



利用商业望远镜加强对地球同步轨道的太空态势感知

A Call to Action: Aid Geostationary Space Situational Awareness with Commercial Telescopes

丹尼尔·穆梅, 美国空军上尉 (Capt Daniel Moomey, USAF)



前言

地球轨道中, 聚集着大量人造物体, 每一次太空发射, 都是一次增加。太空时代早期,

GEO = 地球同步轨道
SSA = 太空态势感知
visual magnitude [vm] = 能见度
Pan-STARRS = 全景巡天望远镜
与快速响应系统
COTS = 商业现货
TLE = 两行元素数据集
SADSS = 小孔径深太空监视系统
GEODSS = 陆基光电深太空监视系统

人类共用的地球轨道尚无拥堵之忧, 但经过 50 多年的太空开发, 绕地球运

行的卫星之间, 间隔已经越来越小。本文拟探讨这一问题, 重点关注对地球同步轨道 (GEO)。

太空领域变得如此拥挤、抗衡、和竞争, 轨道上卫星相撞的几率不断增大, 可能对人类生活造成全球性影响。¹ 不仅民间运作离不开太空服务, 美国军方对天基资产的依赖也越发紧密, 于是, 这些资产的价值越来越高。太空不仅更加拥挤, 而且更加抗衡, 为获得并保持太空态势感知 (SSA), 我们必须思考如何增加监测资源的种类和数目。

本研究的背景和目的

由于绕地球轨道上的人造物体（也称太空常驻物体）不断增多，要想保持精确的数量计测现在已经相当困难。美国空军编撰并维护着一份卫星编录，这也是位于加州范登堡空军基地的联合太空作战中心的任务之一。为履行此职责，空军运作一个由多处雷达和光学望远镜站点构成的全球网络，统称为“太空监视网”，此网络主要负责生成和向联合太空作战中心报告太空常驻物体的位置和轨迹。² 过去几十年来，卫星编录规模不断增长，消耗了太空监视网的资源。根据2007年《太空态势感知保障概念》文件的说法，“现有的太空监测网络……没有设计成满足、也不足以支持‘太空控制’的需要（例如，覆盖范围不足，无法提供对威胁的持续监视）。”³

对传感器监测资源的需求不断加重，对于负责跟踪 GEO 轨道上常驻物体的太空监视网传感器来说，尤其如此。能够观察到昏暗物体（低到第 21VM 级能见度）的新跟踪设备最近已经投入运行。⁴ 例如，两项不同的收集调查都独立观察到了 GEO 轨道内和周边物体的双态亮度分布。以下图 1 描述了 2006 年“欧洲太空总署（ESA）太空碎片调查”和 2010 年美国空军研究实验室（AFRL）“全景巡天望远镜与快速响应系统（Pan-STARRS 或 PS1）GEO 调查”所搜集到的轨道物体分布情况。在此两次调查中，凡经过照相机视野的物体都被列入观测统计。对 PS1 系统而言，太空常驻物体的 VM 值越高且运动速度越高，其监测阈值则降低，分别体现为破折线、虚线和实线，以每秒弧秒值（as/s）为量度单位。⁵

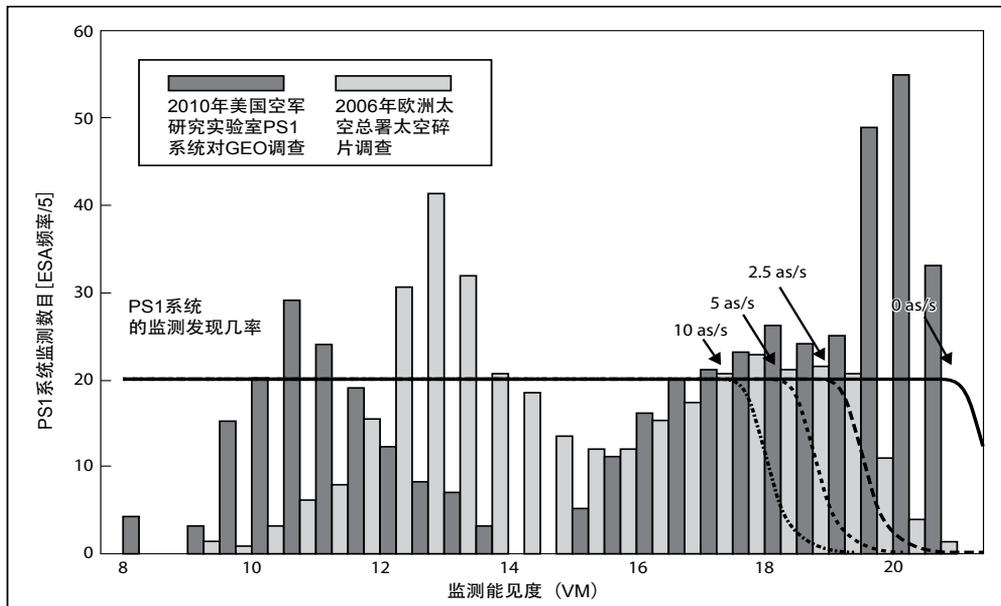


图 1：调查 GEO 轨道物体亮度直方图（取自 Mark Bolden, Paul Sydney and Paul Kervin, “Pan-STARRS Status and GEO Observations Results” [Pan-STARRS 状态及对 GEO 观测结果], [paper presented at the Advanced Maui Optical and Space Surveillance (AMOS) Technologies Conference Proceedings, Maui, HI, 2011], [2], “Figure 2: AFRL & ESA Geo Survey Comparison” http://www.amostech.com/TechnicalPapers/2011/Orbital_Debris/BOLDEN.pdf.)

从图中我们看到，在第 8VM 至第 16VM 之间，有一个大群体密度曲线，表明相对明亮和显然较大的物体大量存在。此外，在第 15VM 至第 21VM 之间，还有大量的相对较暗的物体存在。此双态分布图证明，GEO 轨道上存在着太空监视网一般不易观测的大量小型昏暗物体。虽然现有的行动跟踪系统可以观察此类物体，但是迫于更高优先级任务要求，可用的传感器时间不足，很大程度上限制了对这些物体的持续跟踪。因此，它们中绝大多数都没有被作为卫星编录的一部分来维护。没有定期轨道维护，我们就无法对它们进行关联监控和分析，这对 GEO 轨道带来无法定量的物体碰撞风险。⁶

根据《继续开普勒的追求：评估空军太空司令部天体动力学标准》所言：“（美国空军天体动力学标准评估）委员会认为，就观测无严重抗力的轨道物体而言，当前系统中的主要限制，不是算法的精确度不高，而是传感器跟踪数据的数量与质量无法满足要求。系统面临的最主要局限，包括当前传感器的覆盖范围不足，对观测质量的理解不够，以及难以应对来自不同系统和现象的不同数据如何融合的挑战。充分理解观测的质量或统计数据对于获得现实的统计协方差而言是必需的，后者又为计算碰撞的精确概率所必需。⁷

为了减轻太空监视网负担过重的问题和扩大覆盖面，国防部过去曾有节制地使用商业现货（COTS）光电望远镜系统，用于太空监视目的。现在随着底座设计、光学和焦平面领域的最新技术发展，市场上有了低成本、高效能和高精度的 COTS 天文设备。⁸ 当前的政府运作和财政紧缩环境，进一步迫使我们寻找有效、适当和成本效益高的解决方案，来应对上述的难题。为将这几项原则贯彻到

对 GEO 轨道的监控任务以提升 SSA，本文探讨如下问题：大规模使用 COTS 小孔径望远镜能否增强太空监视网对地球同步轨道的观测能力，而不会降低轨道态势评估质量？⁹

本文的研究结果给出积极的指向，这就是，COTS 设备可以满足空军的使命需求，能够让国防部腾出太空监视网中现存更大型、更有能力的光学系统，用其任务时间来观测那些较小、较暗的低优先级物体，这些物体迄今很大程度上仍未被发现或者被编录。这种调整应该参照上述评估委员会的意见（见上文），同时应该遵循以下九项 SSA 原则：

- 整合性
- 准确性
- 相关性
- 及时性
- 融合性
- 可及性和安全性
- 生存性 / 可持续性 / 可部署性
- 努力方向一致性
- 互通操作性¹⁰

或许最重要的是，实现这种状态将有助于空军太空司令部司令官实现 SSA 的五项目标与愿景：

1. 获得对太空相关系统的所有威胁的预测性情报
2. 对各种威胁保持持续观测覆盖（例如跟踪中不丢失目标）
3. 及时指认攻击和威胁来源
4. 一体化 SSA，情监侦与环境融合
5. 判定对手能力、目的和意图¹¹

为验证是否符合以上各项指标，本研究使用下列方法来设计和测试一个能够满足太

空司令部司令官各种需要的系统。首先，笔者采用一种基本系统工程方法确定选用 COTS 光学设备和软件所遵循的适用系统规范，保证这些设备和软件能够可靠地观测 GEO 轨道上的高价值太空常驻物体，以满足指挥官的五项使命要求。其次，笔者设计了一个测试系统，以确定将这一概念应用于行动环境的可行性。这样做需要对 COTS 小型光学系统获得的观测数据进行收集、处理、分析，并且与目前运行的太空监视网系统进行比较。因此，第一个目标是确定测试系统对卫星观测的度量准确性，这些观测用时间、赤经和赤纬等一系列数值来表示。第二个目标要求采用联合太空作战中心最新公布的两行元素 (TLE) 数据集格式表述的轨道估算数据，确定对观测到的太空常驻物体进行轨道测定和差分修正的可行性与质量。只对从测试系统观测到的数据在 TLE 格式上做差分修正，其目的在于包括尽量多的角度覆盖，以提高轨道测定的准确性。

本研究只使用 COTS 设备以及商业或免费软件，展示光学方式观测 GEO 高价值常驻物体的一种方法，创建高精度的度量观测，并将这些观测与联合太空作战中心公布的 TLE 交集，实现数据更新。此外，本研究使用一种“系统工具套件”模仿程序对卫星星历表进行计算和建模，以对照各自相应的 TLE 进行展示性对比。建立了准确性后，本研究再对实验设置和目前太空监视网系统之间进行度量精度的性能对比。

本研究的假设和限制

本研究项目作为一个整体，在设计假设条件时，首先预判 SSA 使命的未来发展。因此第一项假设是，对 SSA 能力的需求将继续增长，要求 SSA 及时、准确和完整。我们进

一步假定，SSA 行动的任务指令生成、收集、处理、归纳和分传等大量工作，将继续由联合太空作战中心为主承担。¹² 该中心将继续开发其“任务系统”，采用可扩展的服务器架构，并提供必要的更多处理能力，以吸收本研究提议的系统所生成的观测数据，用于执行卫星编录的维护。此外，本研究假定（虽不一定完全正确），现有太空监视网的 GEO 观测站点承担的主要任务是对 GEO 高价值常驻物体优先观测，GEO 轨道上的这些高价值常驻物体通常体积较大，也相对更明亮。这种情况，为我们思考如何帮助负责 GEO 轨道 SSA 使命的现有资产减轻优先任务负担提供了基础。

按此思路，我们可以利用物美价廉的 COTS 设备，专门观测和收集可见光区内大型、明亮的地球同步卫星的信息。收集的观测数据，在数量和质量上受天气、当地天空亮度以及设备的限制。测角精度和观测精度也受图像处理技术的限制，例如不易精确确定观测完成的时间。我们将储存图像的电脑时钟与美国海军天文台网站的主时钟同步，便能确定图像的准确捕捉时间。该天文台和美国国家标准计量院时间服务器所宣布的精度，误差只在整秒内 (± 0.5 秒)。¹³

对观测的分析，采用联合太空作战中心公布的一般摄动 TLE 数据集，进行基线比较。当本研究使用一般摄动精度时，卫星的观测位置和预期位置之间的误差通常在联合太空作战中心的 GEO 轨道 TLE 数据集的平均精度内。由于这一发现和观测时间跨度相对较短的缘故，此项研究不能将 TLE 作为合适的精度基准，据此验证测试系统的传感器偏置值。

因为本项研究局限于解决太空司令部司令官针对 GEO 轨道高价值资产所提出的 SSA

目标 / 愿景，研究的重点集中于单点设计分析。本研究致力使镜头主孔径尽可能小，同时使此小孔径所能观测的能见度 VM 级尽量大，并对太空常驻物体的性质和观测条件做合理的最坏情况假设，在这些条件下对系统设计进行优化。为将研究限制于重点研究系统设计和观测质量分析，笔者认为 SSA 的其它原则——主要是安全性、可部署性和可持续性——也十分重要，将在下一节中涉及，但不做深入分析。

本研究的运行系统设计与规范

根据太空司令部司令官的说法，若要增强现行能力，就必须增加更多的 SSA 能力。从既定任务需要到任务要求的衍生、有效性衡量指标和性能衡量指标，本研究将提出一个假设系统性能规范，以展现大规模采用

COTS 设备将如何对 GEO 轨道的 SSA 使命有所助益。本文将采用的 COTS 设备统称为“小孔径深太空监视系统” (SADSS)，并根据太空司令部司令官欲达到的 SSA 目标和愿景，具体分解成六项任务要求，制成以下表 1。这些任务要求旨在解决司令官的五项目标。从这些任务要求中，进一步导出对有效性的衡量指标，亦列入表 1。

进一步，有效性衡量指标的目的在于衡量系统满足各项任务要求的能力。本研究再依据有效性衡量指标，建立起设计参数和性能衡量指标，制成表 2。有关性能衡量指标的定量值，请参阅作者的原始论文。¹⁴

基于任务要求，在纳入小孔径 COTS 解决方案的前期努力和本文介绍的研究之间，出现了两种截然不同的差异。在 MR2 中，建

表 1：对 SADSS 系统的任务要求和有效性衡量指标

MR1	该 SADSS 系统应能观测 GEO 常驻物体并生成相应的元素集；此元素集应与现有太空监视网的观测结果和创建的元素集同样准确或者更准确（满足上述的太空司令部司令官目标 1）。 MOE 1-1 传感器度量精度 MOE 1-2 星历表精度
MR2	该 SADSS 系统系统应能观测 GEO 轨道所有经度上的高价值太空资产（满足目标 1 和 2）。 MOE 2-1 监测 GEO 轨道高价值常驻物体的概率 MOE 2-2 覆盖范围
MR3	该 SADSS 系统应能对 GEO 轨道任何位置上的兴趣目标提供持续覆盖（满足目标 2）。 MOE 3-1 覆盖时间
MR4	该 SADSS 系统应能将对 GEO 轨道上高价值常驻物体的观测结果，近实时提供给联合太空作战中心（满足目标 3）。 MOE 4-1 观测采样率 MOE 4-2 天体测量板解决方案成功率
MR5	该 SADSS 系统应能将观测结果以客户可吸收的格式提供给客户（满足目标 4）。 MOE 5 利用 SADSS 观测结果对 TLE 进行差分修正
MR6	该 SADSS 系统提供的信息应有助于对被观测太空常驻物体的能力确定和目的研判（满足目标 5）。 MOE 6 太空常驻物体点随时间扩散功能的信噪比
MR = 任务要求 MOE = 有效性衡量指标	

表2: SADSS 的最终系统规范和性能衡量指标

任务要求 (MR)	有效性衡量指标 (MOE) 和效果	设计参数和规范			性能衡量指标 (MOP)
MR1	MOE 1-1 传感器度量精度高	视图像素场 2 arcsec (12微米像素 间距)		图像时间精度 < ±0.133 sec	MOP 1-1-1
					传感器 Sigma 总值
	MOE 1-2 生成的星历表信任度和 精度高	太阳角限度 0°-100°		传感器总 计时精度 + 成像精度 = 5 arcsec (est.)	MOP 1-1-2
					传感器偏差
MR2	MOE 2-1 监测到高价值常驻物体 的概率高	孔径 25 cm	太空常驻物 体面积 ≥ 4 m ²	轨道平均电荷耦 合器件量子效率 75%	MOP 2-1-1 被监测信号
	MOE 2-1 监测到高价值常驻物体 的概率高	电荷耦合器件噪音 读值 8 e-/pix 暗度 .2 e-/pix/sec		天空噪音 迪戈加西亚岛 + 2vm/arcsec ²	MOP 2-1-2 被监测噪音
	MOE 2-2 覆盖范围大	焦距 1.25 m	胶卷格式 30.5 x 30.5 mm		MOP 2-2 视野
MR3	MOE 3-1 覆盖时间	太阳角限度 0°-100°	站点数目 5		MOP 3-2-1 被观测轨道 MOP 3-2-2 最低仰角
MR4	MOE 4-1 观测速度提高	曝光时间 1 sec	处理时间 < 6.5 sec		MOP 4-1 曝光时间 + 处理时间
	MOE 4-2 天体测量解决方案成功 比例高	视野 2° (1.4°x1.4°)	孔径 25 cm		MOP 4-2-1 被监测星数目
	MOE 4-2 天体测量解决方案成功 比例高	焦距 1.25 m	孔径 25 cm		MOP 4-2-2 图像失真
MR5	MOE 5 差分修正成功	校准数据 需要验证	兼容信息 GEOSC格式		MOP 5 剩余排斥 %
MR6	MOE 6 能提供可行动信息	信噪比采样率 观测采样率	信噪比错误 要求客户输入		MOP 6 光曲线度量质量

议的 SADSS 系统仅负责观测 GEO 轨道高价值常驻物体。根据马克·博尔登、保罗·悉尼和保罗·凯尔文的说法,“已被理论化和广泛接受的是:明亮物体群体 (< 16VM) 主要

由正在运行的和已经报废的人造卫星组成;而昏暗物体群体则主要由太空碎片组成。”¹⁵ 因此,本研究假定 GEO 轨道高价值常驻物体总体而言亮度大于 16VM。MR3 部分也不同

于以往研究中的 MR3，因为它要求对太空常驻物体进行持续覆盖。为满足此要求，本研究将传感器设置为对 GEO 轨道中特定经带做速率跟踪。速率跟踪带来多种好处，例如，在晴间多云天空条件下增加发现太空常驻物体的概率；此外，它还能在黑暗时段对兴趣常驻物体进行持续事件监测。当前的太空监视网光学传感器能够以速率跟踪模式观测，但是通常在恒星模式下操作，以数目有限的望远镜覆盖更大的范围。¹⁶ 因此，现行的太空监视网系统对每颗卫星每天只观测几秒钟的时间。

永久的速率跟踪提供持久性，从而满足 MR3 的需要，但它也有根本性的不足。即：系统的监视区域相对于 GEO 轨道是静态的，对天空的其余部分监视不到。为了克服这一缺陷，必须将 SADSS 系统视为一个整体，在多个站点设置多个传感器，每个站点观测轨道的不同部分，从而做到全覆盖（图 2）。建议的整个系统构架将在五个站点的每一个中使用大约 60 架望远镜组成的阵列。位置列表中包括三个“陆基光电深太空监视”（GEODSS）站点位置——夏威夷州毛伊岛 [1]；新墨西哥州索科罗 [2]；迪戈加西亚岛 [3]——加上计划建造的澳大利亚埃克斯茅斯的太空监视望远镜站点 [4]，以及阿森松岛上的又一个望远镜阵列 [5]。图 2 所示的五个位置均注出编号，每个位置覆盖一个扇形，这种选择主要从安全、维修人员和共同通信结构（已在每个建议站点建成）考虑，解决系统可持续性和可部署性问题。

根据上述规范，本研究选择一种设计，使用日本高桥 Takahashi CCA250 天体照相机（每部价格 17,000 美元），和 e2V CCD230 42



图 2：SADSS 系统网络在 33° 仰角的传感器覆盖范围观念性示意图

相机（每部价格 42,000 美元）匹配，作为满足系统规范的参考。基座安装和房屋费用与设备费用加在一起，每个拥有 60 台传感器的站点，安装前价格总计大约 350 万美元。相比之下，GEODSS 望远镜在 2000 财年的造价为每个站点 330 万美元。¹⁷ 因此，作为一个大致数量级，估计购置两个系统的成本差不多彼此接近。

本研究采用的观测/分析方法

几项分析确定我们应选择上述 SADSS 系统。第一项分析是，以卫星亮度作为卫星尺寸、反射率和照明角度的函数，可以建立为观测者生成一个第 16VM 级能见度信号的条件。为确定高价值太空常驻物体的反射系数单值，本研究采用了多层绝缘卫星涂层的反射率值。希瑟·罗德里格斯和她的同事们进行了谱系分析，以确定多层绝缘的光学性质，以下图 3 显示了绝缘采样的可见光谱的反射带。¹⁸ 本研究假设反射率值为 15%，并且选择最大照明角度（ β 角）为 100°，以保证系统能够提供至少每晚 8 小时的连续跟踪时间，

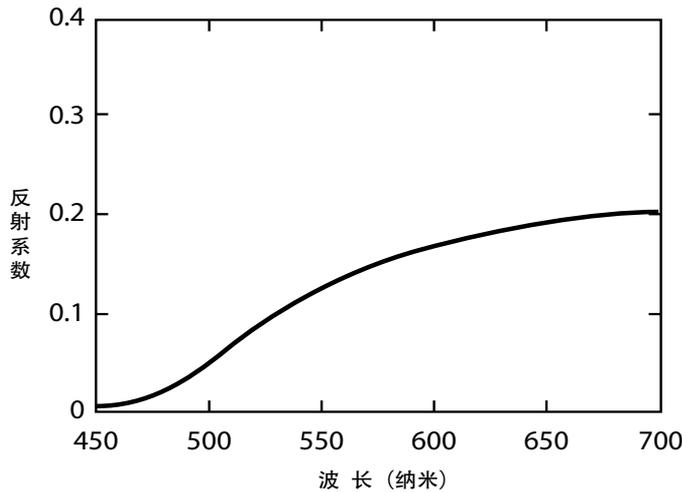


图 3 : 铜色聚酰亚胺多层绝缘反射率 (源自 Heather Rodriguez et al., “Optical Properties of Multi-Layered Insulation” [多层绝缘材料的光学性质], [paper presented at the AMOS Conference Proceedings, Maui, HI, 2007], “fig. 9,” [page 9], <http://www.amostech.com/TechnicalPapers/2007/Poster/Rodriguez.pdf>.)

目的在于跟踪足够的轨道长度，以创建出高度准确的轨道估算。¹⁹

接下来，本研究计算了作为仰角的函数的大气衰减。²⁰ 根据这一发现，选择出合理的最坏观测状况——具体来说，从迪戈加西亚岛 GEODSS 站点，以 33° 最小仰角，从视线对准凸月 45°。虽然 GEODSS 传感器被设计为操作仰角最低至 20°，但是对所选的

SADSS 站点来说，GEO 轨道的完整全球覆盖最低仰角为 33°。确定了这些合理最坏状况和约束条件之后，本研究应用辐射计测方程，可观测到一个 4 平方米的、能见度为 16VM 级的太空常驻物体。(图 4)²¹

为确定一个 4 平方米观测阈值所对应的 GEO 卫星百分比，本研究从 Space-Track.org 所公布资料生成了一份 GEO 常驻物体清单，

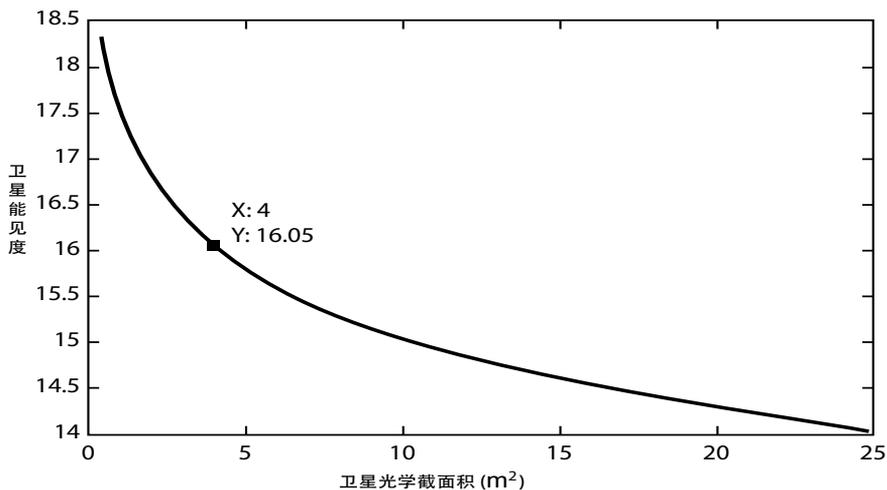


图 4 : 100° 太阳角下卫星能见度与表面积相对关系

并利用 McCants 雷达截面卫星列表作为雷达截面值的参照对比。²² 通过参照对比确定, 有 77% 的太空常驻物体, 其雷达等效反射面积 ≥ 4 平方米。

将假设和约束条件应用于辐射计测方程之后, 本研究完成了可监测表面积和主要孔径之间权衡空间的分析。结果如以下图 5 所示, 其中白色的等值线代表信噪比为 2.5——这是本研究选定的最低可监测阈值。²³ 对于孔径为 20 cm 及以下者, 本研究选择一种折射仪器; 对于孔径 20cm 以上者, 则选择 30% 遮光率的反射望远镜, 以补偿在 21cm 孔径值线上的水平移动。图 5 预测, 发现一个 4 平方米的物体需要 22cm 孔径。鉴于孔径 25cm 的 COTS 光学设备随时可购得, 也考虑到合理最坏成像情况下所能提供的性能范围,

本研究选择 25cm 孔径镜头。用 25cm 孔径镜头监测一个 4 平方米的常驻物体, 根据预期监测阈值, 可产生信噪比为 2.9 的信号。虽然该系统按照跟踪 4 平方米物体的要求设计, 但如采用更加限制的太阳角, 还可跟踪更小的物体。如使用 SADSS 传感器发现一个 2 平方米的物体, 最大角度剖面估计为 81° , 仍然可以保持年平均每晚 7 个小时的跟踪时间。

系统规范确定和设备部件选定以后, 下一步工作就是在运作相关环境中测试设备。不幸的是, 空军理工学院没有与 SADSS 系统类似的设备, 无法验证其性能。所以, 便以学院中现有的望远镜 TeleTrak 网络和电脑控制设备为代替, 来收集观测样本。所选择的望远镜是“猎户座”80mm 短筒型, 配 0.5 缩焦器 / 平场镜, 与 Meade LX200GPS 底座上

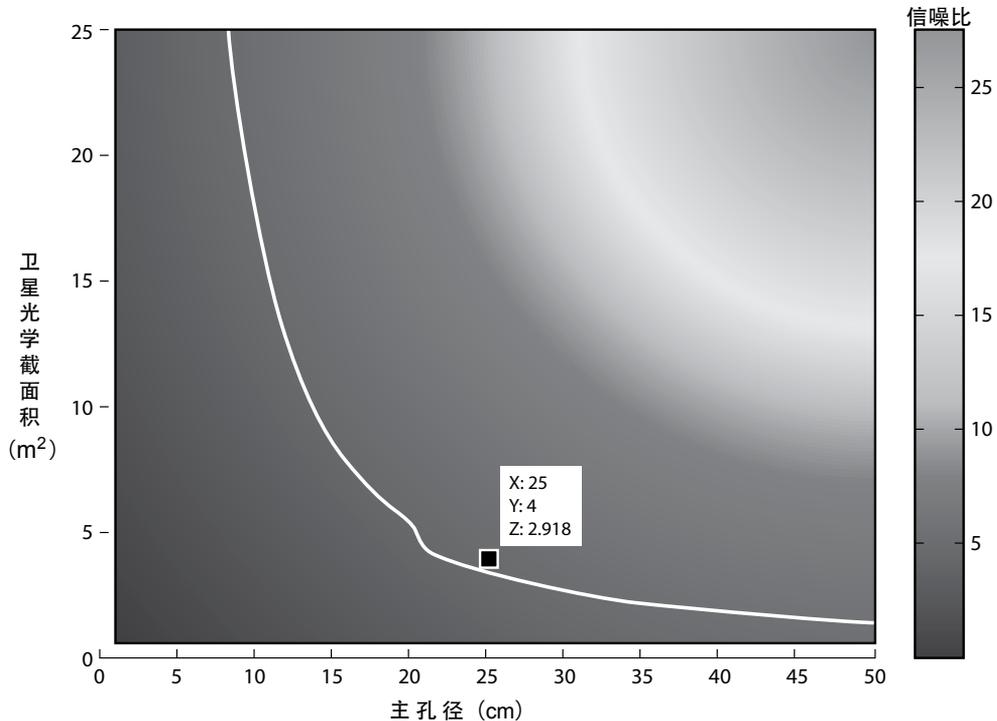


图 5 : 100° 太阳角下常驻物体表面积与主孔径相对关系

装配的 Astrovid Stellacam II 相机匹配。以下表 3 归纳出 SADSS 系统建议传感器和测试设备之间的区别。

光学相机组合所产生的视野大约是 $1.2^\circ \times 1.6^\circ$ ，其角像素的分辨率为 5.6 arcseconds/pixel（弧秒/像素）。选择此视野，是确保图像中将包含足够数量的明亮参考星，满足软件算法系统需要，以准确和反复生成结果，用以测定相对于背景星提供的惯性参照系的常驻物体的位置——这一过程叫做天体测量学。根据天体测量校正后的图像，利用捕捉到的图像中已知背景星的高精度位置，来衡量被发现的常驻物体的地面中心点赤经和赤纬。根据这些观测，就可以进行轨道的测定。

首先，需要一个高精确度的星目录，来作为天穹的基线参照。然后，必须将图像中星体的位置和相对强度做相互比较，接着再将其方向模式对比已知的星目录，找到匹配而得以识别。当望远镜作恒星模式跟踪时，可以从图像中明断地选出这些星体，使识别过程更加简单。然而，在速率跟踪模式中，星域是不断变化的，如果使用 astrometry.net 网站等提供的星匹配软件，可能非常有助于处理未知星域的大型数据集。²⁴ 一旦识别了星域，必须进行多坐标变换，在以地球为中心的惯性参考系中设立观测，然后将其应用于轨道测定目的。

为保持互通操作性和遵循被称作 B3 报告的太空监视网光学观测标准信息格式，要求

地面中心点赤经和赤纬偏角尺寸转换为“南-东-顶点”右手正交坐标系。此坐标系的角度测量值被报告为：以观测传感器位置为中心的方位角和仰角——如“华拉度算法 28”所示。²⁵ 在实际运作中，联合太空作战中心收到的是度量观测报告，表现传感器局部方位角和仰角参照系。这些角度随后转换为“地球中心惯性”参照系。一旦进入这个参照系，便可将具体常驻物体的最新 TLE 数据集与测量数据进行比照，而产生初始残差。由此出发，可以执行太空司令部用来差分修正轨道估算值的“简化一般扰动”版本 4 (SGP4) 算法，用新测量值来创建更新的 TLE。为本文研究的需要，我们采用了其中绝大多数步骤。其实，“分析图形公司轨道测定工具套件”软件允许将陆基赤经和赤纬观测数据直接纳入地面中心参照系中，只要知道观测站点位置即可。这样做，便不再需要人工应用华拉度算法来处理观测数据，可减少数据处理链的复杂性。

在收集观测数据用于处理和轨道测定时，本研究采用了两项观测活动。第一项从 2014 年 10 月 26 日开始，以确定传感器精度；第二项在 2015 年 1 月 16 至 18 日连续三个晚上进行，主要用来执行与联合太空作战中心公布的 TLE 进行轨道确定比较。观测目标是 Anik F1 卫星群，位于俄亥俄州代顿市上空西南方仰角 38° 处。这一卫星群由 Anik F1、Anik F1 R 和 Anik G1 卫星组成。Echostar 17 通信卫星以赤经 0.2° 领先 Anik 卫星群，并

表3: SADSS 系统和 TeleTrak 测试设备的区别

观测系统	费用	孔径	采样率	视野	即刻视野	时间精度	赤经总值
SADSS	\$70K	25 cm	7.5 sec	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$	2.5 arcsec	$< \pm 0.133$ sec	5 arcsec (est.)
TeleTrak	\$500	8 cm	1.07 sec	$1.2^\circ \times 1.6^\circ$	5.6 arcsec	± 0.5 sec	11 arcsec

且在视野中可以观测到。这四颗卫星都是较大的通信卫星。

本研究生成的结果

根据 2014 年 10 月 26 日的数据集，本研究从 19,000 个图像（图 6 和图 7）中提取 17,000 项有效观测结果，就此四颗卫星中每颗的赤经和赤纬数据确定了传感器精度值。赤经总和（图 6）表示的是一项次级系统性误差，被假定主要归咎于时机。

根据 1 月份的观测活动，由每 10 秒一次采样的 8,000 项观测结果所生成的星历表，与联合太空作战中心公布的相应 TLE 数据集表现出良好的对应。本研究在进行差分修正时，显示被跟踪的所有四个常驻物体都与直接来自联合太空作战中心最近公布的 TLE 的解值交集。每个最小平方轨道的确定都使用联合太空作战中心的 TLE 进行初始化，而且每一个都与 TLE 非常地相近。表 4 列出初始 TLE 数据值和来自 TeleTrak 观测的最小平方解值，以资比较。

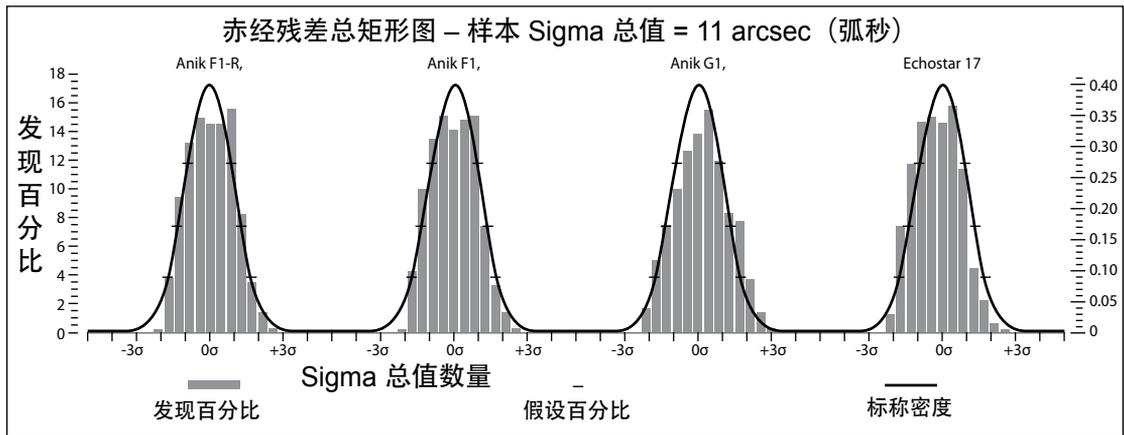


图 6：来自 2014 年 10 月 26 日观测的赤经残差总矩形图

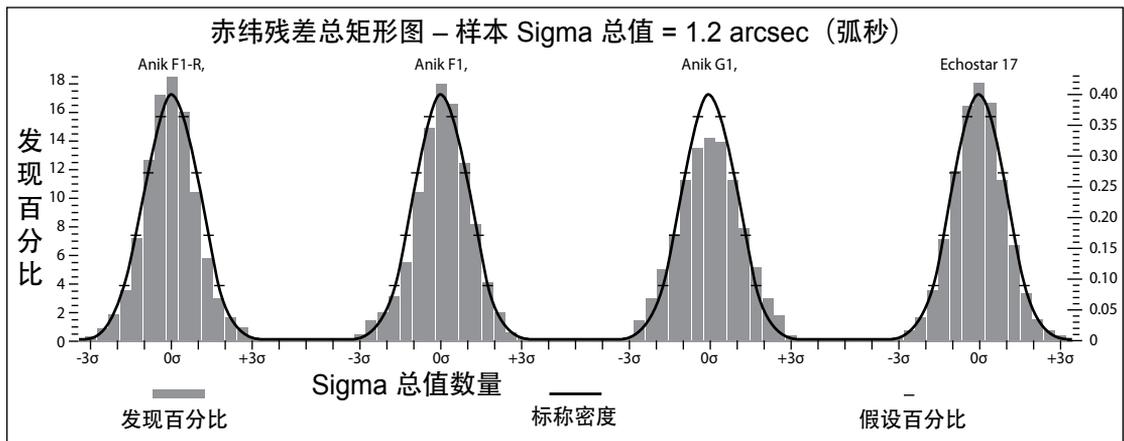


图 7：来自 2014 年 10 月 26 日观测的赤纬残差总矩形图

表4：2015年1月的星历表和TLE对比

卫星编号	来源	历元	半长轴	偏心率	倾角°	升交点 赤经°	近地点 辐角°	升交角距°
Anik F1 26624	EPH	16:56:28.395	42166.568 km	0.000341	0.09945	85.22445	100.942810	176.29852
	TLE	16:56:28.395	42165.510 km	0.000083	0.10455	88.00984	180.45842	173.45326
Anik F1R 28868	EPH	16:08:05.930	42166.947 km	0.000207	0.08719	62.59837	201.86272	186.73179
	TLE	16:08:05.930	42165.673 km	0.000276	0.09258	70.54715	266.02396	178.74061
Echostar 17 38551	EPH	09:05:20.377	42164.987 km	0.000295	0.09836	77.39478	185.73116	66.11604
	TLE	09:05:20.377	42165.708 km	0.000253	0.10981	19.17635	201.20691	64.34500
Anik G1 39127	EPH	16:16:29.058	42165.067 km	0.000211	0.09797	75.94122	242.24602	175.41940
	TLE	16:16:29.058	42165.427 km	0.000332	0.07944	75.28374	217.96316	176.11927

EPH = 本研究测试数据
TLE = 联合太空作战中心公布的两行元素数据集数据

图8和图9描述的是24小时内测试数据(EPH)生成的星历表与联合太空作战中心公布的TLE之间位置的相对变化。在测试案例2中,差动漂移率降低了一个数量级,TLE与星历表之间的差别大约为10公里半长轴。图10显示的是,在对未跟踪的轨道日光面做最后一次观测后两天内,误差扩展是如何增大的。就下面的数字而言,观测视点设置在GEO轨道之上几百公里处,居于Echostar 17号卫星与Anik卫星群之中间点。

因此在图8和图9中,与联合太空作战中心GEO轨道TLE的误差椭圆的相对尺寸,相对于地球来说,是被大幅度放大了。

这些测试案例从概念上证明,我们能够使用COTS硬件并仅用COTS软件,半自主地处理观测结果。在此过程中,只需要两三个晚上的观测,就可以将联合太空作战中心的TLE有效重建,达到其公布的GEO轨道TLE的平均精确度限值。如果能跟踪一个月,进行类似的研究,应可实现更大的改善。由



图8：TLE与星历表对比，2015年1月16日中心跟踪时间

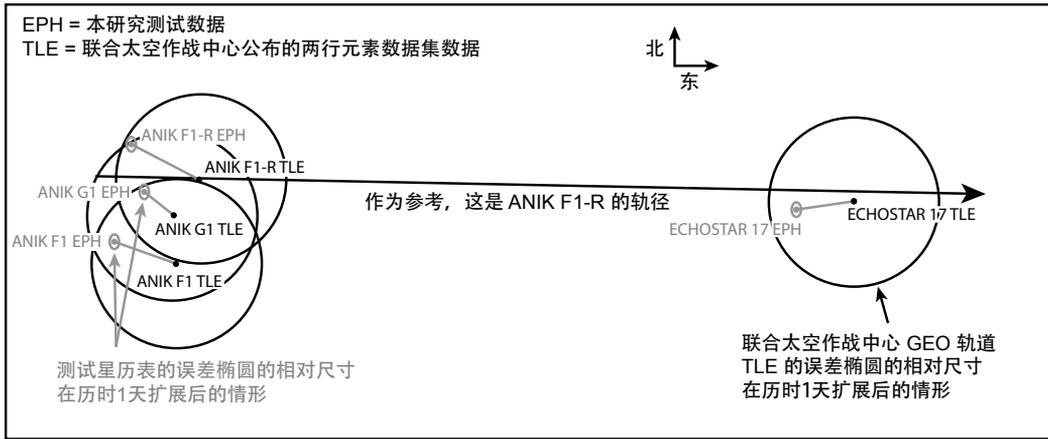


图 9 : TLE 与星历表对比, 2015 年 1 月 17 日中心跟踪时间

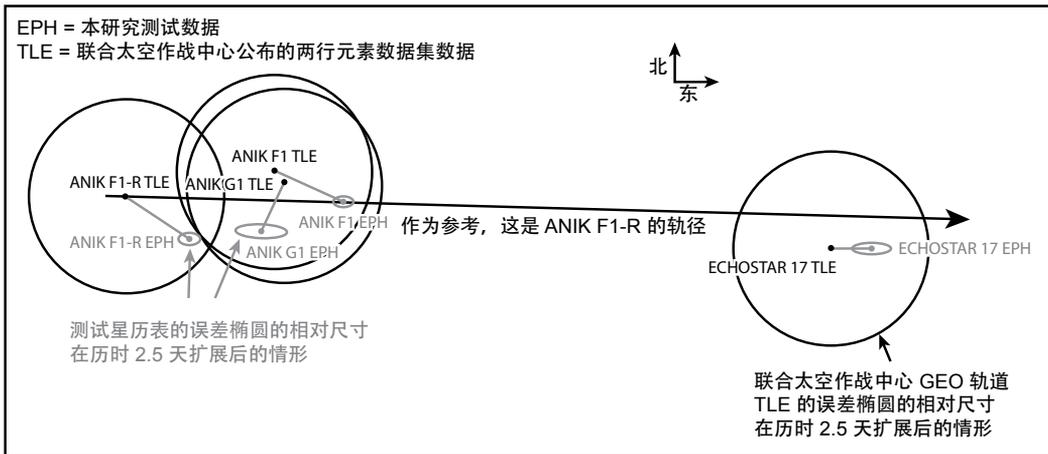


图 10 : TLE 与星历表对比, 历时 2.5 天扩展后的情形

于 TLE 的保真度相对较低, 而分析图形公司的特别扰动轨道确定算法, 以及其与“简化一般扰动”版本 4 (SGP4) 相比较而言, 缺乏透明度, 因此, TLE 和由测试数据创建的元素数据集之间变量增量的因果关系, 仍然不明确, 但有可能是时间精确度问题以及算法不匹配问题结合起来所造成。然而, 如果要使 SADSS 项目取得成果, 我们还需要使用当前的运行算法进行更全面的运行测试, 以减少未知的错误, 更透彻地了解本文建议的

该系统的性能, 以及其帮助现有光学太空监视网传感器减轻任务负担的潜力。

因为我们可以假定, 对每个常驻物体观测每 24 小时需要进行历元更新, 并且陆基光电深空监控 GEODSS 望远镜的任务是在正常运作模式下收集观测结果, 因此我们可以生成一个衡量如何减轻 GEODSS 传感器负担的减载时间度量值。假定所有九架 GEODSS 望远镜跟踪的太空物体中, 有 556 个可由小孔径深太空监视 SADSS 系统来替代监测, 这相

当于 SADSS 系统可为每架望远镜减少 62 次观测任务，亦即平均减载率等于 62，要求每晚完成 248 次观测。如果峰值生成率为每小时 116 次观测，那么我们可以为每架 GEODSS 望远镜减少 2 个跟踪小时——就是说，每晚能为 GEODSS 望远镜系统总体减少 18 个观测小时。假设我们配置 300 部 SADSS 传感器，每部 1.4° 视野，按速度跟踪模式（每小时进展 15° ）运行，全年中每 24 小时时间段里平均完成 10.5 小时跟踪；那么，总 SSA 监测率可能增加每小时 2,750 度平方，同时还将大幅度提升精确轨道测定和事件监控的持久性，而设备成本与 GEODSS 基本相当。²⁶

结语和今后的工作

为了帮助太空司令部司令官实现对 GEO 领域的 SSA 愿景和目标，本研究开发出一个系统规范，并加以测试验证，展现此系统能够观测 GEO 轨道上的球形、低反射常驻物体， β 角 81° 时可观测到 2m^2 物体， β 角 100° 时可观测到 4m^2 物体。本研究利用一个观测能力弱得多的测试系统，创建出一种方法，能半自主化生成赤经和赤纬的度量观测结果。观测精度在赤经 11-17 弧秒，以及赤纬 1.2-2 弧秒。

本文采用空军理工学院 TeleTrak 设备做了三个晚上观测，对直接取自联合太空作战中心公布的 TLE 元素数据集进行差分修正。修正后的轨道估算为：公布时跟踪中的中位数统计协方差为 570 米；相对于 TLE 的中位数矢量级大致等于 GEO TLE 的平均精度极限，计算中使用的时间只取联合太空作战中心通常生成 GEO TLE 的时间跨度的 5-10%。

虽然这一结果令人鼓舞，但若要全面回答“大批量使用 COTS 小孔径望远镜，能否

增强太空监视网对 GEO 轨道观测能力，同时又不降低轨道态势评估质量”这个研究问题，尚需开展进一步的研究。我们还应通过太空司令部的 A2/3/6SZ 办公室，利用运作传感器校准程序，对传感器总精度值和偏置值进行验证。因为 SADSS 系统采用 0.133 秒定时精度的要求，因此需要做至少 4 个因数的改进。如果可能，希望选择提议的一个或多个国防部站点，用类似 SADSS 的传感器持续收集观测数据，周期需达一个月。

如能对这项使命的各种需要做更深入的权衡分析，亦有助益。这样的深度分析可以解决各种现有的 COTS 硬设备组件、混合，以及匹配部件的选择，从中找出更优解决方案来满足既定的需求。再者，通过多点多角度检视设计方案，比较各种观测条件，如不同仰角和某特定传感器视野中的已知常驻物体，应可找出更有利的视线方向，并相应选用更低廉的设备和系统，从而进一步降低观测网络的成本。

对该方案的整体成本，还需做进一步调研和细化。本文提供的分析，只是有关主要设备的一个简单、粗略的数量级成本，没有考虑安装、计算机处理，以及运营和维护的费用。在获得更准确的项目采购和维护成本之后，便可进行更多的不同分析，确定建立 SADSS 观测网络是否合算，是否能为太空司令部实施对 GEO 轨道的 SSA 使命节省资金。

如果空军正式采购本研究所推荐的系统，那么首先需要解决本研究未予涉及的其他考虑因素，包括：资金配置、系统研发、研发过程测试和运行测试，检验和验证其性能是否满足系统要求。正在发展中的系统规划办公室、空军作战试验与评估中心，以及 / 或者第 17 测试中队等，可能将具体实施这些行

动，而过去这些行动是由太空司令部承担。为确保纳入 SSA 使命的这些数据是可信的，太空司令部 A2/3/6ZS 序号验证办公室需要积极地监督传感器的校准，一如对待太空监视网中的所有其他传感器。在后勤保障因素方面，诸如安保、通信和上述提及的维护计划等，对于 SADSS 系统的成功运作而言，也是必不可少的先决条件。不过本文推断，如能将 SADSS 传感器并置到政府的其他正在运行的光学系统中，可一定程度降低这些后勤保障

问题带来的风险。尽管如此，在着手采购这个系统前，一定要对这些考虑因素进行更深度分析。

无论选择何种解决方案，空军必须解决太空态势感知中的问题，才能创建精确的共同太空作战图景并保持下去。随着对完成和保障 SSA 使命的要求持续增长，执行该使命的资源需求也在增长。那么现在的问题是，我们眼下在做什么，我们还需要做什么，才能解决今天的需要，以及明天的问题？★

注释：

- Patrick J. Payte, "Orbit Determination and Prediction for Uncorrelated Target Detection and Tracking" [轨道确定及预测不相关目标的发现与跟踪], (MS thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Air Force Institute of Technology [AFIT], Wright-Patterson AFB, OH, 2008); 另参看 Christine M. Schudrowitz, "The Effects of Observations and Maneuvers on Orbit Solutions" [观测的效用和对轨道解值的调整], (MS thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, AFIT, Wright-Patterson AFB, OH, 2012); 另参看 Committee for the Assessment of the US Air Force's Astrodynamics Standards, Continuing Kepler's Quest: Assessing Air Force Space Command's Astrodynamics Standards [继续开普勒的追求：评估空军太空司令部的天体动力学标准], (Washington, DC: National Academies Press, 2012).
- Headquarters Air Force Space Command / Space Situational Awareness, Command and Control Operations, and Integration Branch (A3C), Enabling Concept for Space Situational Awareness (SSA) [太空态势感知保障概念], (Peterson AFB, CO: Headquarters Air Force Space Command/A3C, October 2007).
- 同上，第 8 页；另参看注释 1 中 Payte 文“轨道确定及预测不相关目标的发现与跟踪”。
- 明显能见度 (VM) 等级标度体现为：常驻物体的 VM 数值越高，就越昏暗。每增加一个整数数量级——如从第 1 级 VM 升到第 2 级 VM，视觉亮度就减少两个半因数。有关详细说明，请参看 "The Astronomical Magnitude Scale" [天文光度等级], International Comet Quarterly, <http://www.icq.eps.harvard.edu/MagScale.html>.
- Mark Bolden, Paul Sydney and Paul Kervin, "Pan-STARRS Status and GEO Observations Results" [全景 STARRS 状态和 GEO 轨道观测结果], (paper presented at the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies [AMOS] Conference Proceedings, Maui, HI, 2011), http://www.amostech.com/TechnicalPapers/2011/Orbital_Debris/BOLDEN.pdf.
- 同注释 1 文“继续开普勒的追求”第 18 页；及注释 5 文“全景 STARRS 状态”。
- 同注释 1 文“继续开普勒的追求”第 2-3 页。
- Anthony D. Gleckler and Michael C. Butterfield, "Viral Space Situational Awareness" [迅速扩展的太空态势感知], (paper presented at the AMOS Conference Proceedings, Maui, HI, 2012), http://www.amostech.com/TechnicalPapers/2012/Data_Services/GLECKLER.pdf.
- Daniel Mooney, "Aiding Geostationary Space Situational Awareness Using Small Aperture Commercial Telescopes" [用小孔径商业望远镜协助提升 GEO 太空态势感知], (MS thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, AFIT, Wright-Patterson AFB, OH, 2015), 3.
- 同注释 2，第 12 及 22-24 页。
- 同注释 2，第 14 页。
- 同注释 2，第 10 页。
- US Naval Observatory, "US Naval Observatory Master Clock" [美国海军天文台主时钟简介], <http://tycho.usno.navy.mil/what.html>; 另参看 National Institute of Standards and Technology, "NIST Internet Time Service (ITS)" [国家标准和技术学会因特网时间服务 (ITS)], US Department of Commerce, <http://www.nist.gov/pml/div688/grp40/its.cfm>.

14. 同注释 9。
15. 同注释 5, 第 [1] 页。
16. Walter J. Faccenda, “GEODSS: Past and Future Improvements” [GEODSS : 过去与未来的改进], MITRE Corporation, 2000, https://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/geodss_faccenda.pdf.
17. A. Thompson, “A GEODSS Sourcebook” [GEODSS 资源集], 19 October 2008, <http://www.fas.org/spp/military/program/track/geodss.pdf>.
18. Heather Rodriguez et al., “Optical Properties of Multi-Layered Insulation” [多层绝缘的光学特性], (paper presented at the AMOS Conference Proceedings, Maui, HI, 2007), <http://www.amostech.com/TechnicalPapers/2007/Poster/Rodriguez.pdf>.
19. Joshua T. Horwood, Aubrey B. Poore, and Kyle T. Alfriend, “Orbit Determination and Data Fusion in GEO” [GEO 轨道确定与数据融合], (paper presented at the AMOS Conference Proceedings, Maui, HI, 2011), http://www.amostech.com/TechnicalPapers/2011/Astroynamics/HORWOOorbit_determination.pdf.
20. Carolin Früh and Moriba K. Jah, “Detection Probability of Earth Orbiting Objects Using Optical Sensors” [使用光学传感器发现地球轨道物体的概率], *Advances in Astronautical Sciences*, 150 (2014): 13; 另参看 W. Jody Mandeville et al., “Sky Brightness Analysis Using a Million Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance (GEODSS) Observations” [使用百万陆基光电深空监视 (GEODSS) 进行天空亮度分析], (paper presented at the AMOS Conference Proceedings, Maui, HI, 2012), <http://www.amostech.com/TechnicalPapers/2012/POSTER/MANDEVILLE.pdf>; 另参看 Kevin Krisciunas and Bradley E. Schaefer, “A Model of the Brightness of Moonlight” [一个月光亮度模型], *Astronomical Society of the Pacific*, no. 103 (1991): 1033-39.
21. 同注释 20 中 Früh and Jah 文 “使用光学传感器发现地球轨道物体的概率”; 另参看 Steve B. Howell, *The Handbook of CCD Astronomy* [CCD 天文学手册], 2nd ed. (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006), 73; 另参看 Ryan D. Coder and Marcus J. Holzinger, “Sizing of a Raven-Class Telescope Using Performance Sensitivities” [利用性能敏感性调整“渡鸦”级望远镜尺寸], (paper presented at the AMOS Conference Proceedings, Maui, HI, 2013), http://www.amostech.com/TechnicalPapers/2013/Optical_Systems/Corbit_determinationER.pdf.
22. JFCC SPACE/J3, “Space-Track.org” [Space-Track.org 网站], Air Force Space Command, 28 January 2015, <https://www.space-track.org/#/queryBuilder>; 另参看 Mike McCants, “Mike McCants' Satellite Tracking Web Pages” [Mike McCants 的卫星跟踪网页], 5 September 2014, <https://www.prismnet.com/~mmccants/programs/qsmag.zip>.
23. 同注释 20 中 Früh and Jah 文 “使用光学传感器发现地球轨道物体的概率”。
24. “Astrometry.net” [天体测量学网站], US National Science Foundation, US National Aeronautics and Space Administration, and the Canadian National Science and Engineering Research Council, 2015, <http://www.astrometry.net/>.
25. David Anthony Vallado and Wayne D. McClain, *Fundamentals of Astrodynamics and Applications* [天体动力学和应用基础], 4th ed. (El Segundo, CA: Microcosm Press, Kluwer Academic Publishers, 2013), 272.
26. Robert F. Bruck and Capt Robert H. Copley, USAF, “GEODSS Present Configuration and Potential” [GEODSS 的当前配置和潜力], (paper presented at the AMOS Conference Proceedings, Maui, HI, 2014), <http://www.amostech.com/TechnicalPapers/2014/Poster/BRUCK.pdf>; 另参看注释 17 “GEODSS 资源集”。



丹尼尔·穆梅, 美国空军上尉 (Capt Daniel Moomey, USAF), 托来多大学文学士, 空军理工学院理科硕士, 美国空军现役军官, 现为科罗拉多州施里弗空军基地第 17 测试中队飞行指挥官, 监管空军太空系统的作战测试和评估。此前他曾赴格陵兰图勒空军基地海外部署一年, 担任第 12 太空预警中队分队长, 执行太空监视和导弹预警职责。上尉曾在联合太空作战中心担任联合太空地下发射场的太空作战管理官及作战联络官, 执行太空态势感知职责。他曾获选为加利福尼亚州范登堡空军基地第 533 训练中队重新编写及重开空军教育训练司令部的太空监视训练课程并担任教学和行政职务, 其后竞争入选俄亥俄州赖特·帕特森空军基地空军理工学院, 完成太空系统理科硕士学位。上尉与他人合著的“从哥白尼卫星测量到的弥漫星际云中氧充裕现象再探讨”一文发表于《空间物理学报》2012 年一月号 1-7 页。