0254-6124/2014/34(2)-208–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Wang Ronglan, Liu Wei, Liu Siqing, Yan Ruidong, Gong Jiancun. An orbital anomaly analysis method based on TLE data (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(2): 208-213, doi:10.11728/cjss2014.02.208

一种基于 TLE 数据的轨道异常分析方法

王荣兰 刘 卫 刘四清 闫瑞东 龚建村

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘 要 空间在轨物体的轨道异常是航天工程及预警领域普遍关注的问题, 及时发现轨道异常意义重大, 通过分析空间物体的轨道异常, 可以及时发现和识别规避事件或碰撞事件, 还可以了解监测网的能力. 本文提出一种基于 TLE 数据的简单的轨道异常分析方法——长半轴变化法. 该方法快速有效, 应用到低轨在用卫星和美俄解体碎片的异常分析中, 异常物体正确识别率可达到 100%; 对美俄解体碎片进行轨道异常分析后得出, 美国空间监视网可以稳定探测 90% 以上的解体碎片.

关键词 轨道异常, 长半轴变化, 标准差

中图分类号 V 528

An Orbital Anomaly Analysis Method Based on TLE Data

WANG Ronglan LIU Wei LIU Siqing

YAN Ruidong GONG Jiancun

(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract Orbital Anomaly of space object is an important problem for satellite operators and users. It is very meaningful to find orbital anomaly timely and quickly. By analyzing orbital anomaly of space objects, the avoidance or collision event can be found and discriminated, further the ability of United States Space Surveillance Network (SSN) can be determined. This paper put forward a simple orbital anomaly analysis method based on TLE data called Semi-major Axis Change Method (SACM). This method is rapid and valid, and can be applied to orbital anomaly analysis of LEO operational satellites and the breakup debris produced in the Cosmos 2251 and Iridium 33 satellite collision. With this method, the discrimination accuracy rate can reach 100 percent. By analyzing the orbit anomaly of American Russian breakup debris with SACM, it is found that US SSN can steadily detect over 90 percent breakup debris.

Key words Orbital anomaly, Semi-major axis changes, Standard bias

2013-04-10 收到原稿, 2013-11-14 收到修定稿

E-mail: wangrl@nssc.ac.cn

0 引言

空间物体轨道异常通常是指由非正常摄动因素引起的轨道异常变化, 轨道异常判定是空间碎片研究领域的一项重要工作. 空间物体大致可分为两类, 一类是可控物体, 主要指活卫星, 另一类是碎片, 主要包括废弃卫星、火箭残骸以及解体碎片等. 引起卫星轨道异常的原因主要有三种 [1,3]: 一是人为控制的轨道机动; 二是非人为控制的轨道变化, 例如卫星被空间碎片撞击或燃料泄漏以及爆炸解体等引起的轨道变化; 三是环境引起的轨道异常 [2]. 引起空间碎片轨道异常的原因主要是后两种.

两行轨道根数数据序列 (Two Line Elements, TLE) 是北美防空司令部发布的空间物体轨道根数, 包含了自 20 世纪 50 年代以来的大部分编目数据, 是目前编目数量最多最完整的数据, 且更新频率较高 [4]. 空间物体的轨道异常广为关注, 如何利用 TLE 数据有效判别空间物体的轨道异常及识别非正常摄动因素的轨道异常变化十分关键.

1 长半轴变化法

空间物体受到地球引力和各种摄动力的作用, 其轨道运动是有规律地连续变化的. 但是当受到外力影响或者空间环境发生剧烈变化时, 其轨道就会发生异常变化, 表征为轨道参数的突变.

物体受到的外力作用主要有两种, 一种是突然受到一个脉冲力, 持续的时间非常短, 可以忽略不计, 另外一种则是小推力, 作用的推力要持续一段时间. 无论是受到脉冲力还是持续小推力作用, 物体都会产生一个速度变化, 即速度增量, 引起轨道参数发生变化. 轨道参数变化与速度增量的关系如下:

$$\Delta a = \frac{2\sqrt{(1+2e\cos f+e^2)}}{n\sqrt{1-e^2}}\mathrm{d}v_{\mathrm{U}},$$

$$\Delta e = \frac{\sqrt{1-e^2}}{na\sqrt{(1+2e\cos f+e^2)}}\cdot$$
$$[2(\cos f+e)\mathrm{d}v_{\mathrm{U}} - \sqrt{1-e^2}\sin E\mathrm{d}v_{\mathrm{N}}],$$

$$\Delta i = \frac{a(1-e\cos E)\cos u}{na^2\sqrt{1-e^2}}\mathrm{d}v_{\mathrm{W}},$$

$$\Delta\Omega = \frac{a(1-e\cos E)\sin u}{na^2\sqrt{1-e^2}\sin i}\mathrm{d}v_{\mathrm{W}},$$

$$\Delta\omega = \frac{\sqrt{1-e^2}}{nae\sqrt{(1+2e\cos f+e^2)}}\cdot$$
$$[2\sin f\mathrm{d}v_{\mathrm{U}} + (\cos E+e)\mathrm{d}v_{\mathrm{N}}] - \cos i\Delta\Omega,$$

$$\Delta M = -\frac{3n}{2a}\Delta a - \frac{1-e^2}{nae\sqrt{(1+2e\cos f+e^2)}}\cdot$$
$$\Big[\Big(2\sin f + \frac{2e^2}{\sqrt{1-e^2}}\sin E\Big)\mathrm{d}v_{\mathrm{U}} +$$
$$(\cos E - e)\cdot\mathrm{d}v_{\mathrm{N}}\Big]. \tag{1}$$

式 (1) 中, $\mathrm{d}v_{\mathrm{U}}, \mathrm{d}v_{\mathrm{N}}, \mathrm{d}v_{\mathrm{W}}$ 分别为沿迹方向 (U 方向)、主法向 (N 方向) 和轨道面法向 (W 方向) 三个方向的速度增量, Δa, Δe, Δi, $\Delta\Omega$, $\Delta\omega$, ΔM 分别为轨道长半轴、偏心率、倾角、升交点赤经、近地点辐角和平近点角变化. 从式 (1) 可以看出, 半长轴变化与沿迹方向速度增量有关, 倾角和升交点赤经与轨道面法向速度增量有关, 而其他三个轨道根数的变化与沿迹方向和主法向速度增量都有关.

1.1 长半轴变化法分析步骤

长半轴、偏心率和倾角作为三个主要的轨道参量, 其中长半轴变化由沿迹方向速度增量引起, 倾角变化由轨道面法向速度增量引起, 偏心率变化则由沿迹方向和主法向两个方向速度增量共同引起. 通常要引起主法向和轨道面法向的速度发生变化比较困难, 无论是碰撞、爆炸解体还是变轨机动, 沿迹方向速度增量一般最大, 表征为长半轴的变化最为显著. 因此, 判断一个物体轨道是否发生异常最直接的方法就是分析轨道平均运动或长半轴的变化, 本文就采用了长半轴变化作为判断异常的物理量来对空间物体的轨道异常进行分析.

正常情况下, 受地球引力及各种摄动因素影响, 在轨物体的轨道长半轴是规律性发生变化的, 如果长半轴在一段时间范围内变化的幅度超过了正常变化幅度, 则可判定发生异常. 正常的变化幅度可以通过对历史资料进行分析得到, 也可通过摄动解的公式分析得到, 一般变化幅度不会太大, 但是受到外力作用或者环境发生异常时, 长半轴的变化要比正常变化幅度大很多. 因此, 可以根据历史资料确定长半轴的正常变化幅度, 判别最近的长半轴变化是否异常.

根据历史数据计算长半轴变化的均值、标准差与时间的关系, 长半轴变化均值即为长半轴变化的平均幅度, 标准差为表征长半轴变化偏离均值的物理量. 本文以长半轴变化的均值和标准偏差作为参量进行异常分析. 具体步骤如下.

(1) 取分析时间段前三个月 (或更长时间) 的数据作为样本进行分析, 以任意一个时刻的轨道数据作为基准, 计算其余数据点相对基准点的时间变化和长半轴变化, 得到一系列的时间变化 Δt 和长半轴变化 Δa.

(2) 获得一系列时间变化与长半轴变化值后, 根据时间变化量 (以天计) 进行分类, 对时间变化量进行四舍五入取整, 对长半轴变化取绝对值, 得到一系列整数天的长半轴变化绝对值 $|\Delta a|$.

(3) 对每个整数天样本, 计算长半轴变化绝对值均值 $\overline{|\Delta a|}$ 和标准偏差 $\sigma(|\Delta a|)$, 以长半轴变化绝对值均值与 3 倍标准偏差之和作为基本判据的参量组合, 则每个空间物体每个整数时间间隔可得到一个长半轴变化判据, 即 $k_1[\overline{|\Delta a|}+3\sigma(|\Delta a|)]$, 其中 $k_1 \geqslant 1$.

(4) 对于给定的分析时间范围, 顺序获取该时间范围的轨道根数, 计算相邻轨道根数的时间差 Δt 和长半轴变化绝对值 $|\Delta a|$, 与对应时间间隔的判据进行比较, 超过判据, 认为异常, 否则认为非异常.

1.2 野值剔除方法

由于监测或其他原因, 系列 TLE 数据存在很多异常或野值点, 样本及分析数据均需要进行野值处理. 对于样本, 若要获得长半轴的正常变化值, 需要对异常或野值点进行剔除; 对于分析数据, 异常分析结果中也需要对野值进行剔除. 本文是根据以下特性对分析数据野值进行剔除的.

(1) 样本异常点和野值的剔除

对于样本量足够大的情况, 为了简化处理, 考虑一般野值和异常点不会超过 20%, 因此, 直接以 20% 作为删除比例对样本的较大值进行剔除.

(2) 分析数据的野值剔除

对于分析数据, 野值点是异常点, 野值点相邻长半轴变化量的乘积为负, 而且野值点相邻点的长半轴变化之和非常小.

2 LEO 轨道在用卫星异常分析

根据美国忧思科学联盟 (Union of Concerned Scientists) 的统计数据, 对其中低轨道的 401 个在用卫星进行轨道异常分析. 采用 2009 年上半年的 TLE 数据作为样本, 对 2009 年下半年的低轨在用卫星进行轨道异常分析.

2.1 异常分析判据确定

对分析数据进行处理, 得到相邻 TLE 数据的最大时间变化量, 将其作为样本数据的时间变量最大值. 在轨卫星的更新频率通常较快, 该值一般不会超过 7 天, 大部分卫星的更新时间为 1 至 2 天.

异常判据 $k_1(\overline{|\Delta a|}+3\sigma(|\Delta a|)$ 中, 当 $k_1=1$ 时, 正常分析数据中 99.74% 都符合该判据, 但是由于卫星异常原因复杂, 异常时长半轴变化远大于正常变化幅值, k_1 的取值不仅与卫星的轨道特性和物理特性相关, 还与机动推力大小和时间等异常变化原因相关. 这些信息尤其是机动信息很难获取, 具体操作中可以通过对比程序计算结果与人工判别结果, 调节该因子. 最后确定 $k_1=3$, 即在用低轨卫星长半轴变化的异常阈值为 $3(\overline{|\Delta a|}+3\sigma(|\Delta a|)$.

初步筛选的结果中还需要对野值进行进一步处理, 对异常结果剔除野值. 即如果异常, 进一步判断相邻长半轴变化量乘积是否为负以及相邻点的长半轴变化之和是否小于 $k_2\overline{|\delta a|}$, 这里 $\overline{|\delta a|}$ 为每天的长半轴变化绝对值的均值, 根据经验分析确定 $k_2=5$, 如果满足则认为是野值. 即野值满足

$$\begin{cases} \Delta a(j)\Delta a(j+1)<0, \\ |\Delta a(j)+\Delta a(j+1)|<5\overline{|\delta a|}. \end{cases} \tag{2}$$

2.2 异常计算结果

长半轴变化法直接用不同时间差的长半轴变化作为判据进行轨道异常分析, 同时对野值进行剔除. 对所有在用的 401 颗低轨道卫星进行异常分析, 得到以下结果.

(1) 对异常结果剔除野值后, 得到异常点共 1492 个, 涉及 190 个物体, 这 190 个物体在分析时间内都发生过异常. 对异常点进行分析, 在 1492 个异常点中, 涉及到的变轨段为 332 个, 而人工判断的变轨段 394 个, 漏报率为 16% (见表 1).

(2) 分析 190 个物体的变轨段数量, 其中 120 个物体人工判断的变轨段数量与程序计算结果相同, 14 个物体人工判断的变轨段数量小于程序计算结果, 56 个物体人工判断的变轨段数量大于程序计算结果, 变轨段判断正确的比率为 63% (见表 2).

(3) 计算的非异常物体共 211 个, 对这 211 个物体的轨道平均运动进行分析, 其中, 21 个物体异常, 涉及变轨段 50 个. 程序计算的非异常的物体中, 90% 判断正确 (见表 3). 401 个物体中有 21 个物体异常未能识别, 即程序能识别出 95% 的异常物体.

表 1 低轨道在用卫星的异常计算结果

Table 1 Anomalous results of the operational LEO satellites

异常点	异常物体数	变轨段数量		漏报率
		程序计算	人工判断	
1492	190	332	394	16%

表 2 程序计算异常在用卫星的变轨段统计结果

Table 2 Statistical results of the anomalous operational satellites

程序计算	人工判断与程序计算结果对比			异常判断
异常物体数	相同	小于	大于	正确率
190	120	14	56	63%

表 3 程序计算非异常卫星的人工分析结果

Table 3 Analysis results of non-anomalous satellites

程序计算非异常物体数	人工判断数量		非异常物体数 (人工判断)	非异常判断正确率
	异常物体	变轨段		
211	21	50	190	90%

3 美俄卫星碰撞解体事件碎片异常分析

解体事件是空间碎片最主要的产生来源, 也是轨道异常事件中的一个重要分类. 解体事件发生后, 参与解体的空间物体轨道发生异常, 轨道异常的程度及方式与解体事件强度及方式相关. 2009 年 2 月发生的美俄卫星碰撞解体事件是一次比较大的轨道异常事件, 也是两个编目航天器首次发生的碰撞解体.

碰撞解体发生后, 美国铱星 33 和俄罗斯宇宙 2251 轨道都发生了异常, 表征轨道的三个重要参数长半轴、偏心率、倾角都在解体时刻发生了较大变化. 针对此次解体事件, 利用长半轴变化法进行分析, 确认此次碰撞解体导致了轨道的异常变化. 进一步对美俄解体碎片的轨道异常变化进行分类, 并利用长半轴变化法对解体碎片的轨道进行异常分析, 初步评估了美国空间监视网的探测能力.

3.1 卫星轨道异常分析

根据美俄卫星的编目轨道根数预测到两卫星发生危险交会的风险度极高, 进一步通过长半轴轨道异常分析方法确认两卫星轨道同时发生了异常变化, 交会和异常分析可以帮助发现或确认解体事件. 在美俄卫星解体前, 两个卫星轨道规律性地发生变化, 铱星 33 由于任务要求, 进行周期性地轨道维持, 不过变化幅度不大, 长半轴的变化幅度都小于 0.05 km, 在碰撞时刻, 两个卫星轨道同时发生突变, 宇宙 2251 卫星的长半轴变化量为 3 km, 铱星 33 的长半轴变化量约 6 km, 变化幅度均远大于正常变化 (见图 1 和图 2).

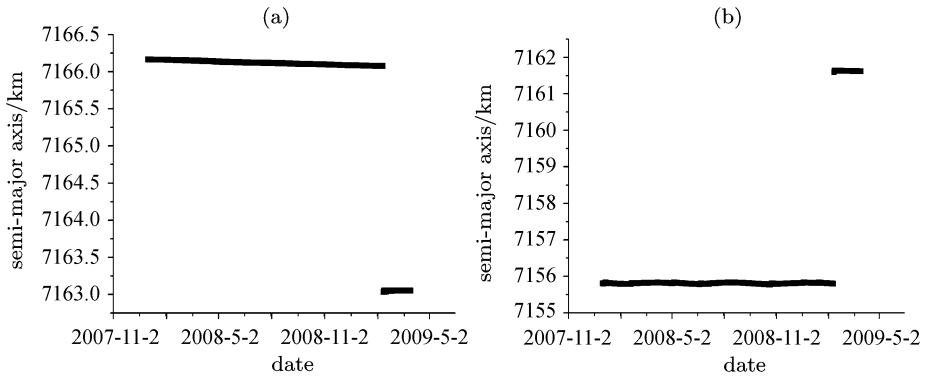


图 1 宇宙 2251(a) 和铱星 33(b) 的长半轴变化

Fig. 1 Semi-major axis changes of Cosmos 2251 (a) and Iridium 33 (b) satellite for breakup

3.2 碎片轨道异常分析

卫星碰撞解体通常会产生一定数量的碎片, 这些碎片从解体点获得速度增量沿各个方向分散. 解体碎片初始较为集中, 而且由于解体碎片本身特性, 造成探测困难, 表征为解体碎片的轨道数据出现异常, 可用长半轴变化法对异常进行识别. 以美俄卫星碰撞解体事件为例, 对解体碎片进行轨道异常分析.

美俄解体碎片的轨道异常表征为三种形式: (1) 轨道初始不稳定; (2) 轨道发生突变; (3) 数据出现离群点, 即野值点, 如图 3 所示.

解体碎片初始数据不稳定主要是由于解体碎片云初始比较集中, 很难监测识别; 解体碎片的轨道发生突然变化通常是由于碰撞或者爆炸引起的, 但是这种概率比较小, 也可能是监测或轨道确定过程中出现的问题; 数据中的野值点通常是由于探测引起的. 轨道异常分析的目的主要是识别第二种轨道突变情形. 由于空间物体的密度相对较小, 发生碰撞而造成轨道异常的概率其实是非常小的, 因此, 如果不考虑碰撞引起的轨道异常, 解体碎片的异常比例实际上可反映美国空间监视网的探测能力.

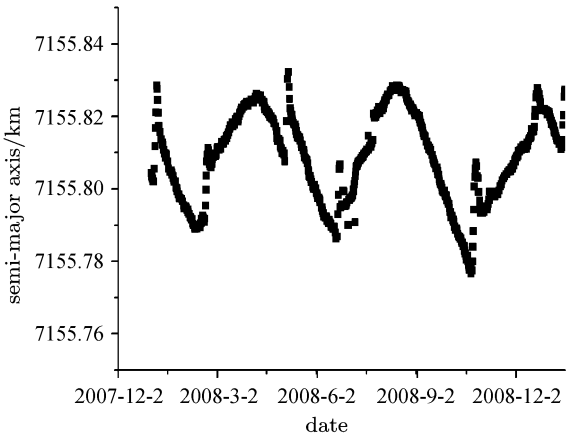


图 2 碰撞解体前铱星 33 的轨道长半轴变化

Fig. 2 Semi-major axis changes of Iridium 33 satellite before breakup

利用长半轴变化法对美俄卫星碰撞解体碎片进行轨道异常分析. 采用 2009 年上半年的 TLE 数据作为样本, 对 2009 年下半年的美俄卫星碰撞解体碎片进行轨道异常分析. 可以通过调节异常因子 k_1 值, 获得最优的异常分析结果, 最终确定 $k_1 = 10$ 时, 异常分析结果最为理想.

3.2.1 宇宙 2251 解体碎片轨道异常分析

宇宙 2251 解体碎片的轨道异常分析结果如下.

(1) 计算得到 49 个物体异常, 其中 10 个物体轨道变化快 (8 个属于陨落再入阶段). 如果认为轨道变化快属于轨道异常范畴, 则程序计算得到异常物体数的正确率为 100% (见表 4).

表 4 宇宙 2251 解体碎片的程序计算和人工判断的异常物体数量对比

Table 4 Comparison between SACM results and human judgment results of anomaly objects for Cosmos 2251 breakup debris

程序计算结果	异常物体	49
人工判断结果	确实异常物体	39
	轨道变化快 (不包含再入)	2
	陨落再入	8

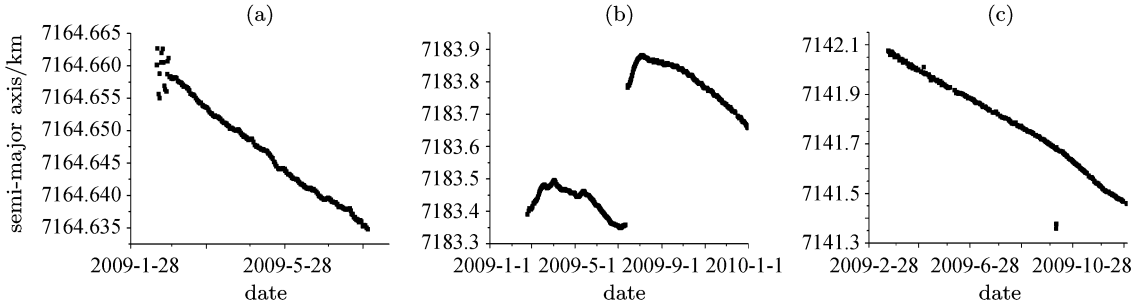


图 3 美俄解体碎片的轨道异常表征形式

Fig. 3 Semi-major axis changes of the breakup debris

(2) 39 个确实发生轨道异常的宇宙 2251 碎片中, 程序计算出 39 个物体包含的变轨段为 44 个, 人工判断的结果为 45 个, 其中 38 个物体的程序计算结果与人工判断结果相同, 有 1 个物体的程序计算结果小于人工判断结果, 即程序少计算出 1 个变轨段.

3.2.2 铱星 33 解体碎片轨道异常分析

铱星 33 碎片的轨道异常分析结果如下.

(1) 计算得到 8 个物体异常, 其中 2 个属于陨落再入阶段. 如果认为轨道变化快属于轨道异常范畴, 则程序计算得到异常物体数的正确率为 100% (见表 5).

(2) 6 个确实发生轨道异常的物体中, 程序计算出 6 个变轨段, 人工判断有 7 个变轨段, 程序计算漏掉了 1 个变轨段.

3.2.3 小结

从以上分析可以得到, 长半轴法可以有效判别美俄解体事件及解体碎片的轨道异常. $k_1 = 10$ 时, 对美俄卫星碰撞解体碎片的异常判别是有效的, 程序计算的变轨段确实是发生了轨道异常; 2009 年下半年美俄卫星碰撞解体碎片的异常率 (针对物体的数量) 分别为 2.2% (铱星 33 碎片) 和 5.7% (宇宙 2251 碎片), 宇宙 2251 碎片的异常结果较铱星 33 碎片多.

表 5 铱星 33 解体碎片的程序计算和人工判断的异常物体数量对比

Table 5 Comparison of SACM results with human judgment results of anomaly objects for Iridium 33 breakup debris

程序计算结果	异常物体	8
人工判断结果	确实异常	6
	陨落再入	2

4 结论

轨道异常是航天工程技术领域的一个重要问题. 本文给出轨道异常定义并进行分类, 通过分析轨道参数变化与速度增量的关系, 提出了一种简单有效的轨道异常分析方法——长半轴变化法, 即根据历史数据, 计算不同时间间隔下长半轴绝对变化量的均值和标准偏差, 以这两个参数作为基本变量, 组合得到异常判据. 针对不同轨道的物体特性, 给出不同时间间隔下的异常阈值, 判别要识别物体的异常情况.

针对在用低轨道卫星和美俄卫星碰撞解体碎片, 利用长半轴变化法进行了轨道异常分析, 给出低轨道卫星和美俄卫星碰撞解体碎片的轨道变化特点, 验证了该方法快速有效, 低轨道在用卫星和美俄解体碎片异常物体分析的判别正确率达到 100%, 美国空间监视网可以稳定探测 90% 以上的解体碎片.

另外, 所提出的异常分析方法中, 异常阈值的选择是根据统计分析得到的, 其值与物体的轨道、特性以及探测能力等因素相关, 由于卫星通常较大, 形状规则, 姿态相对稳定, 对其探测相对容易, 一般其数据质量高且更新稳定. 碎片一般较小, 形状不规则, 姿态不断变化, 有些很难探测, 因此, 通常确定碎片异常的阈值较大. 本文主要针对两类物体给出了阈值选择的建议, 对类似特性的物体可以提供参考.

参考文献

[1] Patera R P. Space event method [C]//AIAA/AAS Specialists Conference. Colorado: Keystone, 2006: 21-24

[2] Johnson N L. Environmentally-induced debris sources [J]. *Adv. Space Res.*, 2004, **34**:993-999

[3] Patera R P. Space event detection method [J]. *J. Spacecr. Rockets*, 2008, **45**(3):554-559

[4] Kelecy T, Hall D, Hamada K, Stocker D. Satellite maneuver detection using Two-Line Element (TLE) data [C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Wailea, Maui, Hawaii: The Maui Economic Development Board, 2007