

立方体卫星为加强空军太空态势感知展示新前景

A Shot in the Dark - Shedding Light on Exoatmospheric Situational Awareness with Alternate Sensor Utilization

杰明·L·巴恩斯博士, 项目管理专家 (Dr. Jeremy L. Barnes, PMP)

阿什利·N·埃利奇 (Ashley N. Elledge)

斯科特·G·巴顿, 美国空军退役上校 (Col Scott G. Patton, USAF, Retired)

这不是火箭科学——却比它更难。导弹防御系统不是简单地用一颗弹头拦截另一颗弹头,(导弹)小型再入大气层飞行器的相对速度要比弹头快一个数量级;而且,这种拦截常常好像是对着一团黑暗发射。尽管难度如此之大,击中再入飞行器不仅可能,而且已通过严格测试,成为可预期的结果。当然还存在有待改进的方方面面,其中之一就是如何获得快速、准确的态势感知,及时发现来袭的再入飞行器,并迅速予以摧毁。对此,“立方体卫星”(CubeSat),亦即配备先进传感器的小型模块化卫星,可能提供新思路和解决途径。

导弹防御介绍

美国弹道导弹防御(BMD)系统,集陆海空天全域资产为一体,以捍卫美国,保护部署战场的美军、盟国和友军为目的,提供昼夜全时防御作战能力,阻挡敌方所有射程和所有飞行阶段(发射-上升-中段-末段)导弹的攻击。美国导弹防御局的发展战略是,建立基于能力的采购方式,选择地点部署初始单元,在此基础上随着新技术的成熟,逐步扩建和完善。虽然目前已投入部署的系统为美国应对明确的弹道导弹威胁提供了有效的防御,该武器系统仍将持续开发和测试,以应对不断变化的威胁。此

CubeSat = 立方体卫星
BMD = 弹道导弹防御系统
COTS = 商业现货
ISR = 情报监视侦察(情报侦)

外,正如我们需要改善太空态势感知的需求早已被充分证明一样,我们需要继续提升对再入飞行器的侦测辨识能力以强化导弹防御。¹在这两项使命领域,我们有可能找出一些解决方案,以更好地保护我们重要的太空资产和我们的国家。

有待改进领域

即便国防部拥有无数可用的传感器,如何获得全面有效的作战空间态势感知,仍然是一个有待系统改进的领域。为支持导弹防御作战将士,美国已经投入了大量科研努力并应继续努力,其中包括如何更好地提取目标特征印记,以及如何将多元分布立方体卫星技术投入国防应用。研究的目的,是以立方体卫星为平台配备特定有效载荷,用以侦测和提取目标印记,从而确定这种低成本传感技术的可行性。从应用前景来看,超光谱成像技术和多元分布系统,以及通过多元分布立方体卫星网做数据采集,都具有适用性和实用性潜力。正如真实事件所证明的那样,及时发现来袭导弹,并判断其类型和目的,对于确定导弹的飞行轨道,向地面传感器提供警报和指向至关重要。当前的挑战,集中在提取目标印记方面,包括如何克服技术能力的限制、随机收集数据可用传感器数量不足,以及与支持越顶传感器相关的成本高昂。

部署立方体卫星网来增加急需的太空态势感知能力,可支持作战将士的其它需要,

包括对时敏性传感器情报融合的需要。立方体卫星，无论预置于轨道，还是由导弹防御拦截器搭载升空，都是潜在有效的解决方案。其他方案，如将有效载荷散宿到不同平台，重新构建指挥控制系统以及通信平台等，也都各有考虑的价值。如果军方各作战司令部和各军种、导弹防御局，以及其他联邦机构开展合作，联合进行系统开发与协调，将可能实现这些解决方案，从而改善太空态势感知、太空资产保护，以及导弹防御能力。

随着天基传感技术越来越多用于军事用途，成为现代化战争的必要组成部分，提取越顶目标印记的方法和运用，也将发展和成熟。立方体卫星技术的问世，进一步凸显出成本更低而越顶覆盖面更大的传感器的潜在优势和实用价值，显示这种解决方案能够用于军事，支持战场行动和国土防御。立方体卫星可能永远不会完全取代更大型的天基系统，但它们自有其实用价值，能增强这些更高端的系统，向它们提供关键的信息，一如其它无人值守传感器在过去的地面冲突中所发挥的作用那样。²

让我们以这样一项正在实施中的改进项目为例。弹道导弹防御即 BMD 系统的“越顶持续红外”监视构架处理来自多个越顶传感器的数据，以发现、跟踪和辨识弹道导弹威胁。这套系统的作战目的，是负责传感器信息融合，在此基础上成为整个 BMD 系统的不可分割的参与者和贡献者。在如何发现、识别、确定导弹种类等现象的探索过程中，如何提取出目标印记是一项重大的挑战。

立方体卫星载荷技术正在迅速演进，具备了支持提取这类目标印记的潜力。在这种低成本解决方案中，需考虑其有效载荷的诸多因素，如尺寸 / 重量 / 功率 / 成本（缩写

SWaP-C），还要克服其他种种限制，包括小卫星覆盖范围的管理，控制卫星分离的机制，多元分布和超光谱传感的可扩展性，以及小卫星网的必要规模。过去，立方体卫星获得的目标观测数据，通常被立刻中继到地面站进行处理，随后将任务分配给其它资产继续执行。现在，目标被初始发现（例如，由越顶持续红外监视系统首先发现）后，可以通知立方体卫星网，使其准备对目标进行跟踪并提取目标印记。这样做要求在决策处理和通信方面高度有效，而以现有的技术已经可以做到这一点。运用立方体卫星技术，可能产生一种低成本的机制，能随时随地根据需要部署传感器到特定越顶位置，并且可能增加捕获关键数据的概率，这对于支持军方的各种军事应用，都至关重要。

政府和业界正作出巨大努力探索立方体卫星技术的改进，包括评估各种有效载荷、平台和卫星网的规模。同时，旨在识别、评估和建立物理学模型的理论研究也在进行之中。进一步，通过适当的模拟实验对理论模型加以验证，藉以建立对研究可行性的信心，并更好地定义和衡量所选择的载荷的有效性。最后，建造实体样机来展示对概念的验证，事实上，有些可操作的系统已经投入使用。

因为对立方体卫星的研究将使很多用户受益，我们需要齐心协力、共同利用该领域的各种研究人员和运营者，以展现这一新兴增长领域的各种不同的价值。通过使用立方体卫星或其它散宿载荷技术，进行目标印记发现和提取，将为各参与方带来直接的利益，包括导弹防御局、军方，以及国家的其它机构。这种天基传感技术带来的利益主要体现在两个方面，一是以低成本实现对指定现象的观测和目标印记提取，二是提供附加能力

使得 BMD 越顶持续红外监视系统能向地基传感器提供高质量的精确警报；经过某些改进后，还可对导弹防御局目前正在进行的拦截后评估改进研究提供帮助。亦即，以立方体卫星组网，将它们部署在正确的位置，在正确的时间提供正确的覆盖，通过创新的方法和小型化的专用载荷传感技术，就可能实现所有这些效果。

立方体卫星一方面需要整合并依赖更大型太空平台提供的警报信息，反过来也可对这些强大系统提供能力补充。五角大楼计划在未来五年中为各种新计划拨款数十亿美元，其中包括将监视侦察传感器置入轨道，用以扩大指挥官对太空活动的态势感知。太空态势感知的重要性在不断增长，能够大大增强导弹防御局的最高优先使命，这就是拦截弹道导弹攻击，防卫国土，保护部署在世界各地的我军将士。

变革势在必行

随着技术的迅速发展，传统的大型陈旧军事系统设计，以及相关的系统工程方法也必须随之演进。及时研发有效的、耐用的、负担得起的系统，以满足系统既定任务的要求，需要克服各种挑战和困难。³ 这种环境常常推动我们渐进变革，要求我们在军事应用构架中更多地采用通用的形式、匹配、功能和商业现货即 COTS 组件。2015 年 1 月 7 日颁布的国防部 5000.02 指令《国防采购系统运作》是一部支持导弹防御和太空系统渐进发展的文件，其中就体现了这种设计理念。只要可行，要尽量采用通用小型插拔式 COTS 产品，不仅降低设计成本，更提供一条加快将新技术嵌入军事应用的途径。

美国的太空界欣然接受了相同的概念。国家地理空间情报局就表示，该机构未来的成功与否，将取决于如何接纳变革，尤其是那些由技术进步所带动的、支持全球监视覆盖的变革——而这正是该机构的既定使命领域。⁴ 2013 年 4 月 24 日，时任空军太空司令部司令威廉·谢尔顿上将，对国会参议院武装部队委员会作了如下表述：

我们的卫星为美国提供了战略优势；因此，我们必须思考我们卫星网的弱点和韧性。[我们]正在研究载荷散宿组合概念，正在评估在导弹预警和受保护的通信使命领域将战术能力和战略能力分离管理的选项。我们还在评估如何规划和使用散宿载荷和商业服务，以及向现有结构引入关键技术改进的方法。除了寻找提高效率和节约成本的必要性之外，我们很可能会发现，载荷散宿组合或卫星分散组网的做法，就对抗环境威胁和敌对威胁而言，将生成更强大的生存性、坚固性和韧性。⁵

以上论述支持渐进开发周期、COTS 产品应用、快速技术嵌入，以及天基卫星分散组网。现在有必要进一步检视如何通过超光谱传感和小卫星多元分布来提取目标印记，并重点关注这些传感技术的小型化，最终研发出的系统可能分散寄宿在天基小型平台上，提升 BMD 系统的持久覆盖能力。

当前技术方向

传感技术和天基平台

目标印记的测量、情报和提取，对于军事应用和保持我们相对于对手的竞争优势，至关重要。获得关于目标的情报数据，就能发现、跟踪和识别固定或动态目标源的明确特征。这些数据包括辨识材料、声音、核武

器和生化武器的情报。传统上，我们的BMD系统主要通过雷达技术与特定的大型天基传感器平台结合使用，获取这些数据。BMD系统搜集这些数据的目的是，为了监视、目标侦测、跟踪、类别判定、区分，以及拦截后评估。其所收集的信息满足各种具体的需要，为许多军事应用所必需。

为协助天基数据采集和优先管理，导弹防御局及其太空知识中心与太空界一道，就如何实施预定的BMD系统侦测和警报任务，定义出一个基础设施架构，并取得很大进展。这种方式为导弹防御局提供了一个结构，藉此编制和规划与数据收集相关的需求。

立方体卫星正在成为一个能够充分利用最新技术和微/纳/皮级小卫星创新工艺的研究和开发平台。⁶随着天基传感技术用于军事用途，并且成为现代战争的一个组成部分，对越顶目标印记的提取方法将不断发展和完善。当前立方体卫星技术的演进，也带动低

成本传感技术的应用，相信两者的结合更有助于增加越顶侦测的覆盖范围，更可用于军事应用。⁷未来很可能会有更多的小卫星专用于服务某些种特定的任务目标。⁸

超光谱传感

在过去十年里，用遥感数据研究和了解地球表面组成的需求大大增加，很多科研应用必须依赖这些数据，包括农业研究、沿海研究、海洋分析、地质学、气候学和国防工业。超光谱成像通过太空成像系统与光谱学的结合满足了遥感数据用户的需求。超光谱成像仪提供数字图像，其中每个像素由光谱印记组成。⁹根据随后的图像，以及底层光谱成分，可以确定地球表面的类型（图1）。¹⁰

超光谱成像可用于多种国防用途，其中之一就是目标侦测和辨识（即，确定一个图像中哪些像素可能包含已知的目标材料）。¹¹目前的研究继续利用现有的目标侦测、辨识

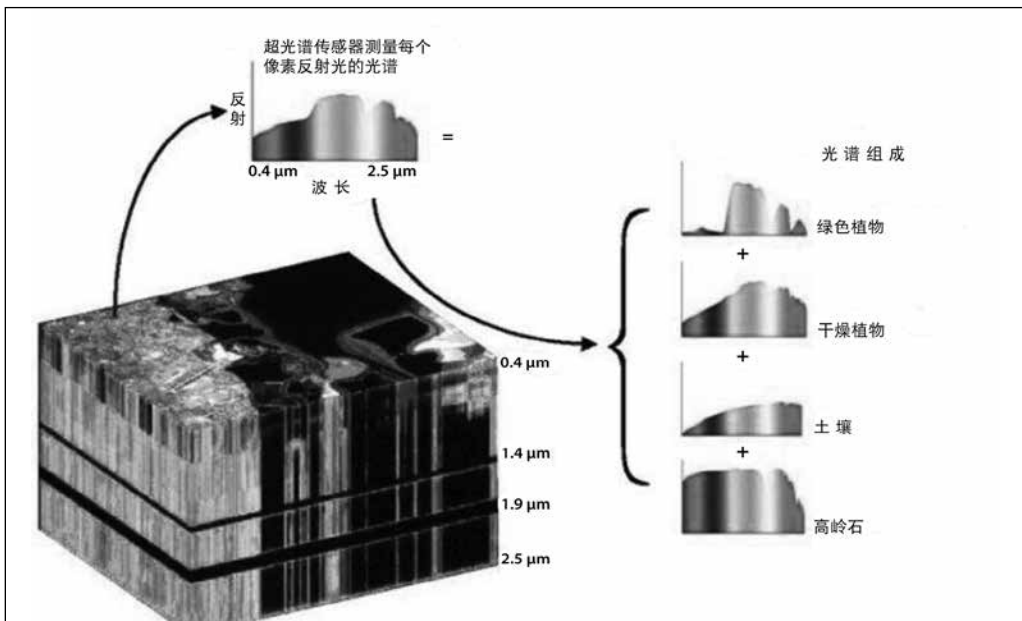


图 1：超光谱成像（源自美国海军 NEMO 项目办公室）

概念和算法，探索将研究成果纳入立方体卫星，从而为 BMD 系统服务的途径。

多元分布组网

多元分布组网是指包含多个发射器或接收器的传感器网络。这种运作是在一元传感（发射器和接收器在同一位置）和二元传感（发射器和接收器互相空间分离）概念的基础上进一步演变而成，可以解决传感器系统侦测和跟踪兴趣目标的能力局限。图 2 是一幅多基或多元雷达辨识目标的示意图。¹² 如图所示，多元传感器网络中的每个节点可以执行三种功能——发射器、接收器或发射器 / 接收器——中的一种，共同完成使命。如果构建一个全面系统，就可以最大化提升侦测具体目标的性能，或者执行大范围监测。¹³

随着美国本土和盟国所面临的威胁越来越难以发现、跟踪和识别，常规雷达可能无法提供抗衡对手系统的最佳手段。¹⁴ BMD 系统中目前大多数雷达是一元雷达；因此，如能利用低成本立方体卫星接收器作为补充，可以增强整个杀伤链的性能。¹⁵

一元传感系统的一个关键优点，是利用干涉测量法获得和处理多目标测量数据，并且提供更好的方位识别。¹⁶ 其主要缺点，则是应对特定反制手段的韧存能力差。从图 3 可看到，一个隐形目标以其独特设计和姿态，对一元节点（图左照射器）造成视角困难，但对其他接收器的视角有利，更易于它们捕获目标。¹⁷

多元传感方法可以大大加强和补充 BMD 系统目前资产的发现、跟踪（通过警报信息）和识别功能。立方体卫星界已经调研了传感器组网的各种应用，但到目前为止还没有任何机构受命牵头构建多元分布立方体卫星网络。¹⁸ 一种可考虑的方法是，使用基于地面的照射器来减少雷达孔径有限的小卫星的负担，从而获得比现有系统能力更强的侦测范围或辨识能力。

立方体卫星技术

一个典型的 U-型立方体卫星体积为 10 立方厘米，质重为 1 千克。立方体卫星作为宿主平台的主要任务是将小型有效载荷带入太空。普通立方体卫星的一般特点如下：

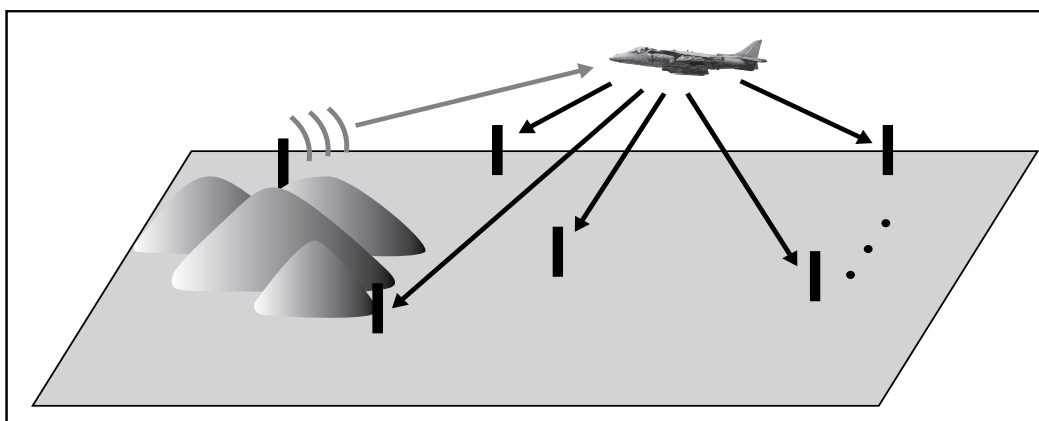


图 2：多元雷达运作（源自“Communication-Radar Signal Processing Sys.”[通信雷达信号处理系统], Microwave and Fiber Optics Laboratory, May 2014, <http://mfol.ece.ntua.gr/communication-radar-signal-processing-systems/>。）

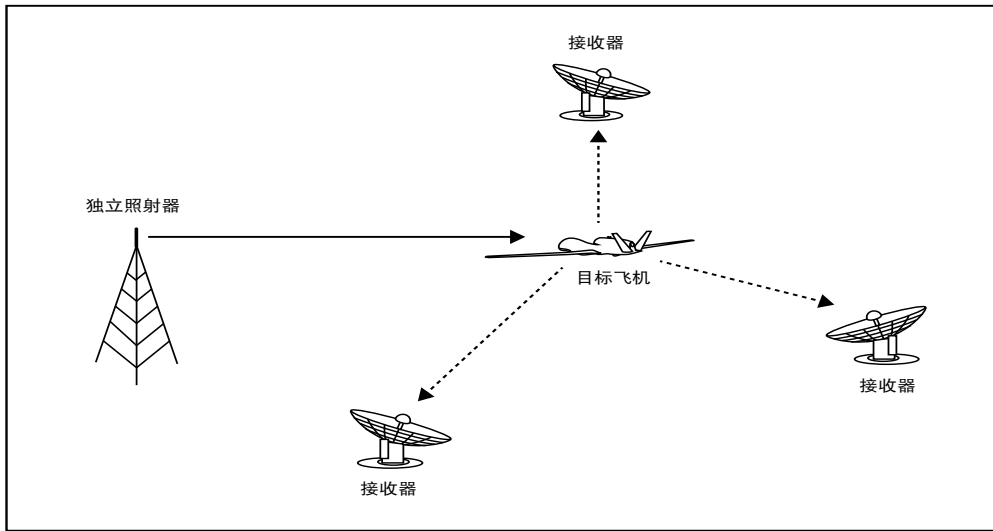


图 3：使用多元雷达网发现目标

- 质重不超过 1 千克。
- 质重中心必须在其几何中心 2 厘米内。
- 也可配置为双立方或三立方，允许质重分别是 2 千克和 3 千克。只能在 横轴即 Z 轴方向增加立方体。

- 另一种方法称为“蜂群”，即用多个立方体卫星组合运作，形成集群系统，从中获得更强功能。

图 4 为一个立方体卫星的等轴图，图右上角是艺术家想象中的立方体卫星在轨道上运行。¹⁹

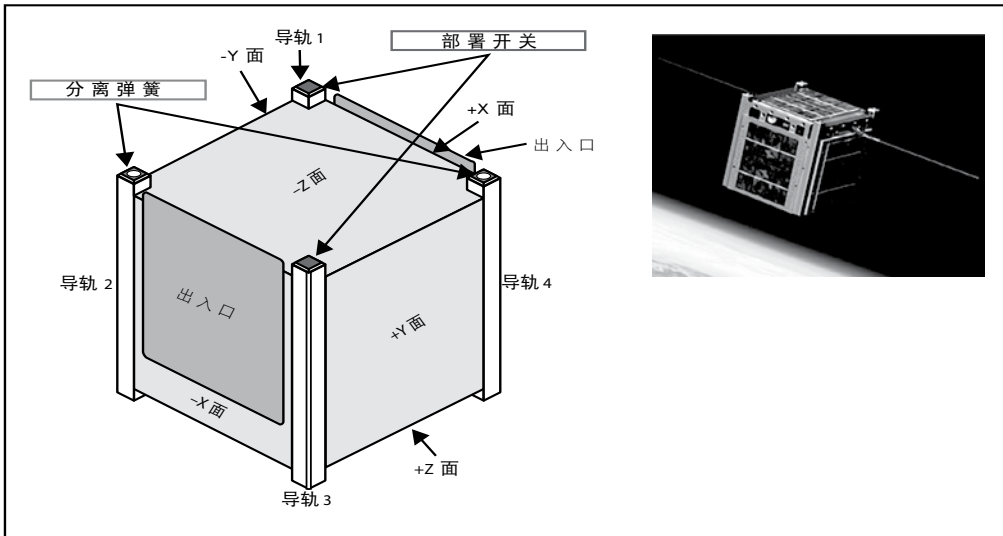


图 4：立方体卫星形象（源自 Riki Munakata, CubeSat Design Specification Rev 12 [立方体卫星设计规范第 12 修订版], [public domain] [San Luis Obispo, CA: California Polytechnic State University, 2009], 10.）

立方体卫星概念是 2000 年公开提出的，第一批立方体卫星在 2003 年发射。截至 2012 年底，共发射了 100 多颗这样的小卫星。如今，由美国国防部赞助、业界建造的立方体卫星使命，占发射清单中的很大一部分。国防部的各机构对早期立方体卫星（例如，航空航天公司的 Aerocube 系列和波音的 CSTB-1）都有成功的经验。²⁰ 多年来立方体卫星作为一个分支类型的发展清楚地表明，使用这类小型卫星搭载军事应用的比例在持续增长。²¹（图 5）

光谱传感器小型化

多所大学和实验室正在从构型、匹配和功能，以及光谱传感器算法处理等方面，积极推进光谱传感器的小型化。超光谱传感器的小型化至少需要考虑三方面的因素：物理特点、软件算法，以及以立方体卫星作为寄宿平台的整体生存力。关于将此类型传感器置入标准化 3U（3 个标准单元，10 cm x 10 cm x 30 cm）立方体卫星内的研究已经开始，

其中大部分主要部件是 COTS 产品。若要揭示兴趣场景（即传感器看到的内容）的关键光谱成分则须依靠压缩技术来处理，因为数据流的规模越来越大，而立方体卫星对尺寸 / 重量 / 功率都有限制。

传感器和算法开发与建模

从空间持续观察兴趣区域，最终生成超光谱数据立方图，其中包含巨大的数据量（每个场景十亿字节或更多），以数码存储并从轨道传输，是一项庞大的任务，即使对大型现代卫星而言也是重负。减少数据量需要相当大的努力，重点在于开发基于计算机算法的数字压缩技术，用于超光谱数据的存储和传输。²²

匹配、构型和功能交换空间

多元传感器立方体卫星网的效用，将取决于若干因素，包括但不限于以下几方面的考虑：

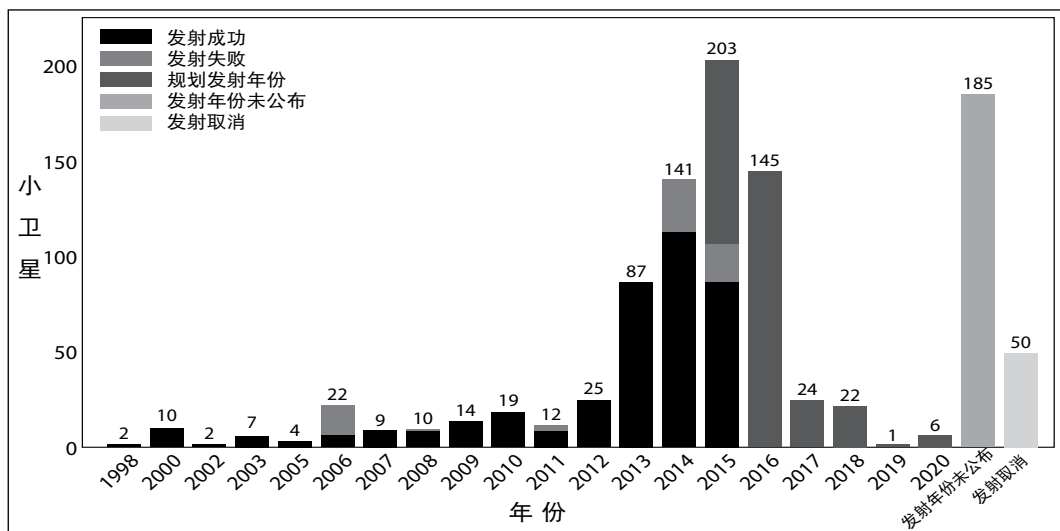


图 5：发射小卫星逐年数量（源自“Figures”[示意图]，Nanosatellite Database by Erik, <http://www.nanosats.eu/>。）

- 多元传感器网中立方体卫星数量
- 立方体卫星的可用性和性能
- 任何特定时间内立方体卫星覆盖面和距预定目标的距离
- 获得立体或多元卫星融合覆盖率的能力
- 传感器和任务分配 / 报告链的机敏能力
- 立方体卫星链接预算和发射功率
- 内部通信技术
- 地面站（处理站）接收器的灵敏度
- 地面站是否能处理多方位立方体卫星传感器数据

多元传感器算法的开发

与任何从多个来源搜集与融合信息的系统一样，多元传感器算法的开发非常困难。处理过程需要专门针对特定的任务需要不断加以调整，也需根据威胁局势动态变化，迅速加以更新。

某种程度上，导弹防御局开展的天基杀伤评估实验，与本文中提出的想法类似。此项评估将把有效载荷寄宿到现有的商用卫星网中，以侦测来袭导弹和验证拦截效果。²³

持久覆盖

立方体卫星以相对较低的成本，通过轨道力学原理，将传感器定位到指定位置，增加获得数据的概率，参与目标印记的提取，支持各种军事应用。立方体卫星平台也开始用于商业，行星实验室公司即为一例，该实验室最近发射了 28 颗立方体卫星组成的网络，进入低地球轨道，用途是从太空以高速间隔拍摄 5 米分辨率的地球彩色图像，随需提供。行星实验室是以 6,500 万美元的私募

起步资金完成此项目，远远低于单颗“传统”卫星的成本。²⁴

供应链评估

各行业创新技术公司积极开发小型化技术，有力保障了立方体卫星的能力增长。技术的进展已经使得小型系统有可能承担更大规模的太空研究实验。小型化部件的研究和制造势头正健，部件尺寸不断缩小而功能更强大，种种迹象表明，这种小型化的趋势在近期将来不会停步，这个新兴行业已经形成了压倒传统发射资源的影响与效果。²⁵ 小卫星的使用不断扩大，在很大程度上是因为上述技术不断进步、COTS 元器件更复杂精密，以及采用立方体规范进行卫星设计的思维转变。²⁶ 但小型卫星大多是二级载荷，其进入太空的时机，受限于为主要载荷服务的小、中、大型太空发射火箭，只能搭其便车升空。²⁷

在发射资源受限的环境下，对卫星网的建模在于确定对兴趣区域的持续覆盖。此外，立方体卫星各有一定的生命周期，因此要求对供应链（采购、制造和分销）做好全面评估，以确定建造更多硬件及补充卫星的可行性、整体成本、时间进度，以及保持持续覆盖的可行性。

传感、处理和印记提取三者整合的战略协调

新兴威胁版图无疑是全球性的，由此带来必须应对的新挑战。我们的敌人，包括国家和非国家行为者，越来越复杂先进，处心积虑地削弱和拒止我们自由出入。我们必须寻求创新的解决方案，保持决策优势和机敏能力。此外，国家的财政约束要求政府机构对每一美元的去向、用途和使用作出明智的

决定，这一切，对“情报监视”（ISR）的成本和效益提出越来越重的要求。

ISR 环境所呈现的一个趋向，是商业创新提速，由此产生技术民主化。这样的趋势提供了一个独特的机会，使我们能利用自身控制范围以外的各种新信息资源，来引导自身控制范围内的 ISR 能力发展，从抗衡环境中获取更多信息，最终提升我们的全局层面的可负担性、效率和效能。移动目标和动态威胁构成的局势，要求我们捕捉实时情报，保持态势感知，保障决策需要。大卫·德普图拉空军中将担任空军第一位负责 ISR 的副参谋长后表示：在当今，“情报即是作战行动。”²⁸单一来源情报的价值正在迅速降低。

我们有各种机会提升太空传感效率，例如，能否减少传感器和平台的尺寸 / 重量 / 功率 / 成本，以压低成本曲线，并通过分布式传感开辟新的应用？业界如何以经济、有效、高效率的方式利用更广泛 ISR 领域内的商业、非合作和非传统资源？何种性价比的传感器和情报来源，能够通过精密算法和处理最大程度地转化为情报价值？我们如何确定优化收集战略，用来进行推论并减少某特定活动的不确定性？在某种程度上，业界必须解决跨越作战准则、组织、训练、物资、领导和教育，以及人员、设施和政策等整个范围的更广泛的问题。对行动、系统结构、训练、测试、发射、过渡、作战员验收、操作与维护、

指挥与控制、任务优先、数据路径、增补、升级、处置等诸方面的思考，都是太空系统工程中必须考虑的因素。

整个业界通过进一步的研究，将会了解哪些部分可行，以及哪些部分不切实际。可行和不可行的两种结果都至关重要，使我们能够避免将时间和精力花费在回报小的项目上。一旦确定了某个方面的可行性，就可投入更切实的研发努力。

研究的成功将证明，立方体卫星可以为这一关键领域增添独特的价值，支持导弹防御作战将士。运用搭载超光谱传感和 / 或多元有效载荷的立方体卫星技术，进行目标印记的侦测和提取，将使各参与方直接受益，包括导弹防御局、军方和其它机构。虽然不同组织可能有不同的要求，同类解决方案可以更有效地提供协调一致的支持，不仅仅服务天基识别，而且也服务太空态势感知和保护使命。

进一步的研究应继续探讨和证明，低成本、越顶部署技术和低能耗、轻型有效载荷的汇合，能增强其它系统的能力。同大多数新兴技术一样，未来的研发努力，将确定立方体卫星技术在加强及改善美国的越顶侦测体系结构和协助导弹防御局的最优先使命方面，在保卫国土和海外部队免受弹道导弹攻击方面，能发挥作用的真正范围和效用。★

注释：

1. Maj Stacie Shafra, "JFCC-Space Commander Highlights Need for Improved Space Situational Awareness" [联合部队空中统领太空司令官强调需要改进太空态势感知], US Strategic Command, 23 February 2011, http://www.stratcom.mil/news/2011/221/JFCC-Space_commander_highlights_need_for_improved_space_situational_awareness/.
2. Anthony J. Tambini, *Wiring Vietnam: The Electronic Wall* [连接越南：电子墙], (Lanham, MD: Scarecrow Press, 2007).
3. Department of Defense, *Defense Acquisition Guidebook* [国防采购指南], (Washington, DC: Department of Defense, 2013), <https://dag.dau.mil>.

4. National Geospatial-Intelligence Agency, "About NGA" [国家地理空间情报局简介], <https://www.nga.mil/About/NGAStrategy/Pages/default.aspx>.
5. Senate, General William L. Shelton, Statement to the Senate Armed Services Committee, [太空司令部司令谢尔顿将军在参议院军事委员会证词], 113th Cong., 1st sess., 24 April 2013.
6. P. Ehrenfreund, R. C. Quinn, and A. J. Ricco, "CubeSats as Innovative Science Platforms" [立方体卫星作为创新科学平台], *Journal of Small Satellites*, 2, no. 1 (July 2013): 79-81.
7. Planet Labs, "Our Story" [我们的故事], <https://www.planet.com/story/>.
8. Herbert J. Kramer and Arthur P. Cracknell, "An Overview of Small Satellites in Remote Sensing" [小卫星遥感概述], *International Journal of Remote Sensing*, 29, no. 15 (2008): 4285-337.
9. Michael Fogle Jr., J-M Wersinger, and Luke Marzen, Auburn University Proposal investigators, "Development of a Hyperspectral Instrument for CubeSats for Earth Remote Sensing" [研发用于地球遥感的立方体卫星超光谱仪], (grant proposal), 2014; 另参看 Marin Halper, William F. Basener, and Shannon D. Jordan, *On the Probabilistic Identification of Solid Materials in HyperSpectral Imagery* [超光谱成像对固体材料的辨识概率], (McLean, VA: MITRE Corporation, 2013).
10. "Contamination Characterization through Airborne Hyperspectral Imaging" [机载超光谱成像捕捉大气污染特征], Missouri Resource Assessment Partnership, <http://morap.missouri.edu/index.php/contamination-characterization-through-airborne-hyperspectral-imaging/>.
11. 同注 9 中 Halper 文。
12. Chris J. Baker, "An Introduction to Multistatic Radar" [多元雷达概论], 收录于 *Multistatic Surveillance and Reconnaissance: Sensor, Signals and Data Fusion*, [多元监视和侦察：传感器、信号和数据融合], RTO-EN-SET-133 (Brussels: NATO Science and Technology Organization, April 2009), 2-1-2-20, <https://www.cso.nato.int/pubs/rdp.asp?RDP=RTO-EN-SET-133>.
13. 同上。
14. Chris J. Baker and H. D. Griffiths, "Bistatic and Multistatic Radar Sensors for Homeland Security" [用于国土安全的二元和多元雷达传感器], 收录于 *Advances in Sensing with Security Applications* [国家安全传感应用的发展], ed. Jim Byrnes and Gerald Ostheimer (Dordrecht, Netherlands: Springer, 2006), 1-22.
15. Missile Defense Agency, Programmatic Environmental Impact Statement [纲领性环境影响报告], (Washington, DC: Missile Defense Agency, 2007).
16. J. L. Glaser, "Fifty Years of Bistatic and Multistatic Radar" [二元和多元雷达发展 50 年], *IEEE Proceedings*, 133, no. 7 (December 1986): 596-603.
17. 同注 14。
18. QB50, an FP7 Project [FP7 项目], <https://www.qb50.eu/index.php/project-description-obj>.
19. Riki Munakata, CubeSat Design Specification Rev 12 [立方体卫星设计规范第 12 修订版], [public domain] (San Luis Obispo, CA: California Polytechnic State University, 2009), 10; 另参看 Giovanni Motta, Francesco Rizzo, and James A. Storer, *Hyperspectral Data Compression* [超光谱数据压缩], (Dordrecht, Netherlands: Springer-Verlag, 2005).
20. David Hinkley, "Picosatellites at the Aerospace Corporation" [航空航天公司研制的皮级卫星], 收录于 *Small Satellites, Past, Present and Future*, [小卫星的过去、现在与将来], ed. Henry Helvajian and Siegfried W. Janson (El Segundo, CA: Aerospace Press, 2009), 151-73.
21. M. A. Swartwout, "The First One Hundred CubeSats: A Statistical Look" [最初 100 颗立方体卫星统计分析], *Journal of Small Satellites*, 2, no. 2 (December 2013): 213-33.
22. 同注 9 中 Fogle 文“研发超光谱仪”；另参看注 19 中 Marzen 文“超光谱数据压缩”。
23. Mike Gruss, "MDA Kill Assessment Sensors Would Be Commercially Hosted" [导弹防御局将把杀伤评估传感器寄宿在商业卫星平台], *Space News*, 20 March 2015, <http://spacenews.com/mda-kill-assessment-sensors-would-be-commercially-hosted/>.
24. 同注 9 中 Fogle 文“研发超光谱仪”；另参看注释 7 中 Planet Labs 网站“我们的故事”。

25. R. A. Deepak and R. J. Twiggs, "Thinking Out of the Box: Space Science beyond the CubeSat" [解放思想：超越立方体卫星的太空科学], Journal of Small Satellites 1, no. 1 (January 2012): 3-7.
26. Kirk Woellert et al., "CubeSats: Cost-Effective Science and Technology Platforms for Emerging and Developing Nations" [立方体卫星为新兴与发展中国家提供成本效益比高的科技平台], Advances in Space Research 47, no. 4 (15 February 2011): 663-84.
27. Kirk Woellert, "Space Access: Still the Major Issue for the Small Satellite Community" [太空发射仍是小卫星界的主要问题], Journal of Small Satellites, 1, no. 2 (October 2012): 45-47.
28. Lt Gen David A. Deptula, "Transformation and Air Force Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance" [空军情报监视的转型], (remarks at the Air Force Defense Strategy Seminar, Washington, DC, 27 April 2007), <http://www.af.mil/AboutUs/Speeches/Display/tabid/268/Article/143960/transformation-and-air-force-intelligence-surveillance-and-reconnaissance.aspx>.



杰明·L·巴恩斯博士，项目管理专家 (Dr. Jeremy L. Barnes, PMP)，奥本大学理学士、理科硕士，阿拉巴马大学亨茨维尔校区理科硕士，奥本大学博士，拥有曾在美国导弹防御局从事指挥控制和天基处理研发的多年经历，为数项国家关键弹道导弹防御项目做出贡献，包括陆基中段防御、指挥与控制、作战管理及通信，和终端高空区域防御等。他是国家航空航天总署阿拉巴马太空基金会成员，并与奥本大学教员合作，以系统工程方法实施大学生太空计划。巴恩斯博士现在 MITRE 公司任职，并在阿拉巴马大学亨茨维尔校区教授本科与研究生课程。



阿什利·N·埃利奇 (Ashley N. Elledge)，阿拉巴马大学亨茨维尔校区理学士、理科硕士，其 15 年职业经历始于 1999 年在波音公司作实习生，大学毕业后在该公司担任电器工程师，辅助陆基中段防御 (GMD) 项目航电控制系统测试及仪表系统设计。他于 2004 年转入雷神公司，在 GMD 系统测试实验室从事外太空拦截器模拟数据分析。自 2005 年 11 月以来在 MITRE 公司担任系统工程师，致力于多个项目，包括 Link 16 链路与陆军航空兵一体化、指挥与控制、作战管理及通信、GMD、终端高空区域防御，和弹道导弹防御系统能力评估。



斯科特·G·巴顿，美国空军退役上校 (Col Scott G. Patton, USAF, Retired)，乔治亚理工学院机械工程学士，科罗拉多大学工商管理硕士，海军陆战队大学理科硕士，现在阿拉巴马州亨茨维尔 MITRE 公司担任项目经理，支持美国导弹防御局陆基导弹防御战略系统工程部。