

采用时序多谱段信号分析的空间目标运动状态辨识

侯晴宇¹ 王付刚² 智喜洋^{1*} 曾诚宇¹

¹哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001

²东方红卫星公司, 北京 100081

摘要 为表征在轨卫星的自旋稳定、三轴稳定和“翻滚”三种运动状态,提出了一种基于可见光时序多谱段信号分析的目标运动状态辨识方法,分析了目标运动状态与观测星探测视场内时变的目标表面材料间的对应关系,以及材料属性/种类与时序双色比聚类信息之间的关联性。提出了基于时序双色比特征高斯混合聚类的目标表面材料种类判别算法以及目标运动状态辨识算法。综合考虑卫星的背景特性、材料特性、结构特性、轨道特性,对三种运动状态卫星的多谱段信号进行了数学仿真,对目标运动状态辨识算法进行了验证,证明了所提出算法的有效性。

关键词 空间光学;运动状态辨识;反射信号;多谱段;卫星

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0401001

Motion Status Identification of Space Object by Analyzing Time Series Multi-Spectral Signal

Hou Qingyu¹ Wang Fugang² Zhi Xiyang¹ Zeng Chengyu¹

¹Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

²Dongfanghong Satellite Company, Beijing 100081, China

Abstract To characterize the motion statuses of spin-stabilized, three-axis stabilized and “tumbling” for non-resolved satellites, a method of the motion status identification based on time series visible multi-spectral signal is proposed. The corresponding relationship is analyzed between motion statuses and time-variant types of satellite surface material as well as the correlation between material characteristics and the clustering information on the time series dual-color ratio. A discrimination algorithm on types of surface material and an identification algorithm on motion status are proposed on the basis of the time series dual-color ratio feature in Gaussian mixture clustering. Considering characteristics of background, materials, structure and orbit of the satellite, mathematical simulations for time series multi-spectral signals generated from satellites with the above three motion statuses are operated. The identification algorithm is validated based on the simulated data, and results show that the proposed algorithm is effective.

Key words space optics; motion status identification; reflected signal; multi-spectral; satellite

OCIS codes 010.0280; 040.1880; 070.4790

1 引言

随着航天技术的迅速发展,进入太空中的目标日益增多,其中最重要的一类空间目标就是卫星,从国家太空安全角度出发,对太空中的卫星尤其是他国卫星的探测与辨识成为当前的一个研究热点。随着探测器性能及信号处理水平的不断提高,在轨光学探测成为了空间目标探测识别的主要手段之一。针对卫星目标的光学探测,近些年主要开展了卫星表面材料的双向反射分布函数(BRDF)测量^[1-2]、卫星在轨光学成像特性

收稿日期: 2014-10-15; 收到修改稿日期: 2014-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(61007008)

作者简介: 侯晴宇(1982—),男,博士,副研究员,主要从事空间目标探测识别等方面的研究。

E-mail: houqingyu@126.com

*通信联系人。E-mail: zhixiyang@hit.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

的仿真^[3-5]、空间目标的轨迹检测算法^[6],以及目标姿态、运动状态对光度信号或多谱段信号的影响分析^[7-8]等研究工作。这些研究工作以目标光学特性的仿真分析以及目标的探测、检测为主,而针对目标本身物性反演、估计以及状态辨识的研究相对较少。

在轨卫星存在三轴稳定、自旋稳定和“翻滚”3种运动状态,三轴稳定和自旋稳定属于姿态控制结果,这两种类型的卫星通常称为正常工作卫星,“翻滚”运动的卫星属于失效卫星。对卫星运动状态的辨识,不但能够实现对卫星目标的确认,还可以对卫星的功能进行解读,这对空间态势感知能力的提升具有重要意义。

本文以卫星目标的运动状态辨识为目的,以远距离点目标探测为主要探测方式,以探测器获取的在轨目标的时序多谱段信号作为输入,研究了基于时序多谱段特征的卫星运动状态辨识方法。

2 卫星运动状态辨识原理

2.1 运动状态与观测材料种类关联性分析

在轨时序观测过程中,太阳-在轨卫星-探测器相对位置的变化导致的照明-观测矢量变化远小于卫星运动状态导致的照明-观测矢量变化。因此,在某一观测时段内,探测器接收到在轨卫星反射信号的变化是卫星表面材料反射特性和卫星运动状态相耦合的结果。

对于三轴稳定的卫星,本体一般包裹多层热控材料,材料的最外层为二次表面镜型热控涂层,帆板正面贴满太阳能电池片,帆板背面为涂料型热控涂层(通常为有机黑漆)。三轴稳定卫星短时段内的反射信号变化主要由帆板的保持对日指向运动产生的,因此其反射信号包含了二次表面镜型热控涂层和电池片两种材料信息;对自旋稳定的卫星,本体侧面贴满电池片,两个底面一般涂有涂料型热控涂层(通常为有机白漆)。通常情况下,自旋稳定卫星反射信号中一般仅包含电池片一种材料信息。对于“翻滚”的卫星,若卫星失效前为三轴稳定卫星,其时序反射信号中包含二次表面镜型热控涂层、电池片和涂料型热控涂层三种材料信息,若卫星失效前为自旋稳定卫星,则反射信号中包含了电池片和涂料型热控涂层两种材料信息。

可见,不同运动状态的卫星目标在观测周期内(观测周期大于卫星自旋周期或者“翻滚”周期)探测器视场中出现的材料种类不同,运动状态与材料种类的关系如表1所示。由表1可知,识别出卫星在一个周期内表面材料的种类,便可获得相应的运动状态信息。

表1 观测周期内姿控类型与材料的关联性

Table 1 Relationship between attitude control type and materials in observation period

| Motion status | Material |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Three-axis stabilization | Second surface mirror thermal control material, solar cell |
| Spin-stabilization | Solar cell |
| Three-axis stabilization on tumbling | Second surface mirror thermal control material, solar cell, organic black paint |
| Spin-stabilization on tumbling | Solar cell, organic white paint |

2.2 材料属性/种类与时序多谱段特征关联性分析

不同材料的物质构成存在差异,导致对于同一入射光的反射光谱也存在差异。因此,对于不同运动状态的卫星,由于材料属性以及时序变化特性不同,将导致时序多谱段特性存在一定的差异。

以下分别定性给出表1中不同运动状态卫星的时序多谱段特性(以双谱段为例说明)与材料种类之间的对应关系。假设图中圆圈、方形及菱形分别表示有机白漆、电池片以及黄色热控材料的双谱段反射特征在特征空间中对应的特征点。由于在轨观测过程中光源入射、观测条件时序变化,使得特征点位置时变,在时序上构成了一个聚类分布。对于三轴稳定卫星,其表面包含黄色热控材料以及电池片两种材料,因此该聚类分布处于方形与菱形之间,如图1(a)所示。同理,对于自旋稳定卫星,其表面材料主要为电池片,特征空间中的时序双谱段特征聚类位于方形附近,如图1(b)所示。对于“翻滚”三轴稳定卫星,由于探测视场中时序出现二次表面镜型热控材料、电池片、有机黑漆三种材料,因此时序双谱段特征在上述三种材料特征点附近形成三个聚类,如图1(c)所示。对于“翻滚”自旋稳定卫星,由于探测视场中时序出现电池片、有机黑漆2种材料,因此在上述两种材料特征点附近形成两个聚类,如图1(d)所示。可见,可以结合双谱段特征空间中聚类

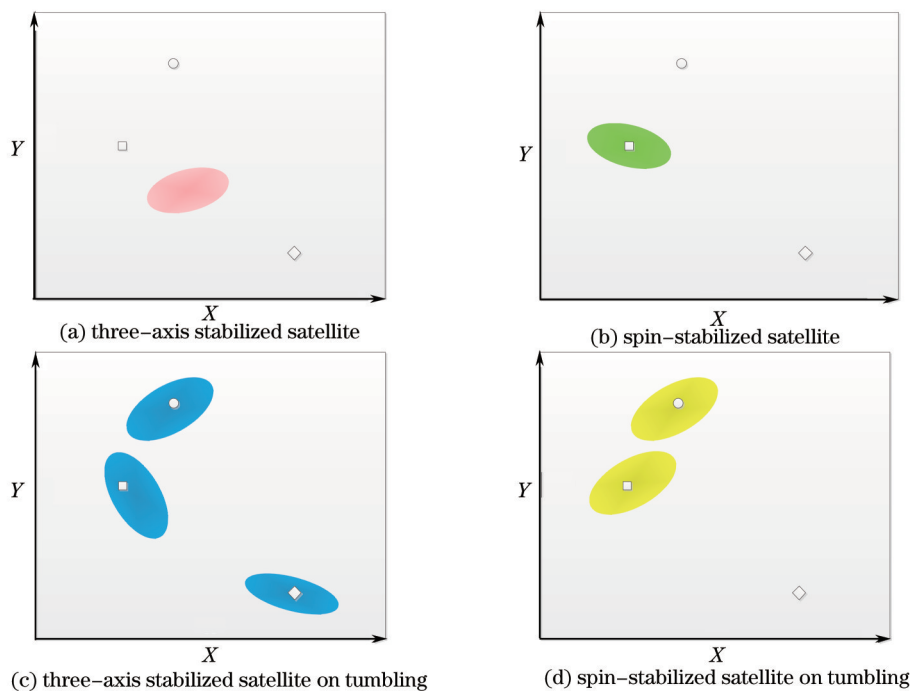


图 1 不同运动状态卫星在双谱段特征空间形成的聚类图示

Fig.1 Clustering results of different in motion status of satellites on dual-spectral feature space

中心的位置以及聚类数量确定目标的材料属性,进而确定目标的运动状态。

3 时序双色比高斯混合模型的运动状态辨识

由卫星运动状态辨识原理可以看出,方法需要以目标表面材料在多谱段特征空间中的位置作为先验信息。但是,实际在轨过程中,目标的绝对多谱段特征受到观测距离、目标尺度的影响,特征空间中的材料先验信息无法确定。为此,本文提出了双色比特征,用以消除上述两种因素对特征绝对量值的影响,能够单一反映目标的光谱属性及材料属性,能够作为特征空间中的先验信息。在此基础上,利用时序双色比的聚类属性确定目标的运动状态。

3.1 时序双色比特征建模

假定光学系统的光谱透射率为 $\tau(\lambda)$,多谱段探测器件的光谱量子响应函数为 $\eta(\lambda)$,则 t 时刻在轨卫星在探测器焦面上的多谱段辐通量为

$$\Phi_i(\lambda) = \sum_k \int_{\lambda} \frac{\pi E_{\text{sun},t}(\lambda) \tau(\lambda) \eta(\lambda) D^2 A \cos \theta_{r,t} \cos \theta_{d,t}}{4R_i^2} f_{r,k}(\theta_{i,t}, \varphi_{i,t}, \theta_{r,t}, \varphi_{r,t}, \lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中 Φ_i 为在轨卫星的多谱段辐通量, $E_{\text{sun},t}$ 为在轨卫星表面的太阳光谱辐照度, A 为有效网格面元的面积, R_i 为探测器入瞳中心与网格面元中心间的距离, $\theta_{d,t}$ 为探测器光轴与入瞳-网格面元连线的夹角, $f_{r,k}$ 为网格面元光谱 BRDF,是入射角 $(\theta_{i,t}, \varphi_{i,t})$ 、反射角 $(\theta_{r,t}, \varphi_{r,t})$ 和波长 λ 的函数,它由材料自身特性如表面粗糙度、自相关长度、菲涅耳反射率等因素决定。(1)式中带有下脚标 t 的量为在轨观测过程中的时序变化量。

设 $\Phi_i(R)$ 、 $\Phi_i(G)$ 、 $\Phi_i(B)$ 分别为可见光 R 、 G 、 B 三个波段内目标在光学系统入瞳处的辐通量,则在 t 时刻的双色比表示为^[3,6]

$$X_t = \frac{\Phi_i(R)}{\Phi_i(G)} = \frac{\sum_k \int_{\lambda} E_{\text{sun},t}(\lambda) \tau(\lambda) \eta(\lambda) f_{r,k}(\theta_{i,t}, \varphi_{i,t}, \theta_{r,t}, \varphi_{r,t}, \lambda) d\lambda}{\sum_k \int_{\lambda} E_{\text{sun},t}(\lambda) \tau(\lambda) \eta(\lambda) f_{r,k}(\theta_{i,t}, \varphi_{i,t}, \theta_{r,t}, \varphi_{r,t}, \lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

$$Y_t = \frac{\Phi_i(B)}{\Phi_i(G)} = \frac{\sum_k \int_{\lambda} E_{\text{sun},t}(\lambda) \tau(\lambda) \eta(\lambda) f_{r,k}(\theta_{i,t}, \varphi_{i,t}, \theta_{r,t}, \varphi_{r,t}, \lambda) d\lambda}{\sum_k \int_{\lambda} E_{\text{sun},t}(\lambda) \tau(\lambda) \eta(\lambda) f_{r,k}(\theta_{i,t}, \varphi_{i,t}, \theta_{r,t}, \varphi_{r,t}, \lambda) d\lambda}. \quad (3)$$

从(2)式和(3)式可以看出,双色比消除了目标面元面积及与探测器距离的影响,该比值与目标表面材料的BRDF有关,即可以利用双色比表征面元材料属性。此外,由于卫星包含不同材料组成的大量面元以及在轨观测过程中 $\theta_{i,t}, \varphi_{i,t}, \theta_{r,t}, \varphi_{r,t}$ 时序变化,使得不同运动状态卫星的时序双色比在二维双色比特征空间中存在不同的分布(与图1类似)。因此可以通过计算得到不同材料在光源垂直入射及垂直观测情况下的双色比,作为材料在双色比特征空间的先验点。

3.2 基于时序双色比高斯混合模型的状态辨识

高斯混合模型(GMM)是一种半参数的密度估计方法,它融合了参数估计法和非参数估计法的优点,不局限于特定的概率密度函数的形式。本文将GMM引入到卫星目标时序双色比分布的参数估计中,对特征矢量进行聚类,把每一类看作是一个多维高斯分布函数,然后求出每一类的均值、协方差矩阵和出现的概率。此时,每一类的均值表征了空间卫星表面的一种材料。卫星表面材料一般分为三大类,即二次表面镜型热控材料、涂料型热控材料和电池片。因此,卫星在多谱段比值空间分布的GMM的阶数不超过三阶。为了准确进行聚类,首先设定GMM的阶数为3。当空间卫星在观测周期内材料种类小于3时,会出现某两个簇的中心位置十分接近的情况,此时需要合并两簇,重新设定阶数,进行聚类,直至聚类后各簇中心位置大于门限阈值。

在时序双色比特征聚类之后,需要结合材料在特征空间中的先验信息对目标材料属性进行判别,提出了以下的材料属性判别准则:

1) 距离准则,分别计算每个簇的均值与所有材料先验特征点之间的距离,并求出最小距离,若最小距离小于设定的门限距离,则此时的端点对应的材料为该簇所表征的材料;

2) 矢量夹角准则,若簇与材料特征点的最小距离大于门限距离,则说明该簇表征了两种材料,计算簇中心与所有先验特征点之间的矢量,寻找矢量中夹角最大的两个矢量,两个矢量端点对应的材料即为该簇所表征的材料。

基于时序双色比GMM的卫星运动状态辨识的流程如下:

- 1) 利用目标的时序多谱段特征计算时序双色比;
- 2) 对时序双色比进行聚类与材料属性判别;
- 3) 根据表1中材料与运动状态的对应关系确定卫星运动状态。

4 基于仿真数据的辨识方法验证

4.1 卫星时序多谱段特性建模

卫星目标的时序多谱段信号仿真流程如图2所示。根据太阳轨道根数、卫星目标轨道根数、观测星轨道根数确定某一时刻的卫星目标轨道坐标系中的照明与观测矢量。结合卫星目标运动状态信息进行坐标变换,确定该时刻的卫星目标本体及帆板坐标系中的照明与观测矢量。对于三轴稳定卫星本体,给定太阳、探测器和空间卫星的轨道参数及描述目标运动状态特性的欧拉角后,便可以计算空间卫星本体表面光线入射角和探测器的观测角。对自旋稳定和“翻滚”卫星,卫星整体都绕某一确定轴旋转,可以据此计算卫星本体坐标系中的照明及观测位置矢量。三轴稳定卫星在正常工作过程中,卫星本体的姿态震荡幅度很小,但是太阳能帆板为了获得最多的太阳能,时刻保持对日指向,因此在卫星运行过程中相对于本体实时转动。建立帆板对日指向的数学模型,经过坐标转换即可以得到帆板坐标系中的照明及观测位置矢量。在目标表明网格划分的基础上,进行有效网格面元判别,并且计算网格面元的照明与观测矢量。利用面元的光谱BRDF模型及太阳的光谱辐射特性计算面元的光谱反射特性,结合轨道及探测器的相关参数计算面元在探测器像元上的多谱段辐射强度,对所有面元的多谱段辐射强度求和即得到该时刻整星的多谱段辐射强度。同理,计算得到时序采样时刻下整星的多谱段辐射强度信号。具体的仿真方法请参见文献[6]。

设定空间卫星位于地球静止轨道,观测星位于地球同步轨道,二者的轨道参数如表2所示,观测起始时间为2007年7月1号12:00:00。卫星的结构尺寸如表3所示,其中三轴稳定卫星的本体为长方体,两侧为太阳帆板;自旋稳定卫星本体为六棱柱体,无帆板结构。三轴稳定卫星本体包覆黄色热控材料,太阳帆板正面

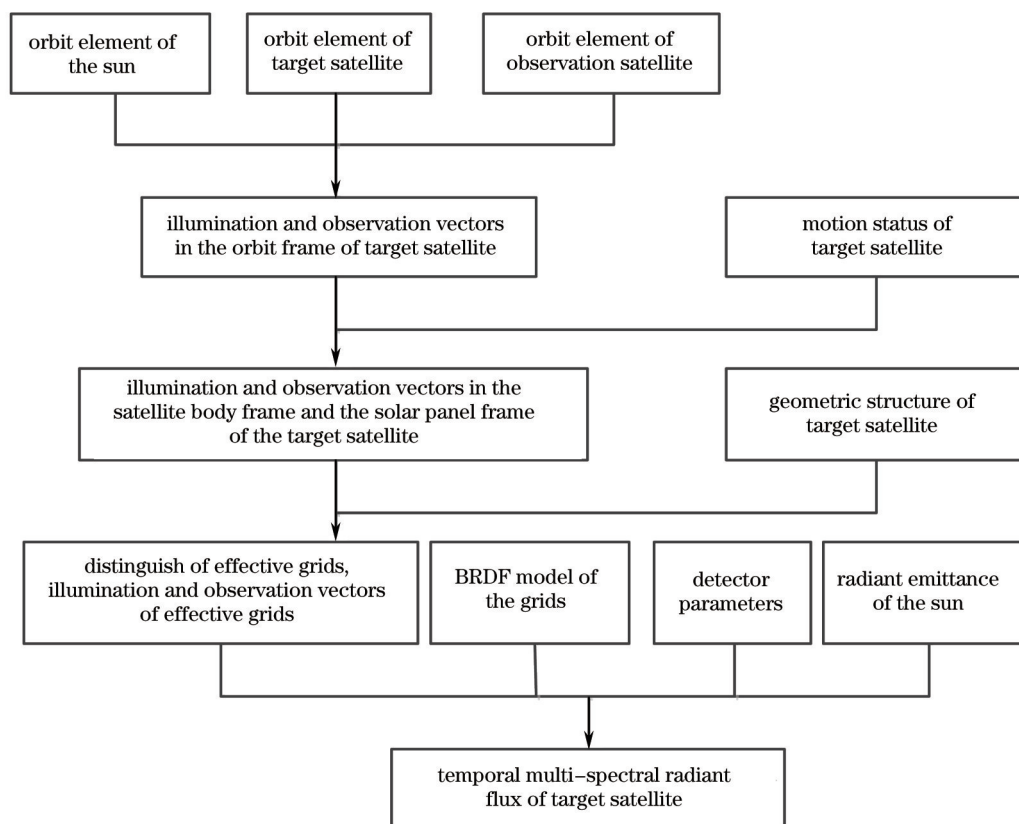


图2 在轨卫星时序多谱段光度信号计算流程

Fig.2 Calculation flow for time series multi-spectral flux of on-orbit satellite

贴满电池片,背面涂有机黑漆。自旋稳定卫星侧面贴电池片,两个底面涂有机白漆。自旋稳定卫星的转速为 100 r/m,“翻滚”自旋稳定卫星的转速为 12 r/m,“翻滚”三轴稳定卫星的转速为 2 r/m。仿真过程中,通过 STK 软件实时获取卫星本体坐标系中照明方向矢量和探测方向矢量。探测器采用美国柯达公司的 KAI-02150 CCD 成像器件,仿真计算了目标卫星在探测器 Red、Green 和 Blue 三通道的反射信号,采样频率为 100 Hz,采样时间为 10 s,即共采样 1000 个点。

表2 目标卫星与观测卫星的轨道参数

Table 2 Orbital elements of the target satellite and observation satellite

| Satellite name | Semimajor axis /km | Eccentricity /($^{\circ}$) | Orbit inclination /($^{\circ}$) | Argument of perigee /($^{\circ}$) | Longitude of ascending node /($^{\circ}$) | True anomaly /($^{\circ}$) |
|-----------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|
| Target satellite | 42164.2 | 0 | 0 | 0 | 359.066 | 0 |
| Observation satellite | 42064.2 | 0 | 0 | 0 | 359.066 | 0.2356 |

表3 目标卫星的几何尺寸

Table 3 Physical dimensions of target satellites

| Satellite type | Structure member | Physical dimension /mm |
|---------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Three-axis stabilized satellite | Satellite body | Length×width×height: 2200×2200×1720 |
| | Solar panel | Length×width×height: 8000×2500×50 Distance between solar panel and satellite body: 500 |
| Spin-stabilized satellite | Hexagonal prism | Circumcircle radius of bottom surface: 2150 Height: 3530 |

4.2 卫星运动状态辨识结果及分析

4.2.1 三轴稳定卫星的辨识

在观测周期内,多谱段比值特征空间中三轴稳定卫星时序多谱段信号的分布如图3(a)所示,图中圆圈表示有机白漆,方形表示电池片,菱形表示黄色热控材料。采用混合高斯模型聚类算法对特征空间中的点进行聚类,初步结果如图3(b)所示,图中三个簇的均值分别为 $[0.8091,0.6059]$ 、 $[0.8068,0.6084]$ 和 $[0.8562,0.6363]$ 。计算三个簇中心的距离,分别为0.0034、0.0567和0.0561,均小于簇间的门限距离0.1,因此合并三个簇,如图3(c)所示,重新计算簇的均值为 $[0.8085,0.6087]$ 。分别计算该簇与三种材料间的距离,均大于材料特征门限距离0.05,因此利用类隶属度准则中的矢量夹角判据,得知该簇位于电池片与黄色热控材料之间,则该卫星在采样周期内进入探测器视场的表面材料为电池片和黄色热控材料,根据卫星姿控类型与表面材料间的相关性,可以判定该卫星为一颗三轴稳定卫星。

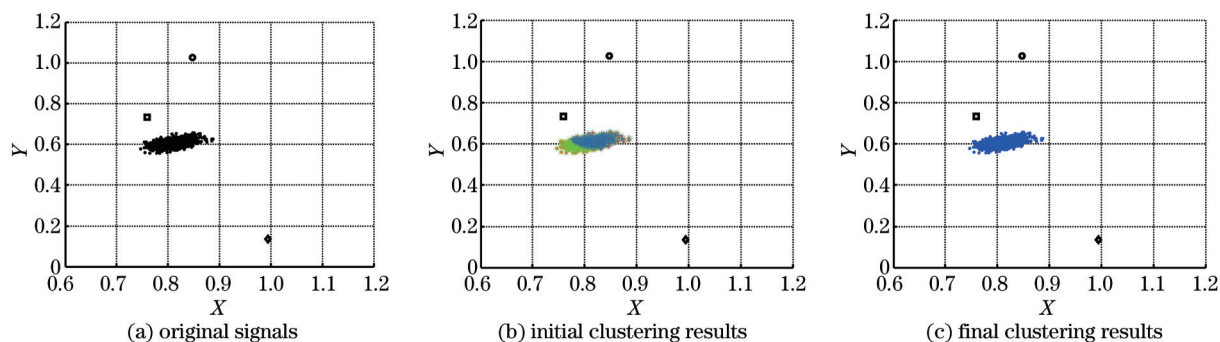


图3 三轴稳定卫星聚类结果

Fig.3 Clustering results of three-axis stabilized satellites

4.2.2 自旋稳定卫星的辨识

在观测周期内,多谱段比值特征空间中自旋稳定卫星时序多谱段信号的分布如图4(a)所示。对自旋稳定卫星,混合高斯模型聚类结果如图4(b)所示,图中三个簇的均值分别为 $[0.7662,0.7418]$ 、 $[0.7665,0.7420]$ 和 $[0.7554,0.7297]$ 。计算三个簇中心的距离,分别为0.0003、0.0165和0.0162,均小于簇间的门限距离0.1,因此合并三个簇如图4(c)所示,重新计算簇的均值为 $[0.7591,0.7331]$ 。利用类隶属度准则,得知该簇位于电池片附近。因此,该卫星的表面材料仅为电池片,根据卫星姿控类型与表面材料的关联性,可以判定该卫星为一颗自旋稳定卫星。

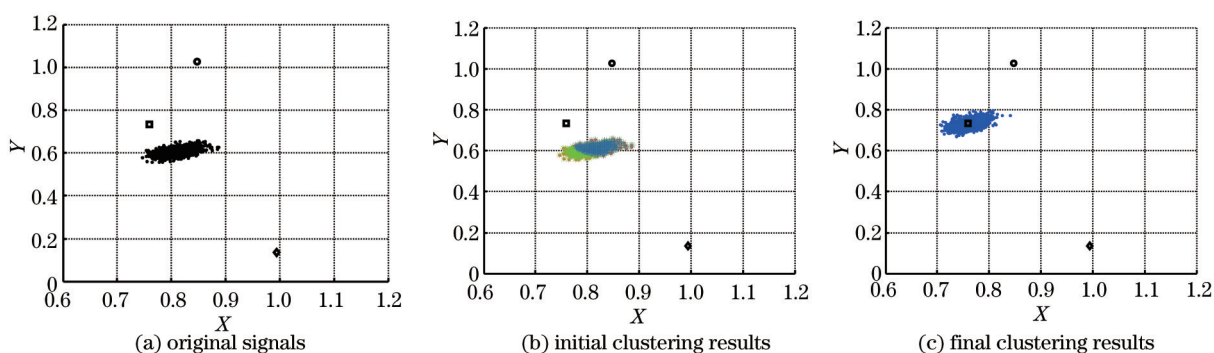


图4 自旋稳定卫星聚类结果

Fig.4 Clustering results of spin-stabilized satellites

4.2.3 “翻滚”三轴稳定卫星的辨识

在观测周期内,多谱段比值特征空间中“翻滚”三轴稳定卫星时序多谱段信号的分布如图5(a)所示。对“翻滚”三轴稳定卫星,GMM聚类结果如图5(b)所示,图中三个簇的均值分别为 $[0.8193,0.5957]$ 、 $[0.8492,1.0306]$ 和 $[0.9933,0.1352]$ 。计算三个簇中心的距离,分别为0.4359、0.9096和0.4922,均大于簇间门限距离0.1,因此不合并三个簇。计算三个簇到材料的距离,结合材料特征门限距离0.05,根据类隶属度准则可以得

知信号中包含黄色热控材料和有机漆;另外一簇均值利用矢量夹角得知为电池片和黄色热控材料连线上。因此该卫星在观测周期内表面材料包含电池片、黄色热控材料、有机漆,根据卫星姿控类型与表面材料的关联性,可以判定该卫星为“翻滚”三轴稳定卫星。

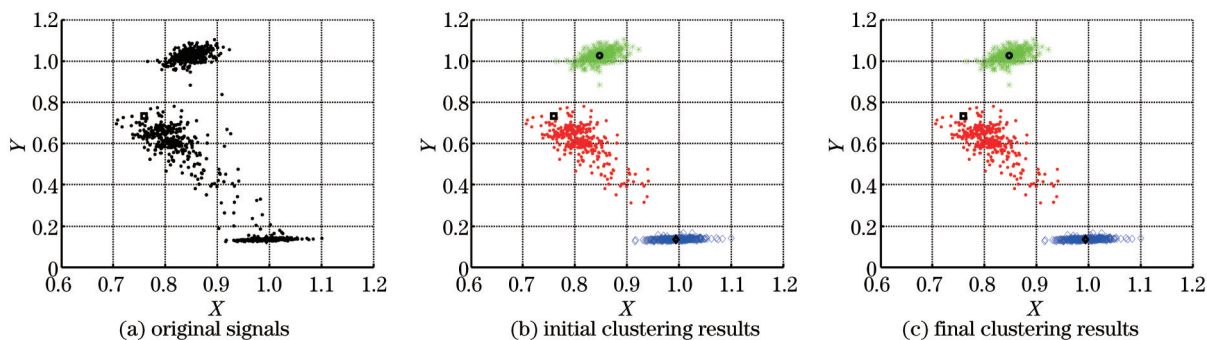


图5 “翻滚”三轴稳定卫星聚类结果

Fig.5 Clustering results of three-axis stabilized satellite on tumbling

4.2.4 “翻滚”自旋稳定卫星的辨识

在观测周期内,多谱段比值特征空间中“翻滚”自旋稳定卫星时序多谱段信号的分布如图6(a)所示。利用GMM对“翻滚”自旋稳定卫星的聚类结果如图6(b)所示,图中三个簇的均值分别为[0.7437,0.7357]、[0.8495,1.0311]和[0.7656,0.7369]。计算三个簇中心的距离,分别为0.3060、0.3139和0.0220,第一簇与第三簇的距离小于簇间门限距离0.1,因此合并两个簇,重新计算簇的均值为[0.7547,0.7363],如图6(c)所示。利用类隶属度准则,得知两个簇分别位于电池片和有机漆附近,因此,该卫星的表面材料为电池片和有机漆。根据姿控类型与表面材料的关联性,可以判定该卫星为一颗“翻滚”自旋稳定卫星。

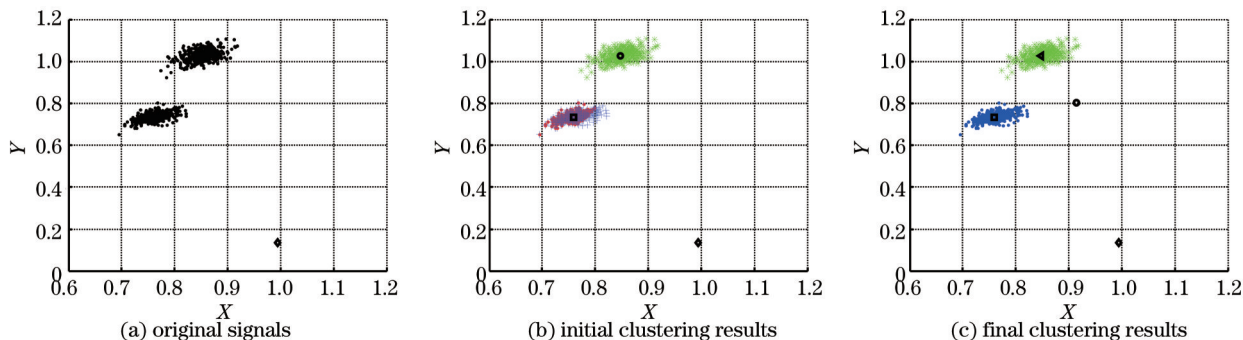


图6 “翻滚”自旋稳定卫星聚类结果

Fig.6 Clustering results of spin-stabilized satellite on tumbling

5 结 论

目标卫星的时序多光谱特征是目标探测、识别的一项关键技术,可为卫星的状态估计提供技术支持。分析了卫星运动状态类型与表面材料对目标卫星多光谱信号的影响。在此基础上,提出了基于时序双色比GMM的卫星运动状态辨识算法。综合考虑卫星的背景特性、材料特性、结构特性、轨道特性,对自旋稳定、三轴稳定和“翻滚”三种运动类型卫星的多谱段信号进行了数学仿真。仿真结果表明,不同运动状态的卫星多光谱反射特性存在较大的差异,通过分析双色比聚类结果的特性,能够有效地辨识目标卫星的运动状态。

参 考 文 献

- 1 Wang Hongyuan, Zhang Wei, Dong Aotao. Measurement and modeling of Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) on material surface [J]. Measurement, 2013, 46(9): 3654-3661.
- 2 Yuan Yan, Sun Chengming, Zhang Xiubao. Measuring and modeling the spectral bidirectional reflection distribution function of space target's surface material [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(3): 2097-2103.

- 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.
- 3 Wang Hongyuan, Zhang Wei, Dong Aotao. Modeling and validation of photometric characteristics of space targets oriented to space-based observation [J]. Appl Opt, 2012, 51(32): 7810-7819.
- 4 Bao Wenzhuo, Cong Mingyu, Zhang Wei, *et al.*. An optical characteristics calculating method based on surface mesh-creation for space targets [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(5): 710-715.
- 鲍文卓, 丛明煜, 张 伟, 等. 基于面元网格化的空间目标光学特性计算方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(5): 710-715.
- 5 Lü Jianming, Niu Yanxiong, Liu Haixia, *et al.*. Research on dispersion and striation characteristic of satellite photoelectric imaging system for space point target imaging [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 091101.
- 吕建明, 牛燕雄, 刘海霞, 等. 星载光电成像系统对空间点目标成像的弥散与拖尾特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 091101.
- 6 Li Kexin, Zhang Wei, Cong Mingyu, *et al.*. A streak detection algorithm of space target in deep space background [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 445-450.
- 李克新, 张 伟, 丛明煜, 等. 一种深空背景空间小目标条纹检测算法[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 445-450.
- 7 Wang Fugang, Zhang Wei, Wang Hongyuan, *et al.*. Influence analysis of motion status on multispectral optical characteristics of satellites [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1004002.
- 王付刚, 张 伟, 汪洪源, 等. 运动状态对卫星多谱段光学特性的影响分析[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1004002.
- 8 Yuan Yan, Sun Chengming, Zhang Xiubao, *et al.*. Analysis of influence of attitude variation on visible characteristics of space target [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2748-2752.
- 袁 艳, 孙成明, 张修宝, 等. 姿态变化对空间目标可见光特性的影响分析[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2748-2752.

栏目编辑: 史 敏