



News & Highlights

超低轨道卫星有望实现更高分辨率,但隐私风险随之增加

Chris Palmer

Senior Technology Writer

2025年2月,卫星制造初创公司Albedo(美国科罗拉多州布鲁姆菲尔德)计划在SpaceX公司执行的Transporter-13拼车任务中,将其首颗卫星Clarity-1搭载在猎鹰9号火箭上送入轨道[1]。与许多成像卫星一样,Clarity-1的任务是为农业、保险、能源、测绘、公用事业和国防等不同行业客户提供高分辨率航拍照片。这颗卫星的独特之处在于,它不仅拥有业内领先的10 cm空间分辨率,还能运行在距地面200 km的极低轨道,比大多数通常处于450 km或更高轨道的同类卫星更贴近地球。

卫星光学相机的性能通常用可分辨的最小地物特征尺寸来衡量,早期卫星相机的分辨率为几十米量级。随着技术进步,卫星相机的分辨率已提高到几十厘米量级,让新一代影像的清晰度提高了数百倍。Clarity-1空间分辨率达到10 cm,将比与其最接近的竞争对手高出9倍。

虽然更高的分辨率有望为已对Albedo公司表现出兴趣的商业机构和政府部门提供宝贵数据,但这也引发了隐私方面的担忧[2]。哈佛-史密松森天体物理中心(Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics,位于美国马萨诸塞州剑桥市)的天体物理学家、《空间报告》(*The Space Report*,一份备受关注的网络刊物,涵盖民用与军事航天进展)主编Jonathan McDowell表示:“我们又向一个无处不被‘老大哥’监视的世界迈进了一步。”

几十年来,出于国家安全考虑以及高昂的成本,具有最高分辨率的卫星仅掌握在世界最强大国家的军方手中。1986年,这一垄断开始松动。当时,由美国国家航空航

天局(NASA)建造的非军事卫星Landsat(其分辨率可达30 m,用于监测农作物)拍摄到了切尔诺贝利核电站的画面,显示该核电站的反应堆堆芯已遭破坏并正向大气中释放放射性物质[3]。这些照片是在650 km高度拍摄的,证实了俄罗斯官员一直在淡化事故的严重性。这进一步彰显了轨道卫星获取地球上任意地点关键信息的能力。

然而,直到1994年,美国才批准将其间谍卫星技术用于商业[4]。1999年,美国国防承包商Raytheon公司(美国弗吉尼亚州阿灵顿)和Lockheed Martin公司(美国马里兰州贝塞斯达)共同投资的子公司Space Imaging(美国科罗拉多州桑顿)发射了IKONOS卫星。这是首颗专为商业用途设计的卫星,分辨率达到1 m,与当时的军用间谍卫星技术不相上下[5]。目前,全球卫星成像市场估值在42亿至57亿美元之间,该估值预计在未来十年内将翻番[6-9]。

直到2021年12月,美国国家海洋和大气管理局(NOAA,美国监管商业卫星的机构)才授权Albedo公司销售10 cm分辨率的影像。在此之前,美国联邦政府对商业卫星影像分辨率的限制为25 cm;2014年,NOAA将商业卫星影像分辨率的限制从50 cm放宽至25 cm[10]。2020年,为促进经济增长,美国商务部通过NOAA对相关法规进行了修订,决定实施三级许可制度。一级许可限制较少,其成像技术与其他国家已经商业化的技术类似[10-12]。二级许可限制更多,涵盖与美国其他来源成像能力相似的星座系统。目前最强大的民用成像卫星能够分辨出地面上

最小尺寸为30 cm的物体，其分辨率之高足以看清道路标线和飞机的机尾号[2]。目前只有极少数商业运营商，如Airbus（荷兰莱顿）、Maxar（美国科罗拉多州威斯敏斯特）、ImageSat International（以色列奥尔耶胡达）和SI Imaging Services（韩国大田），拥有能够获取30 cm分辨率影像的在轨卫星[13]；而50 cm分辨率的影像则更为普遍。Albedo公司属于三级许可，这类公司具备创新能力，但也意味着其受到的限制更多。例如，在国家紧急情况下，国家情报机构负责人可以要求Albedo公司提供在特定时间段内针对指定区域所拍摄的影像资料，并禁止该公司将这些影像资料出售给他人[14]。

商业卫星成像技术的下一个前沿是10 cm分辨率。此前，这种分辨率仅能由军用卫星实现，而这类卫星的研发、制造和发射成本往往超过10亿美元[15]。然而，要使10 cm分辨率成像技术在商业上具有可行性，必须大幅降低其成本。降低成本的一种方式是使用价格更低廉的相机和望远镜，而这就意味着需要将卫星发射到超低轨道（vLEO），即高度在400 km以下的轨道带。此前的一些vLEO任务包括欧洲航天局的“重力场和稳态海洋环流探测器”（在约255 km的高度运行，绘制了2009—2013年间的地球重力场图）以及日本宇宙航空研究开发机构的极低轨试验卫星（于2017—2019年间搭载传感器和相机飞行，轨道高度为167 km）[16]。

中国航天科工集团有限公司计划开展vLEO业务。该公司是中国国防领域的重要企业，于2024年发射了计划中300颗vLEO卫星的前四颗，这些卫星将于2030年前在150~300 km高度运行[17]。Earth Observant公司（美国科罗拉多州路易斯维尔）计划部署一个由60颗Stingray卫星组成的卫星星座，设计寿命为五年，运行高度为250 km，每颗Stingray卫星将捕捉15 cm高分辨率的近实时图像[18]。Skeyeon公司（美国加利福尼亚州圣地亚哥）正在研发一个小型卫星星座，旨在从约250 km的高度提供高分辨率的每日地球影像[18]。其他计划开展vLEO卫星业务的公司还包括Aerospace Corporation（美国加利福尼亚州埃尔塞贡多）、Kreios Space（西班牙巴塞罗那）、Phase Four（美国加利福尼亚州霍桑）、Redwire（美国佛罗里达州杰克逊维尔）以及Thales Alenia Space（法国夏纳）[18]。

然而，Albedo公司在众多角逐vLEO市场的竞争者中脱颖而出，获得美国监管部门批准，可销售其Clarity卫星拍摄的10 cm分辨率图像数据[19]。除了使用成本较低的光学设备外，Albedo公司还通过使用更小型的发射器和现有商业设备（无须像在高轨道运行那样配备抗辐射电子

器件）来降低成本。Albedo公司在vLEO运行中的其他优势还包括，卫星运行轨道靠近地面站，降低了无线电传输的功率需求，因此无须像其他卫星那样配备从主体伸出的大型翼状太阳能电池板——其太阳能电池板直接覆盖卫星主体（图1）。



图1. Albedo公司预计将于2025年2月发射其Clarity星座的首颗卫星Clarity-1至vLEO，其运行高度低于200 km。本图为艺术效果图。卫星将拍摄地球10 cm分辨率的图像，这是目前市场上所能达到的最高图像分辨率。覆盖卫星主体的太阳能电池板将为航天器电子设备（包括用于抵消低轨道大气阻力的离子推进器）提供电力。图片来源：Albedo航天公司（公有领域）。

此外，由于vLEO中的空间碎片和失效卫星通常只需几天就会自然地进入地球高层大气并安全解体，因此与高轨道卫星相比，vLEO卫星间的碰撞风险[20—22]明显降低[23]。McDowell表示：“在500 km高度的轨道上，空间变得非常拥挤。SpaceX公司已将部分Starlink卫星移至更低轨道，部分原因是担心该轨道上运行的所有中国卫星在未告知他们的情况下进行机动时可能会引发碰撞风险。”

然而，vLEO也存在更多挑战。位于较低轨道的卫星与地面站的通信窗口期相对较短。此外，它们需要使用先进的涂层和材料来抵御由大气阻力产生的热量以及上层大气中存在的原子氧所导致的腐蚀；需要复杂的轨道管理策略来应对大气密度的变化；还需采用能够承受约每45 min一次昼夜交替的材料[23]。

Albedo公司的Clarity-1卫星体积相当于一台全尺寸冰箱（约3 m高、1 m宽），远大于许多在更高轨道运行的商业地球观测卫星。卫星体积增大可提高稳定性，但代价是大气阻力增加。该公司的卫星设计采用了离子发动机的超高效电推进系统来抵消这种阻力[23]。McDowell表示：“离子发动机推力较小，但几乎可以持续运行，而且它们的燃油效率非常高。”Albedo公司计划部署一个由24颗卫星组成、名为Clarity的星座，这些卫星每天对地球上的所有地点进行五次观测，能够提供分辨率为10 cm的光学图像以及分辨率为2 m的热成像图像（图2）[24]。

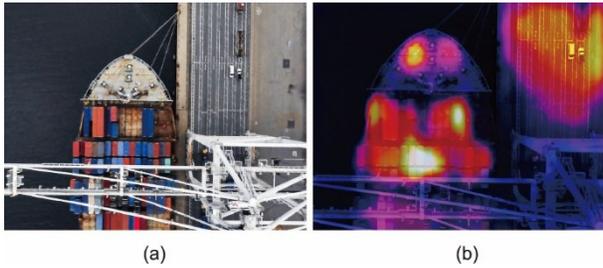


图2. Albedo公司使用基于物理精确度的仿真生成了图像效果示例，其中包括港口停泊船只的上述图像：10 cm分辨率光学图像(a)；2 m分辨率热成像图(b)。图片来源：Albedo航天公司(公有领域)。

Albedo公司即将提供的服务似乎需求量很大。该公司的首批客户包括美国军方和美国情报机构。2022年，美国空军与Albedo公司签订了一份125万美元的合同，用于评估该公司2 m分辨率热成像系统在夜间条件下的性能[25]。2023年4月，该公司又与负责评估外国威胁的美国国家航空航天情报中心签下了125万美元的合同[26]。2023年年末，Albedo公司与负责运营美国间谍卫星的美国国家侦察局签订了一份合同，由其对该公司的技术进行评估[27]。

除政府合同外，截至2024年年初，Albedo公司已吸引了近1亿美元的私人投资[28]并已经将Clarity-1卫星运营后前两年的大部分成像时间预售给了客户，以协助城市规划人员筹备建设项目、保护组织跟踪野生动物以及保险公司评估损害赔偿[1]。许多客户希望补充或在某些情况下替代目前由飞机和无人机完成的图像采集工作。尽管这些飞行器能够拍摄到比卫星更清晰的图像，但它们的活动范围有限。此外，美国联邦航空管理局严禁商业无人机在人群密集区域飞行，并将机场、军事基地和体育赛事区域等划定为“禁飞区”，但这些规定并不适用于卫星[29]。

Albedo公司官网宣称，其提供的图像可以帮助政府“监控热点区域、消除不确定性并迅速采取行动”[30]。在一篇介绍其卫星观测能力的博文中，Albedo公司联合创始人Winston Tri表示，这些卫星的相机能够捕捉到汽车的天窗、车身的赛车条纹甚至货车所载物品等细节。他写道：“在某些情况下，我们甚至能识别出具体的车辆，而这在过去是无法做到的。”[31]

前所未有的高分辨率也让人们担心怀有恶意的使用者可能会通过这些图像获取敏感信息。McDowell表示：“分辨率调整到10 cm确实会引发更多的隐私问题——你开始能够隐约看清每个人的样子了。”他指出，即便通过这种图像技术还无法清晰辨认出人的面部，但该技术本身已经足够先进，如果再结合某人进入的建筑、时间等背景信息，就可以用来追踪个人的位置了。为应对隐私泄露风险，Albedo公司声称将对新客户进行逐一审核，制定

识别恶意意图的机制，并在合同条款中明确规定违反公司政策的惩罚措施[2]。

也有人认为对于隐私的担忧可能有些过度了。Kevin Pomfret是Williams Mullen律师事务所(美国弗吉尼亚州里士满)的无人系统团队主席，同时也是数据保护与网络安全团队的联合主席。他认为，运行在vLEO的高分辨率卫星所收集的数据并没有什么特别之处。Pomfret表示：“我认为，与其他收集图像或其他类型数据的平台相比，由vLEO中的卫星引发的额外隐私问题(如果有的话)并不多。这些隐私风险可能来自运行在LEO的卫星，也可能来自简易飞机、无人机，甚至是地面传感器——它们通过我们每天看到和使用的家庭安防技术采集位置信息或人脸图像。”

References

- [1] Feldscher J. Albedo will launch Clarity-1 in February [Internet]. Santa Monica: Payload; 2024 Jun 12 [cited 2024 Oct 9]. Available from: <https://payloadspace.com/albedo-will-launch-clarity-1-in-february/>.
- [2] Broad WJ. When eyes in the sky start looking right at you [Internet]. New York City: New York Times; 2024 Feb 20 [cited 2024 Oct 3]. Available from: <https://www.nytimes.com/2024/02/20/science/satellites-albedo-privacy.html>.
- [3] Morton O. Private spy [Internet]. San Francisco: Wired; 1997 Aug 1 [cited 2024 Oct 9]. Available from: <https://www.wired.com/1997/08/spy-2/>.
- [4] Broad WJ. Private ventures hope for profits on spy satellites [Internet]. New York City: New York Times; 1997 Feb 10 [cited 2024 Oct 9]. Available from: <https://www.nytimes.com/1997/02/10/us/private-ventures-hope-for-profits-on-spy-satellites.html>.
- [5] Cooper P. Lockheed Martin-built IKONOS spacecraft provides local imagery; satellite built in Silicon Valley [Internet]. Alexandria: Space News; 1999 Nov 15 [cited 2024 Oct 9]. Available from: <https://spacenews.com/lockheed-martin-built-ikonos-spacecraft-provides-local-imagery-satellite-built-in-silicon-valley/>.
- [6] Global satellite imaging market size to be worth USD 15.9 billion by 2033 [Internet]. Pune: Spherical Insights; 2024 Mar 14 [cited 2024 Oct 17]. Available from: <https://www.globenewswire.com/news-release/2024/03/14/2846326/0/en/Global-Satellite-Imaging-Market-Size-To-Worth-USD-15-9-Billion-By-2033-CAGR-of-10-80.html>.
- [7] Satellite imaging market growth, size, share & COVID-19 impact analysis, by application (geospatial data acquisition, navigation & mapping, defense & intelligence, surveillance & security, and others), by end-user (government, defense, commercial, and others), and forecasts regional, 2023–2030 [Internet]. Pune: Fortune Business Insights; 2024 Sep 30 [cited 2024 Oct 17]. Available from: <https://www.fortunebusinessinsights.com/satellite-imaging-market-103372>.
- [8] Global commercial satellite imaging market outlook for 2024 to 2034. Report. Pimpri-Chinchwad: Future Market Insights; 2024.
- [9] Satellite imaging market—by application (geospatial data acquisition and mapping, natural resource management, surveillance and security, conservation and research, construction & development, disaster management), by resolution, by end-user & forecast, 2024–2032 [Internet]. Selbyville: Global Market Insights; 2024 Feb [cited 2024 Oct 17]. Available from: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/satellite-imaging-market>.
- [10] Werner D. Albedo wins license to sell 10-centimeter imagery [Internet]. Alexandria: Space News; 2021 Dec 14 [cited 2024 Oct 22]. Available from: <https://spacenews.com/albedo-wins-license-to-sell-10-centimeter-imagery/>.
- [11] Beam C. Soon, satellites will be able to watch you everywhere all the time [Internet]. Cambridge: MIT Technology Review; 2019 Jun 26 [cited 2024 Oct 9]. Available from: <https://www.technologyreview.com/2019/06/26/102931/satellites-threaten-privacy/>.
- [12] Palmer C. Eyes in the sky open to all. *Engineering* 2022;19:4–6.
- [13] Buczkowski A. A revolution is coming in satellite imagery: why 30 cm satellites are set to transform the industry [Internet]. Geo Awesome; 2023 Aug 6 [cited 2024 Oct 17]. Available from: <https://geoawesome.com/eo-hub/a-revolution-is-coming-in-satellite-imagery-why-30cm-satellites-are-set-to-transform-the-industry/>.

- [14] Hitchens T. Amid national security concerns, US slaps overhead time limits on satellites [Internet]. Washington, DC: Breaking Defense; 2021 Nov 5 [cited 2024 Oct 22]. Available from: <https://breakingdefense.com/2021/11/exclusive-amid-national-security-concerns-us-slaps-time-limits-on-overhead-satellites/>.
- [15] Norris P. Developments in high resolution imaging satellites for the military. *Space Policy* 2011;27(1):44–7.
- [16] Wise S. Eyes in the sky: the increasing importance of very low Earth orbit (vLEO) for national security [Internet]. Alexandria: Space News; 2024 Jan 24 [cited 2024 Oct 3]. Available from: <https://spacenews.com/eyes-sky-increasing-importance-very-low-earth-orbit-vleo-national-security/>.
- [17] Jones A. China launches test satellite to very low Earth orbit [Internet]. New York City: Space.com; 2024 May 23 [cited 2024 Oct 3]. Available from: <https://www.space.com/china-launches-test-satellite-very-low-earth-orbit-video>.
- [18] Werner D. How low can satellites go? vLEO entrepreneurs plan to find out [Internet]. Alexandria: Space News; 2021 Oct 5 [cited 2024 Oct 3]. Available from: <https://spacenews.com/how-low-can-satellites-go-vleo-entrepreneurs-plan-to-find-out/>.
- [19] Haddad T. Approved for 10 cm [Internet]. Broomfield: Albedo; 2021 Dec 30 [cited 2024 Oct 3]. Available from: <https://albedo.com/post/approved-for-10cm>.
- [20] Palmer C. Space trash removal. *Engineering* 2019;5(4):607–8.
- [21] Palmer C. Russian anti-satellite test spotlights space debris danger. *Engineering* 2022;12:3–5.
- [22] Palmer C. Proliferating satellite constellations pose astronomical and environmental challenges. *Engineering* 2024;36:9–11.
- [23] Alamalhodaei A. Albedo takes Earth observation up close and personal from very low Earth orbit [Internet]. San Francisco: Tech Crunch; 2024 Jun 14 [cited 2024 Oct 3]. Available from: <https://techcrunch.com/2024/06/14/albedo-takes-earth-observation-up-close-and-personal-from-very-low-earth-orbit/>.
- [24] Naprys E. Startup to launch ultra high-resolution satellites, sparking privacy concerns [Internet]. Vilnius: Cyber News; 2024 Feb 26 [cited 2024 Oct 3]. Available from: <https://cybernews.com/tech/startup-ultra-high-resolution-satellites-albedo/>.
- [25] NIIRSC Commercial 7 imagery for government ISR [Internet]. Washington, DC: Small Business Innovation Research Program [cited 2024 Oct 3]. Available from: <https://legacy.www.sbir.gov/sbirsearch/detail/2325249>.
- [26] Werner D. Albedo wins Air Force contract to supply thermal imagery at night [Internet]. Alexandria: Space News; 2023 Apr 27 [cited 2024 Oct 9]. Available from: <https://spacenews.com/albedo-wins-air-force-contract-to-supply-thermal-imagery-at-night/>.
- [27] Erwin S. NRO signs agreements with five commercial suppliers of electrooptical imagery [Internet]. Alexandria: Space News; 2023 Dec 5 [cited 2024 Oct 9]. Available from: <https://spacenews.com/nro-signs-agreements-with-five-commercial-suppliers-of-electro-optical-imagery/>.
- [28] Alamalhodaei A. Albedo closes \$35M at boosted valuation to build satellites that orbit very, very close to Earth [Internet]. San Francisco: Tech Crunch; 2024 Jan 23 [cited 2024 Oct 3]. Available from: <https://techcrunch.com/2024/01/23/albedo-closes-35m-at-boosted-valuation-to-build-satellites-that-orbit-very-very-close-to-earth/>.
- [29] Gipson RR. The rise of drones and the erosion of privacy and trespass laws. *Air Space Lawyer* 2020;33(3):4262940.
- [30] Albedo is the first company to offer aerial-quality imagery from space [Internet]. Broomfield: Albedo; [cited 2024 Oct 3]. Available from: <https://albedo.com/#clarity>.
- [31] Tri W. A first look at 10 cm satellite imagery [Internet]. Broomfield: Albedo; 2022 Mar 10 [cited 2024 Oct 3]. Available from: <https://albedo.com/post/albedo-simulated-imagery>.