利用UKF能够对目标的质量进行估计[19]; 若将空间目标的状态参量扩展, 引入与BRDF相关的不同表面参数, 采用物理特征一致的BRDF-SRP模型, 通过该方法能够反演GEO非控空间目标的位置、速度、姿态、角速率和表面参数[20]. 此外, 在该方法基础上, 结合基于八分圆三角测量法, 利用UKF能够实现空间目标形状估计, 且能同时反演出空间目标的惯性轴指向和轨道. 利用八分圆三角测量法所建立的球状模型及反演结果如图12和13所示[21,22].

虽然UKF的性能较好, 但由于空间目标自身模型参数的不确定性, 造成了UKF估计的系统误差. 为提高UKF性能, 2014年, Wetterer等人[23]比较了UKF和无损施密特卡尔曼滤波器(unscented schmidt Kalman filter, USKF)的性能, 认为USKF能够包含系统建模误差的影响, 在目标姿态估计上结果更为合理, 不确定性估计也更加实际. 此外, 通过构建丰富的空间目标模型采用多个滤波器并行估计的多模型自适应估计(multiple model adaptive estimation, MMAE)方法, 也能解决模型参数不确定性问题. MMAE使用若

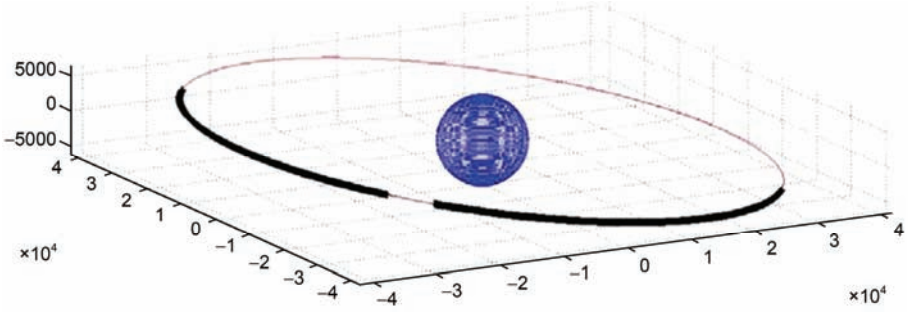


图 10 (网络版彩色)仿真的空间目标轨道
Figure 10 (Color online) Simulation of space object orbit

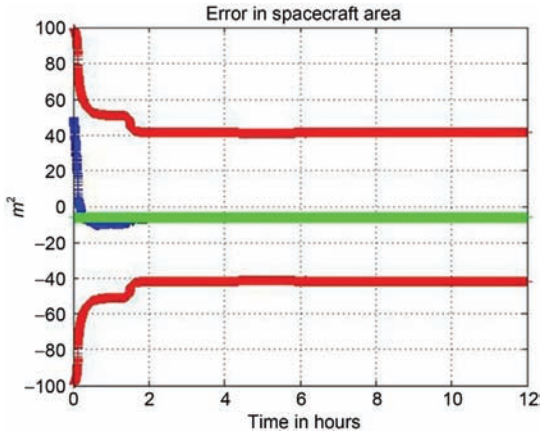


图 11 (网络版彩色)目标面积反演结果
Figure 11 (Color online) Inversion results of space object's area

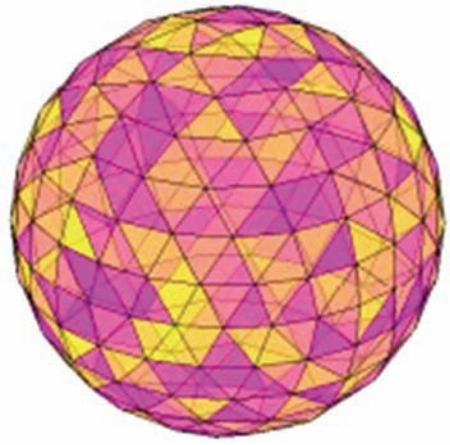


图 12 (网络版彩色)基于八分圆三角测量法建立的球状模型
Figure 12 (Color online) Spherical model built by octant triangulation

干个滤波器，每个滤波器代表唯一的候选模型，通过贝叶斯理论计算每个候选模型的权重，估计结果是各候选模型的加权和. MMAE可以实现空间目标的多个状态估计，确定空间目标最可能的形状特征，并能

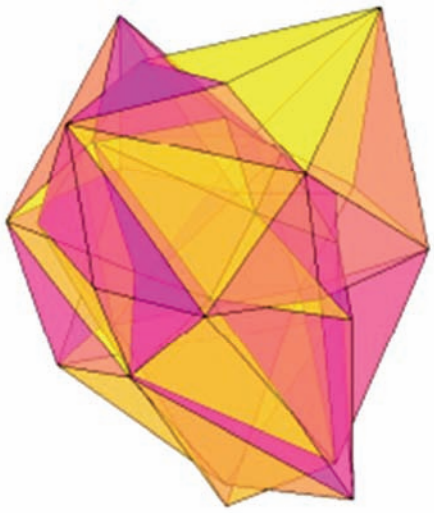


图 13 (网络版彩色)六面体目标的形状反演结果
Figure 13 (Color online) Shape inversion results of hexahedral space object

对空间目标进行分类[24,25]. 与此原理相似的是分层混合专家模型(hierarchical mixtures of experts, HME), 不仅能辨识空间目标的尺寸、形状、反射率等特征, 还能辨识每种特征发生的变化. 两层的HME模型如图14所示, HME由多个专家(状态滤波器)组成, 每个专家有不同的动态方程, 因此每个专家将会对目标的状态产生不同的估计[26,27]. 门网络根据每个滤波器的预测性能为每个滤波估计分配权值, 该方法滤波的输入为空间目标的光度曲线以及赤纬和赤经, 性能总结如表2所示[26].

2.2 基于封闭面元模型的反演方法

为辨识小行星目标的形状和指向, 有学者提出了基于封闭面元模型的形状反演方法[28,29]. 该方法需要建立封闭面元模型, 要求每个面元都具有各自

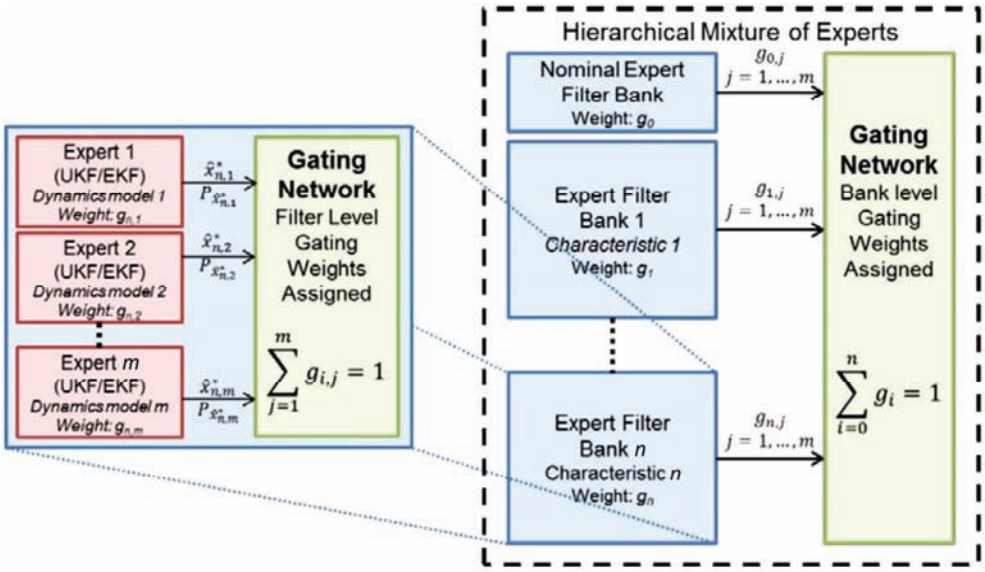


图 14 (网络版彩色)两层的HME模型

Figure 14 (Color online) Two layer hierarchical mixture of experts

表 2 HME的空间目标特征辨识能力

Table 2 HME identification ability of space object characteristics

空间目标特征	是否探测到特征初始值	是否探测到初始值发生的变化	是否探测到发生变化后的特征值
形状	是	是	否
尺寸	是	是	是
反射率	是	是	是
机动行为	可探测到机动行为的量级、方向和时间		

的表面积、法线方向以及表面散射法则. 能够通过光度曲线同时辨识出空间目标的形状、旋转周期、磁极方向以及散射参数, 对于凸面体目标的特性辨识具有较好的性能, 但对于其他形状的目标, 辨识结果可能不唯一. 基于该方法开发的光度曲线辨识软件, 被广泛应用于小行星形状的辨识, Bradley和Axelrad[30]基于该软件讨论了对火箭箭体、高面质比目标、立方体卫星以及带翼盒装卫星等目标进行形状辨识的可行性, 其形状辨识结果如图15所示. 结果表明该方法对于凸面体, 如椭球体、立方体卫星比较适用, 但对于面状目标及带翼盒装目标, 其形状辨识较为困难. 由于该方法没有考虑目标表面的BRDF, 如果加入BRDF辨识效果可能会有所改善, 这也是该方法未来的研究重点.

2.3 基于二面元模型的反演方法

空间目标的形状和运动规律非常复杂, 但是大多数特征是可以被忽略或整合的. 现有的研究已经表明, 地球同步轨道三轴稳定的卫星, 使用二面元模型即可满足基于模型进行相关特征反演的要求. 二面元模型的一个面元代表卫星太阳能帆板, 而另一个代表卫星本体, 如图16所示, 要求帆板面是近似平面, 并有镜面和朗伯反射特性; 本体是具有朗伯反射特性的复杂三维形状, 它在每个相位角有不同的观测姿态[31~35].

基于二面元模型所提出的点配对法, 可以快速反演GEO目标的反射率、面积. 该方法需要找出一对相对太阳能帆板(或本体)具有相同观测条件、不同观测亮度的点, 抵消本体(或帆板)对亮度的贡献, 只剩下帆板(或本体)对亮度的贡献[36]. 点配对法的计算相对简单, 能够快速反演出空间目标二面模型两个面的面积和反射率, 但该方法对观测点的要求十分苛刻, 要求本体反射率、面积对每个观测点的贡献相同, 帆板反射率、面积对每个观测点的贡献不同, 同时要

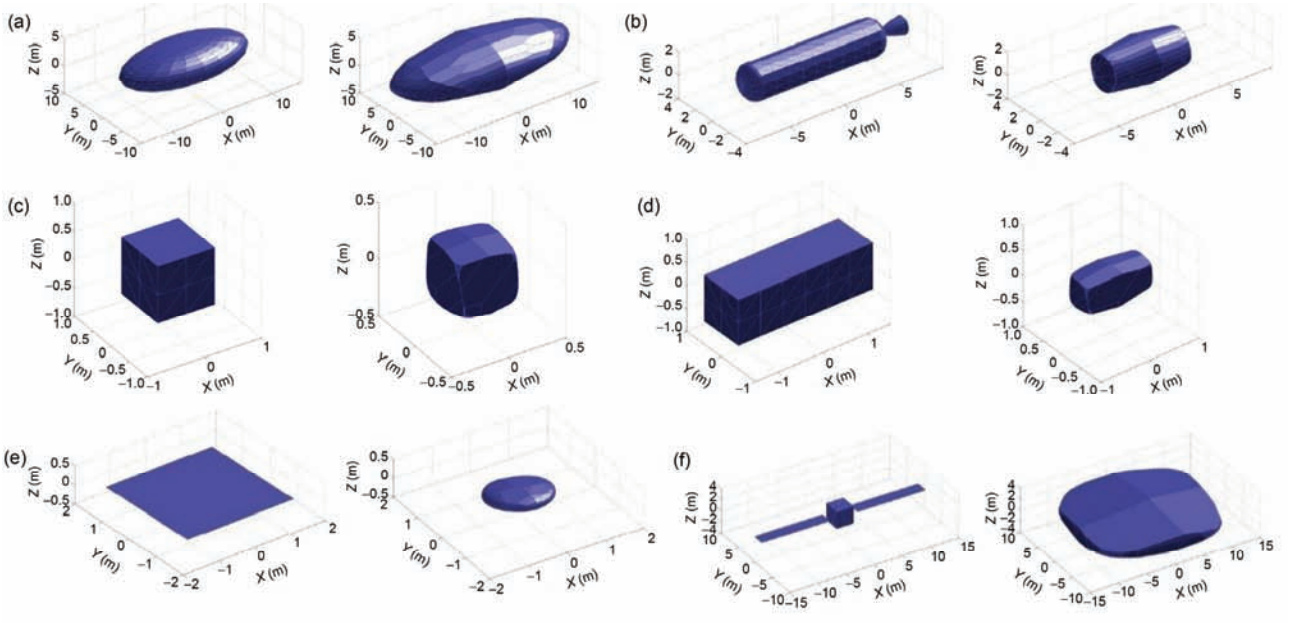


图 15 (网络版彩色)基于封闭面元模型反演方法的辨识结果图. (a) 椭球体; (b) 火箭上面级; (c) 正方体; (d) 立方体; (e) 高面质比目标; (f) 带翼盒状目标

Figure 15 (Color online) Shape inversion results by modeling different space objects as a closed set of facets. (a) Ellipsoid; (b) centaur upper stage; (c) 1U CubeSat; (d) 3U CubeSat; (e) HAMR object; (f) box-wing satellite

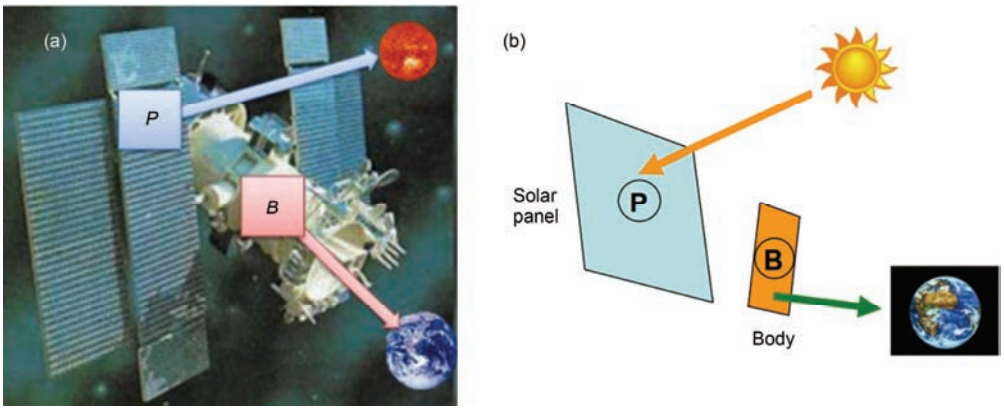


图 16 (网络版彩色)(a) 复杂的三轴稳定卫星; (b) 简化后的二面元模型

Figure 16 (Color online) (a) Complex three-axis stabilized satellite; (b) simplified model with two facets

求两个观测点的本体姿态必须相同. 此外, 该方法应尽量增大点对之间的时间间隔或者增加观测站位置在地球上的地理多样性, 以提高反演空间目标反射率、面积的能力. 因此, 该方法目前的应用并不广泛.

基于二面元模型所提出的贝叶斯置信度传播算法, 可以利用光度数据对GEO目标进行交互式的工作状态评估[37]. 该方法需要采用二面元模型对GEO目标建模, 首先建立反演模型反演卫星本体和太阳能电池板各自的反射率和面积的乘积, 然后利用预测模型预测GEO目标在给定的未来时刻的亮度, 最后利用贝叶斯置信度传播算法建立统计模型对卫星的工作状态进行近实时的评估. 其中在统计模型中定义了离群值、异常群集支持和异常模型支持三个证据, 而每个节点的置信度则是三者的乘积. 置信度阈值由用户设定, 超出阈值可判定空间目标的状态已经发生异常. 该方法需要足够大的先前数据作为训练集用于卫星状态评估, 但对于卫星本体状态判定的实时性要求较高, 因此, 该方法必须重点解决自展

分析[38,39]、统计优化[40,41]等问题.

2.4 基于机器学习的反演方法

基于机器学习的方法是近两年出现的一种新的反演方法. 该方法一般采用特征提取技术提取空间目标光度曲线的历史数据特征, 然后结合不同的机器学习算法对提取的参数进行训练, 最后输入当前空间目标的光度曲线, 输出对空间目标的特征描述. 机器学习方法一般需要足够多的光度曲线历史数据的支持.

2015年, 机器学习方法被Howard等人[42]应用于基于光度曲线的空间目标特征反演领域, 目前正在开发利用光度特性描述空间目标特征的软件系统. Howard团队通过仿真不同指向、材料、尺寸和姿态的空间目标的可见光波段特征, 采用特征提取技术, 训练不同的机器学习算法实现不同空间目标的分类, 并尝试恢复目标的特征参数. 通过对朴素贝叶斯、逻辑回归、随机森林、支持向量机、神经网络、CN2法则和k近邻7种分类方法的性能仿真分析可知, 随机森林法能够避免其他方法中可能存在的过学习现象, 非常适合于机器学习. 2016年, 美国数值分析公司应用机器学习方法开发的Athena数据驱动系统, 基于光度曲线实现了空间目标的自动探测和分类. 该系统的具体架构如图17所示, 包括基于传感器的特征提取算法、无监督异常探测框架、有监督学习的目标分类以及Athena数据库. Athena系统并不依赖于特定理论模型产生的光度曲线集, 而是智能地对光度曲线的历史数据进行搜集, 学习不同空间目标的光度数据, 并从海量的新的光度数据中自动探测和辨识空间目标的异常行为, 辨识结果如图18所示. 另外, 通过从历史数据中不断学习不同空间目标分类的特征行为图案, 对新数据中的未知目标进行分类, 能够对太阳指向的有效载荷、M形状的空间目标、火箭箭体和空间碎片进行有效分类, 分类结果如图19所示[43].

3 技术分析

总体而言, 基于光度曲线特征的反演方法原理较为简单, 计算十分快速. 基于光度曲线的周期特征能够较为准确地反演自旋稳定空间目标的辨识自旋周期, 该方法广泛应用于自旋稳定空间目标的特征反演. 基于光度曲线的总体特征能够直观地判断出三轴稳定在轨空间目标的工作状态, 当空间目标失效翻滚时光度曲线整体呈现周期性变化的趋势, 当

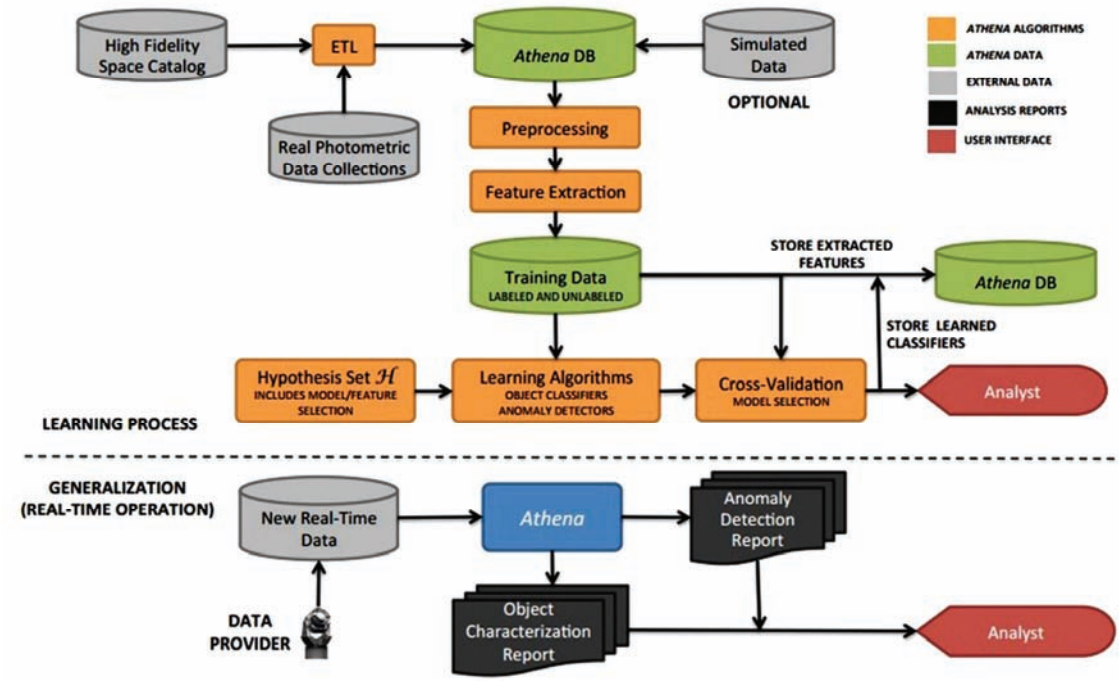


图 17 (网络版彩色)Athena系统架构

Figure 17 (Color online) Athena system architecture

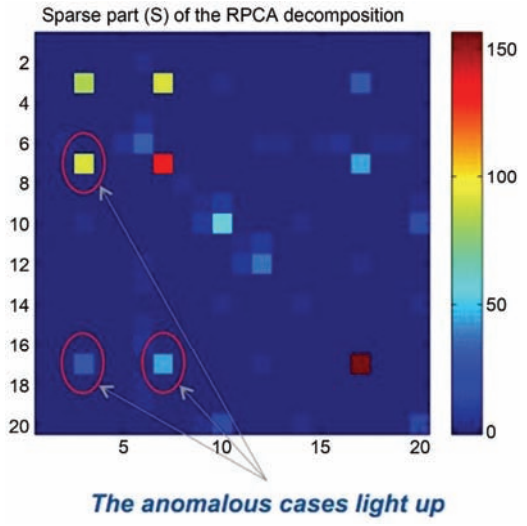


图 18 (网络版彩色)空间目标状态异常检测

Figure 18 (Color online) Anomaly detection of space objects

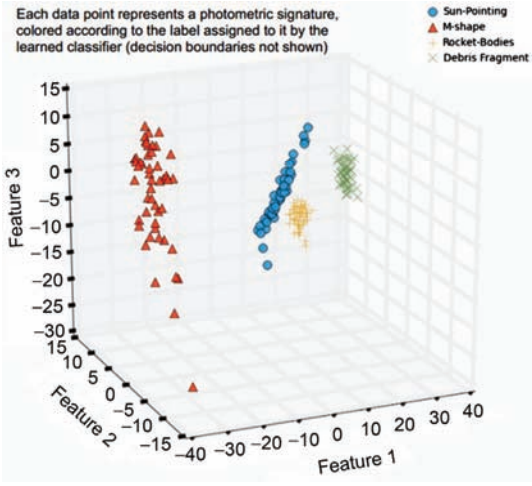


图 19 (网络版彩色)空间目标的分类结果

Figure 19 (Color online) Classification of space objects

空间目标正常工作时，光度曲线无明显周期性变化；另外，基于总体特征还能反演空间目标的平台类型，快速地对目标进行分类．基于光度曲线的极值特征能够粗略地估计出三轴稳定空间目标角速度的上下限，分析空间目标非常规的姿态变化．但是，基于光度曲线总体特征和极值特征的反演方法对光度曲线的测定时间有比较严格的限制，因为三轴稳定空间目标只有在经过二分点附近时其光度曲线才会出现波峰，因此只能利用秋分点后三周或春分点前三周的观测数据，整体观测数据的利用率较低，未来这两种方法应重点解决光度曲线时效性、反演方法普适性等问题．

基于模型构建的反演方法通过建立较为复杂的模型，在一定程度上提高了反演精度．基于封闭面元模型的形状反演方法原理较为简单，但是只对凸面体目标的特征反演较为适用、反演精度较高，未来可以考虑加入BRDF、细化形状模型，解决各类空间目标形状的反演问题．基于二面元模型的反演方法将空间目标简化为本体和帆板两个面的组合，这种模型的简化降低了反演精度，同时该方法要求的观测点对在实际中不易测量、难以捕捉，未来应解决自展分析、统计优化等问题．基于机器学习的反演方法反演的特征参数多、结果相对精确，但是需要足够多的光度曲线历史数据进行模型训练，对于无先验认知的非合作目标，该方法的反演结果往往误差较大，未来应重点解决有限数据条件下的反演问题．基于非线性滤波的方法能够高精度地从稀疏光度数据中反演空间目标的尺寸等多个特征，并能探测这些特征的变化；但单滤波器方法结果难收敛、多滤波器方法需要建立庞大的模型库，未来应解决单滤波器方法的不确定性估计、多滤波器方法的模型库自更新等问题．

4 结束语

地基望远镜获取的空间目标的光度曲线蕴含着丰富的空间目标特征信息，利用地基光度曲线对空间目标的特征进行反演具有重要意义．通过系统梳理近10年国际上各种反演技术的原理、功能和优缺点，可以看出基于非线性滤波的多滤波器反演方法能够反演较多的目标特征，并能探测特征变化，比其他反演技术更具优越性，作者下一步将对该反演技术进行深入研究．

参考文献

1 Fulcoly D O, Kalamaroff K I, Chun F. Determining basic satellite shape from photometric light curves. J Spcr Rkt, 2012, 49: 76–82

2 Henderson L S. Modeling, Estimation, and Analysis of Unresolved Space Object Tracking and Identification. Dissertation for Doctoral Degree. Arlington: The University of Texas at Arlington, 2014

3 Linares R, Leve F A, Jan M K, et al. Space object mass-specific inertia matrix estimation from photometric data. Adv Astronaut Sci, 2012, 144: 41–54
4 Linares R, Jah M K, Crassidis J L. Space object area-to-mass ratio estimation using multiple model approaches. Advc Astr Sci, 2012, 144: 55–72
5 Linares R, Jah M K, Crassidis J L, et al. Astrometric and photometric data fusion for inactive space object feature estimation. In: Proceedings of the 62nd International Astronomical Congress. Cape Town: Int Astronaut Congr, 2011
6 Wetterer C J, Jah M K. Attitude estimation from light curves. J Gdc Ctrl Dyn, 2009, 32: 1648–1651
7 Kissell K E, Vanderburgh R C. Photoelectric photometry: A potential source for satellite signatures. Aerosp Res Labs, 1966, 66: 0162
8 Payne T, Gregory S, Luu K. SSA analysis of GEOS photometric signature classifications and solar panel offsets. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2006
9 Jolley A, Wade G, Bedard D. Multicolour optical photometry of active geostationary satellites. Dissertation for Master Degree. Kingston: Royal Military College of Canada, 2014
10 Vrba F, Hutter D, Shankland P, et al. A survey of geosynchronous satellite glints. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2009
11 Crassidis J L, Hinks J C. Angular velocity bounds via light curve glint duration. In: Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. San Diego: Am Inst Aeronaut, 2016
12 Hall D, Kervin P. Analysis of faint glints from stabilized GEO satellites. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2013
13 Scargle J. Studies in astronomical time series analysis II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. Astrphy J, 1982, 263: 34–53
14 Larsson S. Parameter estimation in epoch folding analysis. Astron Astrophys Supp Ser, 1996, 117: 197–201
15 Hall D. Separating attitude and shape effects for non-resolved objects. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2007
16 Hall D, Africano J, Archambeault D, et al. AMOS observations of NASA's IMAGE satellite. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2006
17 Zeng C Y. The estimation of status and characteristics for target satellite based on time series spectral signal. Master thesis. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 [曾诚宇. 基于时序光度信号的目标卫星状态特性估计. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015]
18 Jah M K, Madler R. Satellite characterization: Angles and light curve data fusion for spacecraft state and parameter estimation. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2007
19 Linares R, Crassidis J L, Wetterer C J, et al. Astrometric and photometric data fusion for mass and surface material estimation using refined bidirectional reflectance distribution functions-solar radiation pressure model. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2013
20 Wetterer C J, Chow C C, Crassidis J L, et al. Simultaneous position, velocity, attitude, angular rates, and surface parameter estimation using astrometric and photometric observations. In: Proceedings of 16th International Conference on Information Fusion. Istanbul: IEEE, 2013. 997–1004
21 Linares R, Jah M K, Crassidis J L. Inactive space object shape estimation via astrometric and photometric data fusion. In: Proceedings of AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. Charleston: Univelt, 2012
22 Linares R. Probabilistic identification and discrimination of deep space objects via astrometric and photometric data fusion. Buffalo: State University of New York at Buffalo, 2013
23 Wetterer C J, Hunt B, Kervin P, et al. Comparison of unscented Kalman filter and unscented Schmidt Kalman filter in estimating attitude and associated uncertainty of geosynchronous satellite. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2014
24 Linares R, Jah M K, Crassidis J L. Astrometric and photometric data fusion for resident space object orbit, attitude, and shape determination via multiple-model adaptive estimation. In: Proceedings of the AIAA/AAS Astrodynamics Specialists Conference. Toronto: AIAA, 2010
25 Liu H. Research on the spatial object shape inversion method based on light curves. Master thesis. Beijing: Equipment Academy, 2016 [刘浩. 基于光度曲线的空间目标形状反演方法研究. 硕士学位论文. 北京: 装备学院, 2016]
26 Anderson J T, Gaylor D E, Idle D, et al. Resident space object feature identification using hierarchical mixtures of experts. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2013
27 Gaylor D, Anderson J. Use of hierarchical mixtures of experts to detect resident space object attitude. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2014

28 Kaasalainen M, Torppa J. Optimization methods for asteroid lightcurve inversion: I. Shap Dete, 2001, 153: 24–36
29 Kaasalainen M, Torppa J, Muinonen K. Optimization methods for asteroid lightcurve inversion: II. Comp Inv Prob, 2001, 153: 37–51
30 Bradley B K, Axelrad P. Lightcurve inversion for shape estimation of GEO satellites from space-based sensors. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2014
31 Chaudhary A B, Payne T, Alex Q. Fingerprinting of non-resolved three-axis stabilized space objects using a two-facet analytical model. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2011
32 Chaudhary A B, Payne T, Wilhelm S, et al. Analysis of unresolved spectral infrared signature for extraction of its invariant features. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2010
33 Chaudhary A B, Payne T, Gregory S, et al. RSO finger printing using non-resolved multispectral signatures. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2010
34 Payne T, Chaudhary A B, Gregory S, et al. Signature intensity derivative and its application to resident space object typing. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2009
35 Chaudhary A B, Payne T E, Gregory S, et al. Fingerprinting of non-resolved three-axis stabilized space objects using a two-facet analytical model. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2011
36 Chaudhary A B, Payne T E, Lucas K, et al. Point pairing method based on the principle of material frame indifference for the characterization of unknown space objects using non-resolved photometry data. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2013
37 Chaudhary A B, Payne T E, Lucas K, et al. Propagation of bayesian belief for near-real time statistical assessment of geosynchronous satellite status based on non-resolved photometry data. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2014
38 Asal M. Testing for the presence of skill in Swedish mutual fund performance: Evidence from a bootstrap analysis. J Econ Bus, 2016, 88: 22–35
39 Rustagi J S. Optimization Techniques in Statistics. Amsterdam: Elsevier, 2014
40 Everitt B. Introduction to Optimization Methods and Their Application in Statistics. Berlin: Springer, 2012
41 Krezo S, Mirza O, He Y, et al. Bootstrap statistical analysis of GHG emission from railway maintenance and renewal projects. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Railway Technology. Sardinia: ACM, 2016
42 Howard M, Klem B, Gorman J. RSO characterization with photometric data using machine learning. In: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Devepment, 2015
43 Singh N, Horwood J T, Aristoff J M, et al. Athena: A data-driven anomaly detection and space object classification tool for SSA. In: Proceedings of the 26th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Napa: AIAA, 2016

Summary for “地基光度曲线反演空间目标特征技术研究进展”

Progress of light curve inversion technology for resident space object characteristics

WANG Yang[1*], DU XiaoPing[2] & FAN ChunLin[3]

[1] *Department of Graduate Management, Equipment Academy, Beijing 101416, China;*
[2] *Department of Space Command, Equipment Academy, Beijing 101416, China;*
[3] *Taiyuan Satellite Launch Center, Xinzhou 036303, China*
* Corresponding author, E-mail: youngerpla@163.com

The characteristics of space objects such as shape, size, attitude, angular velocity, reflectivity and material play a significant role in certain application fields like space object identification, track prediction and collision avoidance. The ground space optical observation system as one of the main measurement methods to observe space objects is difficult to form high-solution images for small objects or objects located in LEO and MEO, which can only appear several light spots with limited pixels due to the impacts of atmospheric conditions, observing distance and resolution ratio. Through the light curves of space objects obtained from the ground-based optical observation system, the characteristics of objects can be inversed as it is closely related to the brightness of these objects. The technology based on the characteristics of ground-based light curves and objective modeling are two main ways of light curve inversion, through the analysis of inversion technology in recent 10 years.

Overall, the principle of the inversion technology based on light curve features is ordinary with easy and fast calculations. Firstly, based on the periodic features of the light curves, the rotation period of a spinning space object can be accurately identified, so this method is widely used in the inversion of the characteristics of spinning space objects. Secondly, based on the general features of light curves, the operating state of a three axis stabilized space object can be identified visually. When the three axis stabilized space object was failure, the light curve often presents a periodic trend. Otherwise the light curve often has obvious periodic variation when the space object was in a normal operation state. In addition, the bus type of space object can be inversed because of the general features of light curve, thus we can immediately classified the space object. The upper and lower bounds of the angular velocity of the three axis stabilized space object can be estimated roughly according to the extremum features of light curves, in this way the attitude change of object can also be analyzed.

The technology based on objective modeling improved the accuracy of inversion to a certain extent by establishing complex models. The principle of the light curve inversion methods for space objects relied on modeling the objects as a closed set of facets which is relatively simple. This method can determine characteristics like shapes and orientation of satellites, rocket bodies, and space debris as well, however, it is more suitable for convex objects’ characteristics inversion. The two-facet model simplified the space objects as the combination of two facets, one facet represents the solar panel and the other represents the body, but this simplification process reduced the inversion accuracy. The machine learning inversion method will obtain more accurate results, but it require enough historical light curves for modeling objects. If there have inadequate priori datas of a space object, this method often performs large error compared with the true value. The nonlinear filtering method can be used to accurately determine the size, shape, position, velocity, attitude, angular rates, surface parameter and other characteristics of the space object from sparse light curve data, and it can also detect the change of these characteristics. Therefore, this method has more superiority than other inversion techniques.

This paper has summarized researching development of the inversion technology in recent 10 years. The purpose, advantages and disadvantages of each technology are analyzed in detail and the future research direction in this field is also proposed.

light curve, optical observation, space object, object characteristics, inversion for characteristics

doi: 10.1360/N972016-01082