

交叉残差法推断翻滚 GEO 碎片光变周期

徐融^{1,2}, 赵飞¹, 王盈³, 宋佳慧¹

- (1. 中国科学院光电研究院, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201108)

摘要: 基于点源光度信息推断翻滚碎片的旋转速率, 其核心在于获得碎片光变曲线的周期性信息。介绍了交叉残差法, 用于分析碎片光变曲线推断转速, 并对该方法的适应性进行了实验与分析。首先, 对交叉残差法进行了理论分析, 并与其他方法进行了比较; 然后, 在实验室测量了典型 GEO 碎片高保真模型 4 种翻滚姿态下的光变曲线, 并分析了交叉残差; 最后, 提出了“交叉残差倒数峰值显著率”的概念用于分析碎片光变交叉残差, 分光谱计算了各波长光变交叉残差的峰值显著率, 确定了最佳探测波段。实验数据显示翻滚周期推断准确、最佳探测波段为 380~490 nm。研究结果为空间碎片地基、地基监测系统提供依据。

关键词: 空间碎片; 地球同步轨道; 光变周期; 交叉残差; 峰值显著率

中图分类号: V557+.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S229005

Tumbling GEO debris variability period inferring via cross-residue technique

Xu Rong^{1,2}, Zhao Fei¹, Wang Ying³, Song Jiahui¹

- (1. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Shanghai Institute of Aerospace Systems Engineering, Shanghai 201108, China)

Abstract: The core of inferring the debris' tumbling rate via point brightness is to acquire the periodical information of the debris' light curves. Cross-residue method was introduced to infer tumbling rate from the light curves while experimental analysis was made to justify its performance. First, theoretical analysis of cross-residue technique was provided with comparison to other rate inferring methods. Then, experimental measurements of a high-fidelity GEO debris model's light curves under 4 tumble attitudes were conducted as well as cross-residue analysis. Finally, the concept of Cross-residue Reciprocal Peak Significance Rate was put forward to analyze the light curve's cross-residue results, and spectral significance rates were calculated to figure out the best detection waveband. Experimental data shows that

收稿日期: 2016-08-07; 修订日期: 2016-09-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA7046604)

作者简介: 徐融(1991-), 男, 硕士生, 主要从事空间目标光学探测与识别方面的研究。Email: xurong@aoe.ac.cn

导师简介(通讯作者): 赵飞(1978-), 男, 硕士生导师, 博士, 主要从事空间目标光学探测与识别、光学天文技术与方法方面的研究。

Email: zhaofei@aoe.ac.cn

tumbling period is accurate and the best detection band is 380–490 nm. The current findings present a foundation for designing of future space-based and ground-based debris surveillance system.

Key words: space debris; geosynchronous orbit; variability period; cross-residue; peak significance rate

0 引言

实施在轨维护、碎片清除等空间任务的前提条件是要了解目标的当前状态,在外形、结构已知的情况下,其旋转速率决定了任务能否实施以及如何实施,对任务的设计具有指导意义。对于遥远的地球同步轨道(geosynchronous orbit, GEO)空间碎片来说,无线电信号中断且难以采用主动雷达探测或对碎片直接成像,因此采用被动光学手段探测碎片的反射光度变化是唯一可行的手段^[1-2]。

一般来说,高轨空间碎片的自旋角速率远大于其绕地球公转角速率,即在较短的时段内,其光照几何关系几乎不变,反射亮度呈周期性变化,这使得通过碎片光变曲线推断旋转状态成为可能。相比光谱探测或偏振探测等空间点目标探测手段^[3],获取碎片的亮度信息的能量利用率更高,相同探测能力下设备更加简单,可以同时适用于地基观测设备以及天基探测器如在轨服务平台等。对于在轨服务平台来说,通过远距离(>200 km)探测提前获悉待服务目标的旋转速率边界,自主判断能否靠近实施服务任务,进行任务预估,有助于提高服务效率,避免了不必要的燃料消耗,节约成本。

为了从杂乱无章的碎片光度曲线中推断其旋转速率,可采用多种方法。如天文数据处理中研究变星光变曲线变化特征的 Jurkevich 方法以及离散相关函数方法,对处理不等间隔观测数据,避免数据插值引入不确定性,寻找碎片光变周期具有很大帮助^[4-6]。NASA 约翰逊航天中心的研究者利用机械臂操控火箭残骸缩比模型旋转并测量其光变曲线,发现光变曲线特征与旋转轴取向联系紧密而与观测相位角关系不大^[7]。空间碎片实测方面,国家天文台的研究人员测量了多个 GEO 慢旋失稳空间碎片的整晚光变曲线,随后进行了频谱分析,求解碎片自转频率,并通过分析其低频变化推知碎片自旋轴存在进动^[8]。

作为美国“凤凰计划”的先导项目,美国海军研究实验室的研究人员测量了临近 GEO 轨道的“坟墓轨道”上多个失控废弃卫星的光变曲线,并提出了用交叉残差法对光变曲线进行分析^[9],统计其转速特性发现大多数失效卫星自转速度小于 2 (°)/s。

由于空间中航天器相对速率较快,若需长时间在轨凝视探测,难以保持相对几何关系不变。为实现在轨服务平台自主探测碎片旋转速率,进行任务判断,只能采用较短时间的光变数据判断旋转速率。针对这一需求,文中采用交叉残差法对碎片光变曲线进行分析,重点研究了交叉残差法在碎片不同旋转姿态和测量波段下的光变周期识别能力,进行了实验测量和分析,对该方法的适应性进行了验证。

1 交叉残差转速推断方法

光变曲线交叉残差计算公式为:

$$\begin{cases} R(\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{t_{\max}/2} (I(t) - I(t+\Delta t))^2 \\ \Delta t \in [0, t_{\max}/2] \end{cases} \quad (1)$$

式中:交叉残差 $R(\Delta t)$ 表示为原信号 $I(t)$ 与时延 Δt 后的时延信号 $I(t+\Delta t)$ 两者之差平方的平均值。时延 Δt 可取为 0 到信号总长度 t_{\max} 的 1/2。

对于那些在一段时间内反复出现宽包络和强尖峰的光变曲线来说,该计算方法将在闪耀尖峰和整体包络重复性最好的位置得到最小的交叉残差值。其中,光变曲线整体包络反映了卫星光度的整体演化趋势,高频的闪耀尖峰反映了细微结构的周期性闪耀过程。为使交叉残差结果显示更为直观,对 $1/R(\Delta t)$ 绘制曲线,曲线中最强的峰值将出现在闪耀尖峰和整体包络重复性最好的位置。

表 1 展示了几种常见的光变周期推断算法。相比其他几种方法,交叉残差法的输入光变曲线所需的光变周期数少(最少 2 个周期),计算复杂度低,适用于分析稳定采样间隔的光变曲线,获得目标准确

的旋转速率边界,适用于在轨服务平台的任务需求。

表 1 转速推断方法比较

Tab.1 Comparison of rotation speed inferring methods

Methods	Cross-residue	Fourier analysis ^[7]	Jurkevich method ^[5]	Discrete correlation function ^[4]
Least light periods	2	>10	6	3
Computation complexity	Low	High	Fair	Fair
Data form	Fixed interval	Fixed interval	Unfixed interval	Unfixed interval
Result expectation	Precise speed boundary	Frequency distribution	Probable frequencies	Probable cycle length

2 失稳碎片模型分光辐亮度测量实验

为研究不同旋转姿态及观测条件下的目标光度变化,以及寻找交叉残差法反演目标旋转速率的最佳波段,对待测目标进行了多个周期光谱测量。待测目标为一个高轨卫星高保真模型,采用真实航天材料包覆,模型安放于测量系统的中央三轴转台上,由计算机远程控制模型进行各种姿态下的旋转运动。光源采用准直式太阳模拟器,测试面辐照度达 0.05 太阳常数。探测器采用 Photo Research 公司的 PR-745 分光辐射度计进行测量,测量光谱范围为 380~1 080 nm,光谱分辨率为 2 nm。实验中测量了目标 4 种旋转姿态下的 5 组碎片光变曲线(如图 1 所示),其中第 4 种姿态进行了 2 次实验(5°和 10°采样步长)。实验流程如图 2 所示。实验设置如表 2 所示。Pitch、Roll、Yaw 为三轴转台的俯仰、滚动、偏航轴。

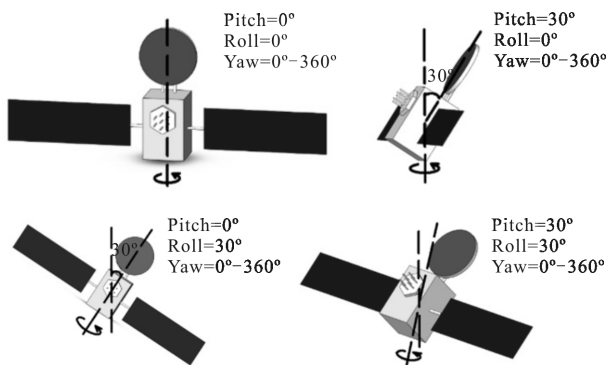


图 1 四种卫星模型旋转姿态

Fig.1 4 rotation attitudes of the satellite model

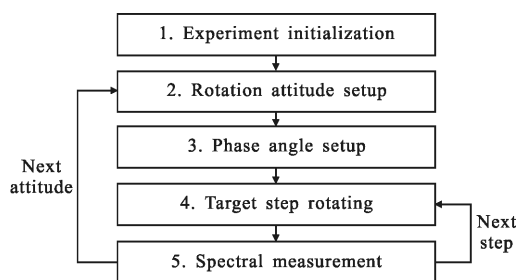


图 2 实验流程图

Fig.2 Flow chart of experiment

表 2 慢旋失稳目标光谱测量实验设置

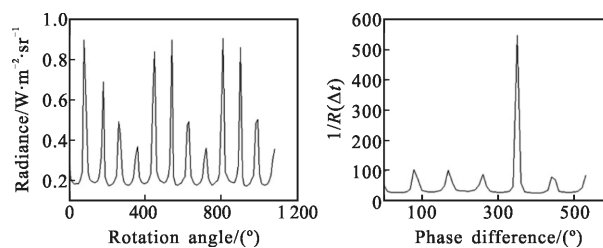
Tab.2 Spectral measurement setup of tumbling target

Test	Rotation attitudes (Pitch/Roll/Yaw)	Phase angle	Test cycles	Rotation step
1	0°/0°/0°~360°	10°	3	10°
2	30°/0°/0°~360°	10°	3	5°
3	0°/30°/0°~360°	75°	2	10°
4	30°/30°/0°~360°	75°	3	10°
5	30°/30°/0°~360°	75°	3	5°

3 结果与分析

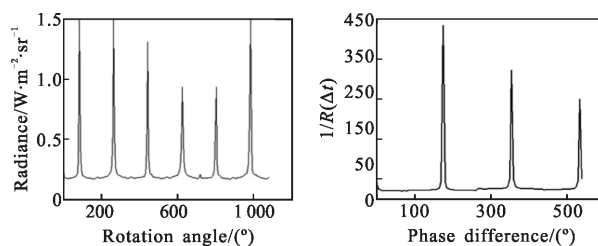
3.1 全波段光变曲线交叉残差分析

对 4 种旋转姿态下的卫星模型进行了 5 组光谱测量,全波段光变曲线测量及交叉残差倒数曲线计算结果如图 3 所示。



(a) 第 1 组

(a) Test group 1



(a) 第 2 组

(b) Test group 2

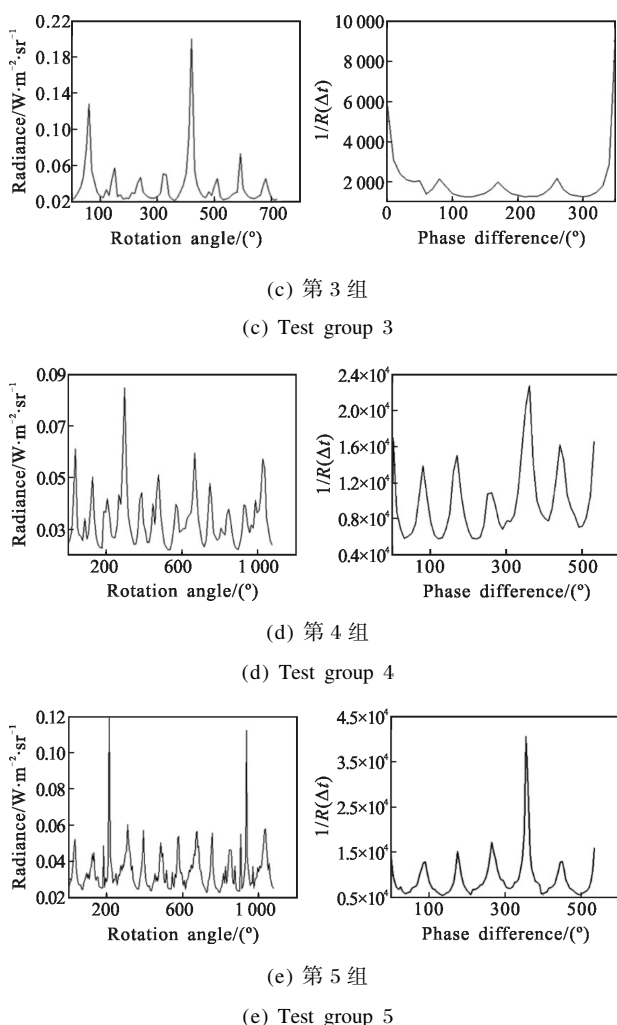


图 3 全波段光变曲线(左侧)和交叉残差倒数计算结果(右侧)
Fig.3 Full band light curve (left), the inverse of the $R(\Delta t)$ (right)

分析图 3 中的 5 组全波段光变曲线交叉残差分析结果,测试 1 和测试 3 结果显示,光度曲线周期性明显,目标旋转周期为 360° 。观测图 3(a)测试 1 的光变曲线,发现每个周期中有 4 次闪耀峰值,显然,这是由于目标正立旋转时本体的 4 个侧面依次进入探测器视场发生闪光,与实验预设相符,故交叉残差分析结果显示的旋转周期为 360° ,而非光变曲线相邻闪耀峰间距 90° 。测试 3 中由于卫星模型的滚动角发生了倾斜,打破了卫星反射表面的规律性,目标光变曲线形态变化,但交叉残差结果仍准确显示了目标的旋转周期。

当测量过程中数据出现缺帧或饱和时,将影响交叉残差推断结果。如图 3(b)中,测试 2 在测量过程中出现了饱和点。若人为设置数据饱和点取值(取值 1.5),进行交叉残差计算,结果显示此时在 180° 出现

了最大残差倒数峰,显示此时最可能的旋转周期为 180° ,与初始设置不符。因此,交叉残差法要求数据时序稳定,当数据存在缺帧或饱和时将使推断结果不准确。

测试 4 和测试 5 针对同一旋转姿态进行了测量(图 3(d)(e)),区别在于测试 4 采用了 10° 的旋转步长间隔而测试 5 的旋转步长为 5° ,相当于探测器的采样频率提高了一倍。更高的采样频率使得光变曲线的细节更为丰富,交叉残差结果显示,提高了采样间隔后交叉残差推断结果显著程度有所提高,旋转周期可确认为 360° 。

3.2 交叉残差法推断结果峰值显著率分析

由测试 4 的结果发现,交叉残差分析结果中峰值差异较小,旋转周期判断存在一定的不确定性。为了衡量交叉残差法转速推断结果的准确程度,定义“交叉残差倒数峰值显著率”,峰值显著率越高说明转速推断结果越准确。设交叉残差倒数曲线中峰值最大为 p_1 。统计 p_1 点之前所有的曲线峰值,按从大到小排序为 $p_1 > p_2 > p_3 > p_4 \dots$,则有峰值显著率为:

$$\text{Rate} = \frac{p_1 - p_2}{p_1 + p_2} \quad (2)$$

由公式(2)得,测试 1、测试 3、测试 4、测试 5 的全波段光变曲线交叉残差法旋转周期推断峰值显著率由图 4 所示,测试 2 由于出现测量饱和点,不计算其峰值显著率。由结果可知,测试 1、测试 3 结果的显著程度较高 (>0.6),其旋转周期判断结果较为准确;测试 4 的峰值显著率较低 (<0.2),其旋转速率判定存在一定的模糊性,需结合其他信息进一步确认;测试 5 提高采样频率后结果的显著程度有所提高 (≈ 0.4),其光变周期判断较为准确。

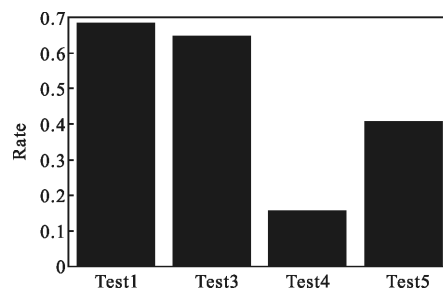


图 4 全波段光变曲线交叉残差结果峰值显著率
Fig.4 Significance rate of full band light curve cross-residue results

为了比较不同测光波段下的光变曲线之间进行

交叉残差转速确认的效果好坏, 寻找最佳光变曲线测量波段, 对不同波长下的测量数据重新组合成了光变曲线, 并进行交叉残差分析。分光峰值显著率结果如图 5 所示。

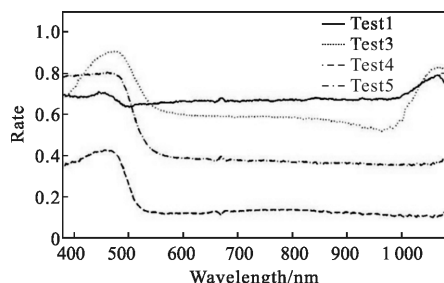


图 5 交叉残差结果中峰值显著率与波长的关系

Fig.5 Spectral significance rate of cross-residue results

由图 5 可知, 测试 1 中所有测量波长下的峰值显著率均在 0.6 以上, 其旋转周期推断结果较为准确, 光变曲线重复率好。测试 3 的峰值显著率曲线从 380 nm 处的 0.7 增加到 490 nm 处出现峰值 0.88, 此时旋转周期推断结果最好, 而后逐渐降低平稳至 0.6 附近, 在 1 000 nm 附近又逐渐增加到 0.82 左右。测试 4 和测试 5 的峰值显著率曲线形状相似, 在短波段(380~500 nm)峰值显著率分别在 0.4 和 0.8 左右, 而在 500 nm 以后的长波段分别下降至 0.15 和 0.4 附近。

综合以上峰值显著率曲线分析可以看出, 在各种旋转姿态下短波段(380~490 nm)的峰值显著率普遍好于长波段。图 6 所示为某一旋转时刻太阳帆板和本体金色聚酯薄膜同时发生镜面反射时截取的

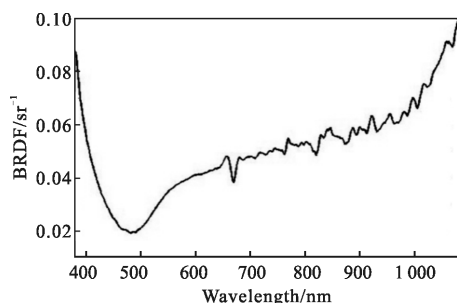


图 6 某时刻卫星模型光谱 BRDF

Fig.6 Spectral BRDF of the satellite model at a moment

光谱 BRDF 曲线, 短波段幅值升高主要由帆板反射光谱引起, 长波段幅值升高主要来自金色膜反射。将图 5 和图 6 进行比较发现, 交叉残差结果的峰值显

著率开始降低的波长位置(490 nm)正是金色薄膜高反射率的波长位置。由此判断峰值显著率在长波段(>500 nm)的降低与金色聚酯膜的反射增强有关。由于金色聚酯薄膜的较强镜面反射特性以及褶皱特性, 加剧了光变曲线的激烈变化特征, “毛刺”增多, 使光变曲线重复性变差。此时周期点处交叉残差值增大, 残差倒数峰值减小, 故而峰值显著率较低。帆板由于发生镜反的机会较少, 反射特性周期性稳定, 短波反射能量主要来自卫星材料的非镜面散射, 变化较为平缓, 因此光变曲线重复性较好。

综上所述, 短波段(380~490 nm)的交叉残差分析结果显著度较高, 为交叉残差法最佳测量波段, 适宜进行目标旋转速率推断。若考虑到实际探测中需要光学系统具备更高的能量利用率以提高信噪比, 可考虑同时采用长波段(>490 nm)进行测量。

4 总 结

文中针对慢旋失稳 GEO 空间碎片, 研究了利用交叉残差法分析其光变曲线周期以推断旋转速率的适用性问题。研究主要结论如下:

(1) 交叉残差法推断目标旋转速率识别准确度高, 输入光变曲线所需光变周期少, 算法计算量小, 理论分析相比其他方法更适合在轨服务平台自主探测使用。

(2) 光变曲线数据中的缺帧点和饱和点会明显影响交叉残差转速推断结果; 提高采样频率有助于提高推断的准确度。

(3) 短波段(380~490 nm)光变曲线交叉残差结果峰值显著率优于长波段(>490 nm), 分析可知是由于金色包覆膜镜面反射在长波段的剧烈变化增大了曲线残差值, 因此短波段更适宜作为推断探测波段。文中关于交叉残差法推断目标旋转速率的算法稳定性和适用性的研究, 以及选择最佳探测波段的峰值显著率评估方法, 可为今后天基、地基空间碎片自动化监测系统提供依据。

参 考 文 献:

[1] Han Yi, Sun Huayan. Advances in space target optical scattering character research [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 758-766. (in Chinese)
韩意, 孙华燕. 空间目标光学散射特性研究进展 [J]. 红外

- 与激光工程, 2013, 42(3): 758-766.
- [2] Jin Sheng, Gao Meiguo, Wang Yang. Technology of space target recognition based on RCS [J]. *Modern Radar*, 2010, 32(6): 59-62. (in Chinese)
金胜, 高梅国, 王洋. 基于 RCS 的空间目标识别技术[J]. 现代雷达, 2010, 32(6): 59-62.
- [3] Tang Yijun, Jiang Xiaojun, Wei Jianyan, et al. Review of optical observations of high apogee space debris [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(4): 1094-1098. (in Chinese)
唐轶峻, 姜晓军, 魏建彦, 等. 高轨空间碎片光电观测技术综述[J]. 宇航学报, 2008, 29(4): 1094-1098.
- [4] Cheng Yong, Zhang Xiong, Wu Lin, et al. Analysis of the correlation between γ -ray and radio emissions from γ -ray loud Blazar using the discrete correlation function [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(2): 988-994. (in Chinese)
程勇, 张雄, 伍林, 等. 用离散相关函数方法分析 Blazar 天体的 γ 射线和射电辐射的相关性 [J]. 物理学报, 2006, 55(2): 988-994.
- [5] Liu Kaibo, Yang Dongmo, Hou Dedong, et al. Computing the period of light variability in seyfert Galaxy 3C120 using the Jurkevich method [J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 2009, 29(5): 1-5. (in Chinese)
刘凯博, 杨东末, 侯德东, 等. Jurkevich 方法在 3C120 天体光变周期分析中的应用 [J]. 云南师范大学学报, 2009, 29(5): 1-5.
- [6] Liang Jihua, Ni Zhiqiong, Chen Jihe, et al. Analysis of the Variability Periodicities of BL Lac AO 0235 +164 [J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 2011, 31(3): 8-11. (in Chinese)
梁继华, 倪志琼, 陈计贺, 等. AO0235+164 天体光变周期性分析[J]. 云南师范大学学报, 2011, 31(3): 8-11.
- [7] Cowardin H, Ojakangas G, Mulrooney M, et al. Optical signature analysis of tumbling rocket bodies via laboratory measurements [C]//Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. 2012, 1: 61.
- [8] Mao Yongna. Determination and analysis of multicolor characteristics of space debris [D]. Beijing: National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
毛永娜. 空间碎片光度多色特性的提取与分析 [D]. 北京: 中国科学院国家天文台, 2012.
- [9] Binz C R, Davis M A, Kelm B E, et al. Optical survey of the tumble rates of retired GEO satellites [C]//Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2014.