

国外天基导航干扰监测发 展现状研究

(2026 年第 5 期，总第 14 期)

2026 年 5 月 28 日

主办单位：导航与时空技术国家级重点实验室

全球卫星导航系统（GNSS）是现代社会的隐形基础设施，几乎所有现代化系统都把 GNSS 当作底层水电气一样使用。但这套“看不见的水电气”非常脆弱：GNSS 信号传到地面已经极其微弱，一台便携式干扰器就能在数百米范围内令整片民用接收机失锁，而国家级电子战装备的压制半径可以达到数百公里。

随着 GNSS 渗透到几乎所有武器装备，“导航对抗”（Navigation Warfare, NAVWAR）已经从概念走向常态化战场。海湾战争以来，几乎每场局部冲突都伴随着 GPS 信号干扰、增强、欺骗的反复对抗。

要在导航战中掌握主动，必须先看见对手在哪儿干扰、

用什么干扰。传统的 GNSS 干扰监测以地基为主：用固定式、可搬移、移动、便携式监测站组成区域网络，靠测向交叉给出干扰源位置。这套体系在和平时期勉强够用，但在跨境对抗中暴露三个硬伤：监测站之间距离动辄数百到上千公里，无法覆盖全域；干扰强度稍弱、或干扰距离稍远就监测不到；境外完全没有部署条件。俄乌冲突中，乌克兰境内 6 个国际 GNSS 服务(IGS)监测站的实测数据表明，地基监测对 GNSS 干扰仅能作出“附近存在干扰”的模糊判断，既无法准确定位干扰源，也不能研判干扰意图。

天基干扰源监测恰好可以弥补地基监测的这些缺陷：它将监测载荷部署在数百公里高度的低地球轨道（LEO）上，单次过顶即可覆盖直径达数百公里的地面区域；由数颗卫星组成的小星座配合极轨/太阳同步轨道运行，可实现全球覆盖与近实时重访，还能达到公里级甚至百米级的干扰源定位精度。

一、天基导航干扰监测技术体系概况

（一）监测流程

一般来说，天基监测大致可分为四个步骤：信号检测、目标识别分类、位置定位以及态势生成。

检测主要关注探测弱信号能力。星载接收机采用软件无线电（SDR）架构，配合高灵敏度、宽频段天线和低噪放记录频谱，通过算法寻找异常。德国 SeRANIS 项目显示，FFT

- based 单星检测法对线性 Chirp 灵敏度达干噪比 (J/N) - 30 dB; 双星协同的 CAF (互模糊函数) 方法可增益约 20 dB, 最低 J/N 推到约 - 31 dB。

识别分类将检测到的干扰进行分类。常见 GNSS 干扰可分为压制式与欺骗式, 对抗手段不同。近年常用做法是将信号转时频谱图, 用卷积神经网络 (CNN) 分类。业内基于 SVM 与 CNN 的分类方法在六类干扰上准确率分别达 94.90% 与 91.36%, 多模态 ResNet18 + TS - Transformer 框架准确率达 95.32%。Chirp 信号时频域上的“对角线”轨迹有利于图像分类。

定位是体系中的关键。地面三角测向方法不适用于卫星, 因卫星高速移动, “接收点”是移动轨迹, 因此天基定位需重新设计。

态势生成是将单点定位结果拼成全局图景。一次过顶得某点位一组定位估计, 需聚合多次过顶、多颗星、多种载荷数据, 依靠机器学习与地理空间分析, 才能展现出干扰活跃时段、类型及迁移方向等。

(二) 多星 TDOA/FDOA 定位

这是目前最成熟的定位体制。三颗卫星以编队飞行方式保持固定的相对几何 (如 HawkEye 360 的三星编队间距控制在 125 km, 第 1 颗与第 3 颗距离最远, 第 2 颗位于中间, 并伴有轨道面外的小幅周期性运动), 共同覆盖范围内的同一

个地面射频信号会被三颗星先后接收到，由于三颗星到干扰源的几何距离不同，信号到达时间存在差异（TDOA），同时由于三颗星相对于干扰源的径向速度不同，多普勒频移也存在差异（FDOA）。

把 TDOA 和 FDOA 写成方程组，几何意义如下：每一对 TDOA 测量值对应空间中一个旋转双曲面（点到两颗星的距离差为常数），每一对 FDOA 测量值对应一个等频差曲面；将多个等时差面、等频差面与地球表面三组曲面相交，理论上交点就是干扰源位置。

当目标信号过弱无法直接锁定时，HawkEye 360 还会启用“盲相干累积”，通过对候选位置发射的信号能量进行长时间积分，构造一张“能量密度地图”，把能量最高的候选位置作为干扰源。这部分计算需要大量算力，受限于卫星平台体积和功耗，目前主要在地面完成。最终定位精度取决于射频信号功率、天线方向图、处理机信噪比等因素，经过与 Maxar 遥感卫星实测影像、船只 AIS 上报位置交叉比对，HawkEye 360 的定位精度已达到 500 米量级，其官方误差椭圆在 95%置信度内可控制在数百米至 5 公里量级。该公司常用 EIRP 强信号下的官方数据是“500 m”，但应注意这是商业宣传值，同一星座在弱信号、复杂电磁环境下的实际表现会差一些。

德国 SeRANIS 项目的仿真验证给出了一组更具参考价

值的独立数据：双星基线 1200 km、Chirp 干扰 J/N 为 -20 dB 时，CAF 方法的定位网格分辨率需要做到 0.001° ；当基线缩短到 27 km 时， 0.02° 的网格即可。这意味着卫星间距越远，理论上越能“看清”目标，但同时也对网格精度、相干积分时长、星间时钟同步精度提出更高要求。这就是为什么三星编队既要“分开远以提高精度”、又要“靠得近以保持信号相干”的关键矛盾——HawkEye 选择 125 km 间距，本质上是面对这一矛盾在工程上的折中。

（三）单星多普勒定位

三星编队虽然精度高，但成本也高，同时调度三颗星实现“同步快门”非常困难，调度失败一次就意味着这次过顶白干。Spire Global 选择了一条更经济的路：用单颗卫星、单次过顶、靠多普勒测量解算干扰源位置。

单星多普勒定位的关键观测量是干扰信号载波到达卫星时的频率随时间的变化。卫星在轨道上不停移动，与地面干扰源之间的径向距离持续变化，由此造成的多普勒频移在时间上形成一条特征曲线。只要能从干扰信号中可靠提取载波相位、并假设干扰源载波频率在观测时段内基本恒定（quasi-constant），就可以把这条曲线反演成发射源的位置。

定位精度方面，Spire 给出的工程数据是：对于配备较低品质钟（如温度补偿晶振 TCXO）的发射源，单次过顶可实现 95% 定位误差优于 78 km；若发射源使用高品质钟（如恒

温晶振 OCXO)，95%误差可优于 1 km。多次过顶组合后，TCXO 的 95% 误差可降到 2 km、OCXO 可降到 100 m。

但“准恒定载波”这一前提对 GNSS 欺骗器是不成立的。欺骗器为了模仿真实卫星的多普勒，会在每个伪造信号上叠加一个未知的、随时间变化的频率分量——这恰恰把“准恒定载波”假设打破了。德州大学奥斯汀分校无线电导航实验室与 Spire 联合提出了一个巧妙的破解办法：让欺骗信号经过一个标准 GNSS 接收机的 PVT (Position, Velocity, Time) 解算流程，由于所有伪造信号会“共享”卫星与欺骗器之间真实的多普勒频移分量，这一部分会被接收机内部估计器自然吸收到“接收机钟漂”参数里。换句话说，把虚假的“接收机钟漂时间序列”提取出来，里面就藏着真实的卫星-欺骗器径向速度信息，可据此反演欺骗器位置。

这种方法的典型应用场景是针对广播式 GNSS 欺骗器。与一般针对特定接收机的欺骗器不同，广播式欺骗器不指向某一目标，而是向外广播一套“自治”的虚假信号集合，让方圆几公里内所有未防护的接收机统一被蒙蔽，算出来的自身位置和时间都是错的。近年中东和俄乌战场上飞机被“瞬移”到机场附近、船舶集体出现在伊朗内陆，绝大多数都属于这类广播式欺骗。

该方法的工程验证由 UT Austin 与 Spire 于 2022 年完成——这是公开领域内首个单星单次过顶 LEO 欺骗器定位实

验。地面站发送一组取自 TEXBAT 数据集（GNSS 学术界经典的欺骗信号样本库）的“clean static”录制信号，由 Spire LEO 卫星过顶捕获，UT 的 GRID 软件接收机按上述两步流程解算出虚假接收机钟漂时间序列，再据此用非线性最小二乘估计出地面欺骗源位置。仿真和真实实验数据显示，单次过顶下 10 km 内的定位精度可达，且已在多个公开论文中得到独立复现。

2026 年 3 月，Spire 又对外宣布在轨成功验证了 S 波段和 X 波段的单星 RF 定位能力，把单星多普勒定位的频段从 GNSS L 波段扩展到了 S/X 波段。这意味着 Spire 可以定位的对象从 GNSS 干扰器扩展到了雷达和卫星通信类辐射源。

（四）单星相位干涉测向

Unseenlabs 的 BRO（Breizh Reconnaissance Orbiter，布列塔尼侦察轨道器）选择了另一条路线——单星相位干涉测向（Direction of Arrival, DOA）。每颗 BRO 卫星都搭载一台单星 DOA 检测载荷，主要监测 S 波段和 X 波段。S 波段是 SOLAS 公约对 3000 总吨以上船舶强制要求的雷达频段，X 波段提供更高分辨率，两者结合可识别绝大多数船载雷达发射机。

相位干涉测向的核心原理是：在卫星本体上布置多个间距已知的接收天线，同一个地面信号到达不同天线时存在轻微的相位差，通过相位差反演来波方向。在工程实现上，长

基线提供高角分辨率但存在整周模糊度，短基线分辨率较低但可以辅助解模糊，长短基线组合可以兼顾高精度与无模糊。Unseenlabs 公开的几何精度指标是：信号“高置信度/中等/低置信度”分级标注，整体定位误差均值约 5.4 km、中位数 2.5 km，最大误差约 30 km。

时间维度上，BRO 星座每天可对同一目标完成 8-12 次采集（视纬度而定），当前刷新周期 2-3 小时；按官方规划满星座部署完成后，可降至 30 分钟。数据交付延迟平均约 2 小时 20 分，最大不超过 24 小时。

需要指出的是，原始的相位干涉测向在物理本质上对 GNSS L 波段的弱干扰信号支持有限。Unseenlabs 主打的是雷达类强信号，因此其在 GNSS 干扰监测上的直接作用相对前两者要弱一些，更多承担“船舶电磁指纹-GNSS 异常”的关联分析角色。

（五）GNSS-R 反射监测

监听需要专门的接收载荷与精心设计的星座构型，门槛和成本都很高。还有一条“省钱省力”的路线——直接利用现成的科学卫星。

GNSS 反射（GNSS-R）原本是一种遥感技术：导航卫星发出的 L 波段信号经过海面、陆地、冰面反射后，被低轨小卫星接收，从反射信号的延迟、多普勒、强度、极化等特征中可反演海面风速、土壤湿度、冰雪覆盖等地球物理参数。

可以把 GNSS-R 想象成“用 GPS 信号当探照灯，专门照地表反光”，既然要看反光，那么“探照灯”本身被外人挡住或干扰，反光数据里自然会留下蛛丝马迹。NASA 的 CYGNSS（飓风全球导航卫星系统）和 SMAP-R（土壤湿度主被动反射计）是当前最具代表性的两颗 GNSS-R 任务。

CYGNSS 由 8 颗低轨观测卫星组成，每颗都搭载延迟多普勒映射仪（DDMI），配置 1 副天顶天线和 2 副天底（朝下）天线，每个观测周期同时生成 4 个反射通道的 Level-1 延迟多普勒图（DDM）。在标准产品的 DDM 中，前 45 行“负延迟”区域专门用于估计噪声底（即没有反射信号时的本底噪声水平）。当地面存在 L 波段射频干扰（RFI）时，这部分噪声底会被异常抬高，这就是 GNSS-R 间接探测干扰源的核心信号。

韩国研究团队 2025 年的工作进一步证实了这一方法的灵敏度：以太平洋（被认为干扰极少）的 DDM 噪声底作为基线，对比中东和朝鲜半岛附近海域的数据，发现后两者的 DDM 噪声底最大值约为太平洋区域的 5 倍；中东和朝鲜半岛区域超出基线阈值的数据占比分别达到 82.3% 和 23.1%。这意味着用一颗本来在测海面风速的科学卫星，事实上可以同时充当“全球 RFI 嗅探器”。

更进一步，更精细的工作把多通道 DDM 噪底从“均值聚合”改造成“最大值聚合”。原因是 CYGNSS 每个观测瞬

间的 4 个 DDM 通道对应不同方向的反射，地面干扰源不一定同时落入所有通道的天线主瓣。如果一个通道明显异常但其他三个通道正常，传统的均值法会把这次异常给“稀释”掉，造成漏检。改用最大值聚合后，2025 年 5 月美国白沙导弹靶场的 NOTAM 公告 GPS 干扰试验得到了显著更高的检出率，中东区域的检出率从 46%（均值法）/33%（峰度法）提升至 62%。

GNSS-R 的另一条延伸路线是充分利用极化信息。NASA 的 SMAP 卫星本是为土壤湿度主动测量设计的，其雷达接收机重新利用后形成了 SMAP-R，能采集 L2c 频段(1227.6 MHz)的反射 GPS 信号、同时输出垂直（V）与水平（H）双极化通道。两个正交线极化通道组合可计算斯托克斯参数（描述电磁波偏振状态的四个分量），其中 $\bar{S}_1$ 、 $\bar{S}_2$ 、 $\bar{S}_3$ 的异常模式可用来区分自然地表反射与人为干扰。SMAP-R 团队 2026 年的研究覆盖 2015-2024 年共十年数据，发现 $\bar{S}_1$ 出现“-0.35 以下”异常值的比例从 2016 年的极少数，急剧上升到 2022-2024 年，且空间上与已知冲突区高度吻合，提示 GNSS 干扰对全球遥感能力本身已造成持续的“环境污染”。

GNSS-R 路线的优势是几乎“零额外成本”，只要科学任务在飞，干扰监测就能附带产出。劣势同样明显：监测对象是“反射后的弱信号”，时空采样稀疏（CYGNSS 受轨道倾角限制，仅能观测 $\pm 38^\circ$ 纬度带），且本质上只能给出 RFI

“热区”而无法直接定位单个干扰源。它适合做战略级、长时间尺度的全球态势图，而不适合战术级、分钟级的实时告警。

（六）用户终端反射观测

还有一类技术体系跳出了“用卫星看地面”的思路，转而“用地面用户的异常表现，反推 GPS 受扰区域”。最具代表性的案例是 Aireon 公司的 ADS-B(广播式自动相关监视,)异常分析。

ADS-B 是民航客机定期向外广播自身位置、速度、身份的协议，绝大部分位置数据来自机载 GPS 接收机。Aireon 用 66 颗 Iridium NEXT 卫星上搭载的 ADS-B 接收载荷，每天接收数十亿条 ADS-B 报文。在这些报文里，以下几个字段能间接揭示 GPS 是否被干扰：

位置/导航完整性类别 (PIC/NIC)：航空器对自身定位质量的自评分。PIC ≥ 7 表示导航包容半径 < 0.6 海里（约 1.1 km），属于“GPS 状态良好”；PIC 显著下降且多机同区同时出现，基本可以排除航电故障，指向区域性 GPS 干扰。

重复地址：每架飞机有唯一 24 位 Mode S 地址，正常情况下不会重复。当 GPS 干扰导致位置在 30 秒内突然漂移超过 6 海里再恢复时，同一架飞机在不同接收机看来就像“和自己撞了 ID”，形成重复地址异常。

字段类型码 0 (FTC0)：经度纬度未知时 ADS-B 报文

会被设置为 FTC0，这本来只设计给“刚开机、GPS 还没锁星”的场景，但现在频繁出现在飞行途中，这是 GPS 严重干扰下接收机直接放弃定位的标志。

独立位置校验失败（IPC）：Aireon 利用多颗星的到达时差（TDOA）算出参考航迹，与 ADS-B 上报位置比对，差异超 3 海里时置 IPC 标志为 1——可以识别“被欺骗到错误位置”的飞机。

一架曼谷飞往维也纳的航班在黑海附近被干扰、随后被欺骗，导致飞机系统（以及对外广播的位置）显示飞机跑到了保加利亚、匈牙利、乌克兰境内等完全错误的地方。这种典型的“FTC0+位置欺骗”案例在 Aireon 的参考轨迹比对下能被清晰还原。

Spire Global 也开展了相似但路线略不同的工作：用自家 LEO 星座上的 ADS-B 接收载荷配合地面站接收的开源 ADS-B 数据，分析 NIC/NACp 字段进行 GNSS 干扰映射，主推冲突区、低空交通区、远洋和山区等“地面接收能力薄弱”区域的覆盖。

用户终端反射观测的优势在于“采样面广、近实时”，只要有飞机经过，那个空域当下的 GPS 干扰状况就被自动记录下来。但是，它只能“间接看”干扰，无法定位干扰源；只覆盖有飞机经过的空域，没有飞行的海面、山区、夜间航线就是盲区；而且随着民航导航系统逐步升级到多星座、多

频段，未来这套依赖 GPS 单一信号的异常指标，敏感性将逐渐下降。Aircon 已经明确意识到这一点，并提出未来需要由 ADS-B 报文中新增的“显式干扰/欺骗标志位”接棒。

二、典型系统发展现状

（一）美国 HawkEye 360

1. 公司背景与历史

HawkEye 360 公司总部位于美国弗吉尼亚州赫恩登市，2015 年由约翰·塞拉菲尼（John Serafini）等人创立。它的核心技术来自美国弗吉尼亚理工大学休姆国家安全与技术中心的技术转让，由此把原本只属于军用电子侦察卫星的电磁频谱监测能力，搬到了商业低轨小卫星上。2018 年 12 月，HawkEye 360 发射“开拓者”（Pathfinder）任务的三颗微卫星 Hawk-A/B/C，成功演示了“三颗一组、编队飞行、单次过顶定位”的工程可行性，成为全球首个基于无线电信号测绘技术的商业低轨星座系统。

2. 星座规模、轨道与载荷参数

每个三星编队都飞行在太阳同步轨道，高度 575 km，倾角 97.77° ，降交点地方时（LTDN）10:30 时。编队内三颗星沿轨道前后排开、间距保持在 125 km，中间星还做一定的轨道面外周期性振荡，以便形成不退化的三维定位几何在公司完整规划中，总共部署 30+颗卫星，按 10 个编队（每编队

3 颗) 布署, 目标重访周期 15 分钟。

每颗卫星采用 SFL 的 NEMO-15 平台 (最新批次升级为 30 kg 的 Defiant 平台), 尺寸约 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 44\text{ cm}$, 发射湿重约 13.4 kg。星上唯一的有效载荷是软件定义无线电, 这套系统可在 70 MHz-6 GHz 之间任意调谐, 瞬时带宽达 56 MHz, 配合三路独立基带处理器实现“三频段同时听”。前端集成低噪声块下变频器 (LNB), 把可监测频段进一步扩展到 Ku 波段约 18 GHz, 配合四分之一波长偶极、贴片、宽带按钮和喇叭等多种天线, 覆盖从甚高频 (VHF) 到 Ku 波段的完整射频谱。整体设计理念是“星上多动手、地面少处理”, 星载 FPGA 直接对原始信号做过滤、平衡和元数据提取, 只把“提炼”过的数据下传, 而盲相干累积等算力密集型工作交给地面 GPU。

星座建设遵循“边发射、边运营、边升级”的节奏, 截至 2026 年初, HawkEye 360 已在轨运行超过 30 颗卫星, 公司还从 SFL Missions 订购了 Cluster 14-16 的九颗新星, 后两个编队将引入升级的天线和无线电系统, 支持在战区同步采集与下行实时下传。

3. 定位体制与探测能力

HawkEye 360 的定位体制是“三星 TDOA/FDOA 联合定位”, 同时为应对弱信号场景, 公司专门设计了盲相干累积算法——在地面对候选位置进行长时间相干积分, 构造能量

密度图后取最高点为定位估计。在 2025 年 7 月发布的 GNSS-I 探测产品套件升级中，HawkEye 又集成了 3 项新能力：更宽频段的发射机识别算法（更精确区分相邻干扰源）、GPS 欺骗检测能力（区分压制式干扰与广播式欺骗），以及地形高程模型修正，将定位精度提升的同时还实现了“地理定位密度提升 15 倍”。这意味着同一地理区域的干扰源能被更密集、更准确地标注。

工程数据方面，与 Maxar 商业遥感影像、AIS 船舶上报位置的交叉比对显示，HawkEye 360 公开宣称的定位精度可达 500 米量级，定位误差椭圆 95% 置信范围内的实际表现约在数百米至数公里之间（取决于信号强度、电磁环境、过顶几何）。这一指标在 GNSS 干扰监测领域已经处于商业系统的领先水平。

4. 与军方/情报机构的合作关系

HawkEye 360 虽然是“商业公司”，但其客户重心几乎完全压在政府和军方一侧。公司明确表示不向任何受美制裁的国家和实体出售数据，与中国、俄罗斯政府机构、公司、个人均不开展合作。

2019 年，美国国家侦察局（NRO）授予 HawkEye 360 首份射频地理定位集成研究合同，开启了 NRO 商业 RF 数据采购的序幕。2020 年 12 月，该公司开始为美国国家地理空间情报局（NGA）提供商业 RF 地理空间情报试点服务，用

于其他光学/雷达卫星的“提示与队列”——即用 RF 数据告诉成像卫星“应该重点拍哪里”。2022 年 9 月，NRO 在战略商业增强广域机会公告（BAA）框架下，同时与 HawkEye 360、Aurora Insight、Kleos、PredaSAR、Spire Global、Umbra Lab 六家公司签订 RF 地理定位研究合同，初期合同额约 30 万美元/家，但可按里程碑快速扩展。2025 年 12 月，NRO 把 HawkEye 360 的合同延长 23 个月，重点支持美国欧洲司令部行动。2026 年 3 月，HawkEye 360 宣布与一家未公开身份的欧洲国防部签订电子战项目合同，金额最高 7500 万美元，订阅其“防空与 GPS 干扰监测”服务。

5. 实战与实际任务中的成果

HawkEye 360 的成名战是俄乌冲突。早在 2021 年 11 月，也就是俄乌冲突爆发的三个多月前，该公司的卫星就在乌克兰东部卢甘斯克和顿涅茨克接壤的亲乌、亲俄部队边界附近，监测到大量 GPS 干扰信号；公司通过公开信息确认，这些干扰已经影响到该地区的无人机作战。2022 年 2 月下旬冲突爆发前夕，HawkEye 360 又在乌克兰与白俄罗斯边境、切尔诺贝利以北探测到 GPS 干扰活动。同年 3 月 4 日，公司公开发布了《乌克兰 GPS 干扰检测》报告，把这部分数据正式作为商业产品对外披露。

公司 CEO 塞拉菲尼在公开场合的表示“那些干扰 GPS 和雷达的发射机，就是俄军在哪、要往哪里去的先行指示器”。

这句话准确说明了 HawkEye 360 的产品定位：不是“事后取证”，而是“事前预警”。在持续的俄乌冲突中，HawkEye 360 的数据被用于跟踪受制裁俄罗斯寡头的游艇，通过监测船载 AIS 发射机的 RF 特征（即使 AIS 被关闭也能定位），帮助北约对俄实施金融与法律制裁。

更深一层的意义在于 HawkEye 360 改写了美军对“商业天基 ISR”的认知。美国空军研究实验室（AFRL）已经把 HawkEye 360 这样的商业 RF 数据作为正式实验对象，深入探索如何把它纳入“混合卫星 ISR 架构”，即在传统军用卫星之外，再增加一层由商业卫星组成、对盟友可分享的非密级数据层。在地中海、南海、朝鲜半岛三个区域，HawkEye 360 通过“区域感知订阅”（RAS）提供持续日级 RF 信号采集。在更早的 2021 年 10 月，公司 COO 还在 GEOINT 研讨会上确认，HawkEye 360 在地中海持续监测 GPS 干扰，已经在为政府和商业客户提供日常预警服务。

（二）法国 Unseenlabs

1. 公司背景与历史

Unseenlabs 公司总部位于法国西部布列塔尼大区首府雷恩市，2015 年由克莱蒙·加利克（Clément Galic）和乔纳森·加利克（Jonathan Galic）兄弟创立。公司 BRO 产品名“Breizh Reconnaissance Orbiter”中的 Breizh，正是布列塔尼语“布列塔尼”的拼写。2016 年公司获得法国研究与创新部的资助，

2017 年与丹麦小卫星制造商 GomSpace 签订总包合同，由后者负责卫星平台、Unseenlabs 负责自研射频载荷。2019 年 8 月 19 日，BRO-1 搭乘火箭实验室的电子号进入轨道，成为法国首颗由私营企业全资拥有并运营的卫星。同年 10 月，公司启动商业服务，把首批数据交付给海外客户。

Unseenlabs 与 HawkEye 360 最大的差异是“以海上态势感知为主、把 GNSS 干扰监测作为衍生能力”。该公司从创立起就以“如何看清海上那些关闭自动识别系统（AIS）的‘暗船’”为出发点——这恰恰是法国作为欧盟最大海洋专属经济区国家最关心的核心问题。这一战略定位决定了 Unseenlabs 在 GNSS 干扰监测领域的“参与方式”与美国公司截然不同，它不像 HawkEye 360 那样把 GNSS 干扰监测做成专项产品，而是把它作为整体海事 RF 情报里的一个数据维度。

2. 星座规模、轨道与载荷参数

BRO 星座的卫星采用 GomSpace 的模块化立方星平台，早期 BRO-1 至 BRO-11 是 6U 构型（约 6 公斤），后续 BRO-12 及之后逐步过渡到 8U 构型（约 8 公斤）。所有卫星都飞行在低地球轨道，高度通常在 400-650 km 之间；最新批次（如 BRO-19、BRO-21）则集中部署在 520 km 左右的太阳同步轨道、倾角 97.4° ，与对地观测主流轨道保持一致。截至 2026 年 5 月，星座已发射至 BRO-21，在轨卫星数超过 17 颗。

发展路径上，Unseenlabs 走的是“小步快跑、稳定迭代”。公司明确规划保持“每年发射 4-5 颗”的节奏，目标先把规模扩到 20 颗以上。该公司 2024 年 4 月宣布的“下一代星座”将卫星单星质量提升到 150 公斤级，监测目标从单纯的海上扩展到陆地（GNSS 干扰器、卫星电话等）乃至太空（卫星之间的电磁活动）三大领域。150 公斤级的首颗 Gen 2 卫星预计 2026 年内入轨。

载荷上，每颗 BRO 卫星都搭载 Unseenlabs 自研的“单星 RF 到达方向（DOA）检测器”，该载荷主要侦收 S 波段和 X 波段。根据《海上人命安全公约》（SOLAS）第 19 章的强制要求，所有 3000 总吨以上船舶必须装备 S 波段导航雷达，而 X 波段雷达提供更高分辨率，因此 S+X 双频段组合覆盖了绝大多数现代化船舶的电磁辐射特征。载荷输出三类参数：载波频率（MHz）、脉冲宽度（ns）和脉冲重复频率（Hz），这些参数共同构成船载雷达的“电磁指纹”，可用于不可伪造的发射机识别。

3. 定位体制与单星几何

Unseenlabs 在产品宣传上反复强调“单星地理定位”作为差异化卖点，意思是不需要像 HawkEye 360 那样依赖多星编队同步快门，每颗 BRO 都可以独立完成探测、表征和定位。在工程上 BRO 采用相位干涉测向方法，卫星本体上多个间距已知的接收天线对同一信号采样，通过测量相位差反

演来波方向，再结合卫星自身轨道知识把方向投影到地球表面得到定位。

“单星定位”意味着只要有一颗 BRO 飞过目标区域，就能给出定位结果，对星座调度负担小、成本低；但也意味着定位精度受限于单星天线基线长度，无法与多星编队 TDOA/FDOA 的几何优势比拼。落到具体数字上，Unseenlabs 公开数据显示：在置信度分级（HIGH/MEDIUM/LOW）下，定位误差均值约 5.4 km、中位数 2.5 km，最大误差可达 30 km。这一精度对识别“哪艘船在哪片海域”足够用，但对“哪个 GNSS 干扰器在哪个具体地点”这类军事级目标定位，与 HawkEye 360 三星 TDOA/FDOA 的百米-公里级精度相比有数量级差距。而且，5.4 km 这一数字来自公司公开技术资料，主要针对船载雷达类强信号源，对 GNSS 干扰这类弱信号、复杂调制场景下的实测表现，缺乏公开第三方独立验证。

4. 探测能力指标与产品形态

时空采样能力方面，BRO 星座每日可对同一目标完成 8-12 次采集（视纬度而定）；当前重访周期约 2-3 小时，按公司规划满星座部署完成（ ≥ 17 颗，2025 年底已达到）后可降至 1 小时以内、目标 30 分钟。数据交付时延平均约 2 小时 20 分钟，最大 24 小时。这些对一个商业 RF 服务来说足够，但仍达不到军用情报系统“分钟级”的实时要求。数据产品按四个加工层级输出：Level 1A 仅含发射源定位结果、

Level 1B 加入信号技术参数、Level 1C 进一步包含波形细节、Level 2 与 AIS 数据融合做交叉验证。输出格式涵盖 CSV、GeoJSON、SHP 等地理空间标准，便于直接接入客户的 GIS 工作流。

Unseenlabs 还有一项独特做法，他们所有核心计算都在法国境内的专用服务器上完成，刻意避开第三方云依赖。这是“数据主权”理念的具体体现，背后是欧盟与法国对国家安全合规、防止数据外流到美国云服务商的明确立场。

5. 与军方/情报机构的合作关系

Unseenlabs 的政府/军方客户关系有一个显著特征：主要是法国，另外就是国际海事多边客户，而非依附于美国国防情报体系。

2016 年，法国研究与创新部给出的首笔研发资助是公司起步种子资金。2024 年 2 月，该公司 8500 万欧元 C 轮融资投资方背景几乎都是欧洲资本。该公司还加入了欧洲航天局（ESA）的 Copernicus 计划，通过这一框架参与公共海事服务。

与 HawkEye 360 那种“NRO、NGA、EUCOM”等具体客户名清晰可见的形态不同，Unseenlabs 的客户关系更“内敛”，部分原因是欧洲国防客户的信息透明度本就更低。

6. 实战与实际任务中的成果

Unseenlabs 的“成名战”不在俄乌冲突、也不在中东 GPS 欺骗，而在海上“暗船”问题，这是它与 HawkEye 360 在对外成绩叙事上最大的不同。BRO 星座的核心产出是以下几类：

非法、未报告、未受规范（IUU）渔业监测：对那些关闭 AIS 偷偷捕鱼的远洋渔船，BRO 通过侦收船载雷达发射机的 S/X 波段信号实现定位。这是公司客户中比重较大的一类。

海洋倾废与污染追踪：识别出在远洋偷偷倾倒废弃物的船舶。

海底电缆与近海平台周边可疑活动监测：这一类需求在 2022 年北溪管道事件之后大幅上升，欧洲国家对俄罗斯“影子舰队”在关键海底基础设施附近的活动越来越警觉。

另外，Unseenlabs 还参与了挪威北极海域多源融合实验。在 SAR、AIS、RF 三类数据融合的研究中，包括 NorSat-3 等卫星的对比数据显示，BRO 类 RF 卫星能探测到 AIS 已发现船舶的约 43%，且可独立发现部分 AIS/SAR 都未捕获的真正“暗船”，证明 RF 是多源监视体系中不可被替代的一环。

至于在导航干扰监测领域的具体战绩，可考的公开材料较为有限。在《美军导航战运用浅析》一文中，魏蒸（2025）提到俄乌冲突中“美军利用 HawkEye 360、Unseenlabs 等公司的信号情报（SIGINT）卫星进行战场无线电测向、信号特征分析和通信破译”。这是将 Unseenlabs 与 HawkEye 360 并列提及的少数文献来源，但具体探测发现、定位精度、提交

给乌方哪些情报，没有进一步细节。考虑到 BRO 主载荷是 S/X 波段而非 L 波段，且 5.4 km 量级定位精度对 GNSS 干扰源定位偏粗，公司在 GNSS 干扰监测中的实际作用，可能更多是“提供辅助拼图”而非“主力”。

2024 年 4 月 Unseenlabs 宣布的“下一代海陆空全域监测星座”，把陆基 GNSS 干扰器与卫星电话明确列为目标对象，意味着这家公司正在主动从“海上为主、干扰为辅”转向“海陆空全覆盖”。这是一个关键的战略转折，如果 150 公斤级 Gen 2 卫星按计划部署到位，Unseenlabs 在 GNSS 干扰监测领域的的能力可能在 2027 年之后显著上升。但截至本报告写作时（2026 年 5 月），Gen 2 还没有正式进入轨道，相关能力指标仍不可考。

（三）美国 Spire Global

1. 公司背景与历史

Spire Global 公司 2012 年由彼得·普拉策（Peter Platzner）在旧金山创立，最初名为 Nanosatifi，目标是众筹做小卫星。2014 年公司更名为 Spire Global，启动 Lemur（Low Earth Multi-Use Receiver）项目，把业务重心转向商业气象与船舶跟踪两条主线。2015 年第一批 Lemur-2 进入轨道，到 2024 年 9 月公司已发射超过 180 颗 Lemur-2，是全球最大的商业纳米卫星星座之一。

Spire 走入“导航干扰监测”这条路是一段意想不到的故

事。在公司向媒体披露的描述里，2021 年的时候，他们在校准首批反射测量（GNSS-R）卫星时，发现这些原本用来测海冰、土壤湿度的接收机居然能“听见”地面 GPS 干扰器的信号。Spire 美国政府销售负责人康纳·布朗（Conor Brown）的原话为：“军用干扰器太响了，它们高高地浮在背景噪声之上，我们的气象卫星不小心就把它们捕捉到了”。这一发现催生了 Spire 从气象气候业务向信号情报业务的战略“扩张”，也成为该公司最具差异化的卖点：用一颗卫星同时做气象、海事、航空、SIGINT 四件事，单位载荷边际成本极低。

2. 星座规模、轨道与载荷参数

Lemur-2 是 3U 立方星，外形尺寸约 $10 \times 10 \times 34$ 厘米，部署在低地球轨道，高度 350-650 km、倾角因发射任务而异，多颗采用太阳同步轨道。2022 年突破 100 颗“全部署完成”门槛后，公司一面持续补充新星，一面进行载荷升级。其中真正承担 GNSS 干扰监测任务的是 STRATOS 子集——大约 60 颗专门搭载 GNSS-RO 接收机的卫星。STRATOS 配备：

1 副宽视场天顶指向天线：用于精确轨道确定（POD），相当于卫星自己“看上方天空的 GPS 卫星”，给自己定位。

1-2 副窄视场、对准地平线（Earth-limb）的高增益天线：原本用于接收掠过大气层的 GNSS 信号，做无线电掩星气象探测；现在被复用来“窃听”GNSS 干扰信号。

3 个双频通道：每路天线接入一个射频前端，使卫星能同时录制 GPS L1（1575.42 MHz）和 GPS L2（1227.6 MHz）的原始中频数据，采用 2 比特量化、6.2 Msps（兆采样/秒）采样率，所有通道由同一颗采样时钟驱动，保证多通道之间的相位相干。

每次任务可下传 60 秒的原始中频快照，工程上采用“循环录制”的设计；星上不做复杂处理，把原始数据留给地面 SDR 软件接收机做精细分析。

近年来 Spire 在持续升级载荷：2022 年宣布加装 Kepler Communications 的 Ku 波段下传天线，提升数据下行带宽；同年加装高光谱微波探测器（HYMS）升级气象业务；2025 年起开始部署专为“太空侦察（Space Reconnaissance）”业务而设计的下一代卫星编队，2024 年获得美国空军研究实验室（AFRL）一份 1400 万美元合同，开发地面动目标检测能力。2026 年 3 月，Spire 还演示了单星 S 波段和 X 波段 RF 定位，把可监测频段从 VHF/UHF/L 拓展到了更高频段——这意味着它可以追踪雷达、卫星通信类辐射源，与 HawkEye 360 在更高频段直接竞争。

3. 定位体制：单星多普勒为核心

Spire 的差异化定位体制集中在“单星多普勒”，它的工程逻辑是：与其等待星座规模能撑起“三星同步快门”，不如先用单颗卫星过顶时记录干扰信号的多普勒频移时序，反

推干扰源位置。这一选择是 Spire 与 HawkEye 360（三星编队 TDOA/FDOA）的根本路线区别。

值得强调的是，单星多普勒在工程实现上有两个关键前提：（1）干扰信号的载波相位必须可被跟踪；（2）干扰源的载波频率在观测时段内基本保持准恒定（quasi-constant）。前者决定了 Spire 可以“听清”干扰，后者决定了它能不能“反推位置”。在面对 GNSS 欺骗器这类发射载波频率被故意调制的复杂目标时，传统单星多普勒会失效，Spire 联合德州大学奥斯汀分校无线电导航实验室（UT RNL）共同开发了“钟漂反演法”，把欺骗器伪装的多普勒分量从接收机内部估计的“虚假钟漂时序”里反向提取出来。2022 年这一方法在公开实验中首次成功演示，UT RNL 用 TEXBAT 数据集的“clean static”录音通过位于澳大利亚珀斯的 Spire 地面站发送 S 波段欺骗信号，Spire LEO 卫星过顶捕获 20 秒，UT RNL 的 GRID 软件接收机反演出地面欺骗源位置——这成为公开领域首例 LEO 单星单次过顶 GNSS 欺骗器定位实验。

除单星多普勒外，Spire 也支持多星 TDOA/FDOA 联合定位，前提是两颗或多颗 STRATOS 卫星同时过顶同一区域且时钟同步。2022 年 4 月，两颗 STRATOS 在东地中海上空进行了两次连续 60 秒同步采集（间隔 180 秒），平均高度 524 km、平均速度 7678 m/s——这正是 Spire 在该地区一次性发现并定位 30 余个干扰源的关键数据。

4. 探测能力指标

Spire 公开过几组工程数据：

单星单次过顶定位精度：对于配备温度补偿晶振(TCXO)这种品质较低钟的发射源，95%定位误差优于 78 km；对于使用恒温晶振(OCXO)的高品质钟，95%误差可优于 1 km。多次过顶叠加后，TCXO 误差可降到 2 km、OCXO 可降到 100 m。

单星+Doppler 在叙利亚的实测：2018 年，UT RNL 团队用 Doppler 方法对叙利亚的一台 70 瓦匹配码干扰器实现了优于 300 米的定位精度——这一精度水平虽然达成的前提条件较苛刻，但仍是单星方法当时的标志性成果。

双星 TDOA/FDOA 联合定位：在 2022 年 4 月东地中海上空两次 60 秒采集中，Spire 的两颗 STRATOS 卫星配合 UT RNL 的算法，识别并定位了横跨叙利亚、土耳其、伊拉克、乌克兰、以色列的 30 余个 GNSS 干扰源，重点关注的叙利亚 Khmeimim 空军基地的干扰器被定位的 95%误差椭圆短轴在数十米量级（半长轴 7 米、半短轴 5 米），这是当时公开发表的 LEO 干扰源定位精度最高的实测之一。

上述精度指标主要源自学术合作，是该路线的“上限能力”的公开演示，而非 Spire 商业产品默认承诺的下限。在 Spire 官方“太空侦察”产品页面，公司列出的能力是“TDOA/FDOA+多普勒分析定位、高重访率追踪移动或低功

率发射机”，但没有承诺具体精度数字。

5. 与军方/情报机构的合作关系

Spire 的客户网络比 HawkEye 360 还要广，但单笔合同规模通常较小、横跨美英澳欧多个政府部门，呈现“广撒网、多复用”形态。

2017 年 3 月，Spire 与 Ball Aerospace 联合为美国国家地理空间情报局（NGA）开展北极海事态势感知（MDA）数据采集合作。2021 年 8 月，英国国防与安全加速器（DASA）授予 Spire 首笔 RF 信号检测与定位项目资助，是 DASA 历史上对苏格兰创新者的最大单笔投入。2021 年，美国太空军太空系统司令部将 Spire 数据用于卫星干扰检测项目。2022 年 2 月，该公司获美国海洋与大气管理局（NOAA）800 万美元 IDIQ 合同，购买商业 RO 气象数据。2022 年 9 月，该公司与 HawkEye 360 一同进入 NRO 战略商业增强（SCE）BAA 合同框架（六家 RF 公司之一）。2023 年 7 月，欧洲航天局（ESA）授予该公司 1600 万欧元 EURIALO 合同，设计基于多边定位（MLAT）的卫星航空监视系统，作为 ESA 在 ARTES 框架下的项目。2023 年，澳大利亚国家情报局（ONI）NICSAT2 项目，选中该公司定制两颗 6U 立方星携带光学载荷。2024 年，该公司获得 AFRL 1400 万美元合同，开发地面动目标侦察星座。2025 年 7 月，该公司宣布“太空侦察”产品组合扩展，把 GNSS 干扰追踪正式列为产品线。2026 年

5 月，该公司进入美国导弹防御局（MDA）“可扩展国土创新分层防御（SHIELD）” IDIQ 合同，合同总额上限达 151 亿美元（注：此为该 IDIQ 框架对所有承包商的总额上限，Spire 是其中一家入选承包商，而非单一公司的合同额）。

Spire 有“主权部署”模式，客户可以选择把数据控制权完全留在本国，规避对美方的云依赖。这是它与法国 Unseenlabs 的数据主权理念最相似的一点，反映出欧洲与盟友国家在“用美国技术但不让美国看见数据”问题上的明显需求。

6. 实战与实际任务中的成果

Spire 在 GNSS 干扰监测领域的实战战绩，主要可考的有以下几条：

叙利亚 Khmeimim 空军基地干扰器（2018 年起持续）。
2018 年起，UT RNL 与 Spire 合作多次在叙利亚地中海沿岸捕获干扰信号，该地区是俄军 Khmeimim 空军基地所在地，长期部署电子战装备。UT RNL 使用单星多普勒方法首次实现< 300 米定位精度。2022 年 4 月双星采集进一步细化，在该处定位的 95%误差椭圆半长轴仅 7 米、半短轴 5 米。

东地中海与乌克兰广域 30+干扰源（2022 年 4 月）。在同一次东地中海双星采集中，UT RNL 与 Spire 通过直接定位法在两次 60 秒数据中识别出跨叙利亚、土耳其、伊拉克、乌克兰、以色列五国的 30 余个干扰源——这是当时公开发

表的最大规模一次性 GNSS 干扰源天基定位演示之一。该结果同时表明：俄乌冲突外溢的电子战效应已经波及到周边整个东地中海地区，而不仅仅在乌克兰境内。

早期商业 SIGINT 测试（2021 年）。2021 年 4 月，应美国政府客户要求，Spire 在仅有数天通知期的情况下，调度 3 颗 GNSS-RO 卫星采集本土某地的干扰测试期间的原始中频数据。客户经初步分析后确认 Spire 用 GNSS-RO 卫星成功探测到了 GPS 干扰信号。这一次“应急任务”是 Spire 决定从气象向 SIGINT 战略转型的关键事件。

民航 GNSS 干扰广域映射（持续）。通过 ADS-B 接收载荷与 NIC/NACp 字段分析，Spire 持续输出全球航线 GNSS 干扰热区图，与 Aireon 在该领域形成互补关系。Spire 同时整合天基与地面 ADS-B 数据，提供商业 GNSS 干扰映射产品。与 HawkEye 360 强调“定位干扰源”不同，Spire 的航空产品更强调“区域受影响范围测绘”。

总体上，Spire 的工程理念与 HawkEye 360 形成对照。HawkEye 是“为干扰监测专门设计”，Spire 是“用一个多用途平台兼营干扰监测”；HawkEye 用三星编队 TDOA/FDOA 拼精度，Spire 用单星 Doppler+学术合作拼成本。两条路线各有优势：HawkEye 在“专精强信号源持续定位”上目前更稳，Spire 在“覆盖广、单位成本低、与学术界紧密耦合做技术突破”上更具弹性。

（四）政府主导/研究型项目

商业公司之外，多国政府机构与研究单位也在持续推进 GNSS 干扰天基监测的能力建设。与商业公司相比，这一类项目通常规模较小、不以营收为导向、更聚焦于“原型验证+公开发表”，但恰恰是它们贡献了 GNSS 干扰监测领域可考的、最高质量的公开技术指标。

1. 美国 UT Austin Radionavigation Lab 系列研究

该项目体系以“快速、轨道、TEC、可观测量、导航（FOTON）”软件定义 GNSS 接收机为核心。该接收机由德州大学奥斯汀分校（UT Austin）与康奈尔大学（Cornell University）联合研制，是一台科学级双频（GPS L1 与 L2）GNSS 接收机，自 2017 年 2 月起搭载于国际空间站（ISS）上的“GPS 无线电掩星与紫外光度计联合实验（GROUP-C）”载荷上，属于“太空试验项目-休斯顿 5 号载荷（STP-H5）”。FOTON 本意是观测 GPS 信号在地球大气中折射弯曲的掩星现象，属于纯气象/电离层科学研究。但 GROUP-C 主任斯科特·布兹恩（Scott Budzien）团队后来发现，原本用于科学探测的“掩星数据”里掺杂着大量来自地面的强干扰信号。

2018 年，UT RNL 团队对叙利亚境内一台 GNSS 干扰器实现了精度优于 220 米的天基定位（95% 置信椭圆半长轴），这是公开文献中前所未有的精度水平。该干扰器载波功率约 100 瓦 EIRP，地面发射机以全部 32 个 GPS L1 C/A 扩频码同

时发射，但不调制导航数据。这意味着它的设计意图明确是“压制式干扰”，而非欺骗（如要欺骗必须调制有意义的导航数据）。定位结果与叙利亚海岸一处俄军运营的空军基地（地理位置与 Khmeimim 一致）高度吻合。同期分析还表明，中国大陆持续存在 GPS L2 频段干扰，至 2020 年 6 月仍在持续（论文推测源头位于 32° N, 114° E 附近，但未给出精确定位）。

在 FOTON 之后，UT RNL 团队进一步与 Spire Global 联合，于 2022 年、2023 年发表两篇论文。这些工作把单星多普勒/双星 TDOA-FDOA 联合定位的理论框架完整化，并以前文所述的东地中海 30+ 干扰源广域识别为实证。

2. 德国 SeRANIS/ATHENE-1 项目

“太空互联网无缝无线电接入网络”（Seamless Radio Access Networks for Internet of Space, SeRANIS）是德国联邦国防军数字化与技术研究中心资助的多用途研究项目。研究卫星 ATHENE-1 目前正在研制中，将搭载多种实验载荷，包括宽带通信、物联网、人工智能自主决策、GNSS 技术（掩星、反射测量、干扰/欺骗监测）、光学与红外对地观测、目标检测算法、载荷操作概念、新型结构、智能健康监测、电推进等。GNSS 干扰监测只是其中的一项实验，但项目对监测灵敏度做了详尽的理论与仿真分析。

参与机构主要包括德国联邦国防军慕尼黑大学卫星导

航研究组，以及德国卫星制造商 OHB System AG。OHB 是欧洲第三大卫星集成商，长期是欧洲航天局（ESA）“伽利略”（Galileo）第二代卫星的承包商，这意味着 ATHENE-1 同时是德国本土“军用卫星能力孵化器”的一个抓手——通过研究项目把民用 GNSS 接收机经验转化为军用干扰监测能力。

SeRANIS 团队详尽分析了不同载荷参数、卫星编队几何对探测灵敏度与定位精度的影响。其代表性指标包括：单星基于 FFT 的检测方法可达到 -30 dB J/N （干扰对噪声比）；双星基于互模糊函数(CAF)的相干检测方法可达 -31 dB J/N ，比单星提升约 20 dB 灵敏度。这些数字代表 LEO 平台对极弱地面干扰信号探测能力的“工程上限估计”。

3. 德国 MOGSI / LISA 项目

“全球导航卫星系统信号干扰的星载监测”（Spaceborne Monitoring of GNSS Signal Interference, MOGSI）由德国航天局（DLR）资助，与 SeRANIS 并行推进。MOGSI 的核心是“LEO 干扰态势感知”（LISA）载荷模块。整套系统包括两部分：LISA 干扰监测载荷，以及一个安全级的天基伽利略公共监管服务（PRS）接收机——后者负责为整个干扰监测应用提供“经过完整性验证的、可信的 PVT”

（Position-Velocity-Time）。这可以理解为“用伽利略自己的最高安全等级信号去为 GNSS 干扰监测系统当裁判”——既

然要给地面别人定位干扰源，自己的位置就必须不能被任何外部欺骗误导，这是一种系统级的自洽设计。

MOGSI-LISA 规划三颗卫星编队，通过星间链路（ISL）互联——卫星 1 与卫星 2 之间使用光学 ISL，卫星 2 与卫星 3 之间使用射频 ISL。载荷覆盖的频段比商业系统更广，包括 GPS L1/L2/L5 与伽利略 E1/E5/E6。卫星上每颗都配置三副天线：一副天底指向天线用于探测地基 RFI，一副天顶指向天线用于探测天基 RFI（防范他国对 GNSS 卫星本身的攻击），以及一副天顶 GNSS 接收天线。下行采用 S 波段遥测/遥控（TM/TC）+X 波段 RFI 数据下行的标准组合，遵循“星上探测、地面定位处理”的双段架构——干扰检测在星上完成，原始 I/Q 数据被时间戳标记后下传给地面，由后处理算法做精细定位。

MOGSI-LISA 团队对两步加权最小二乘（WLS）定位算法做了详尽仿真。在 1200 km 星间距离下，假设干扰源位于纬度 41.5° 、经度 12.5° 、海拔 545 m 处，两步 WLS 算法实测水平定位误差约 204 m，对应的克拉默-劳下界（CRLB）仅 4.5 m——也就是说实测算法还远未达到信息论给出的理论极限。100 km 星间距离时实测误差升至 809 m（CRLB 25 m）、1800 km 时为 261 m（CRLB 5 m），中等基线下精度最好这一非单调结果是双星几何稀释与信号相关性两个因素折中的产物。

（五）衍生监测项目

有些科学卫星并非为 GNSS 干扰监测而设计，却因为载荷特性而成为重要的干扰监测数据源。其中的代表主要有 NASA 的 CYGNSS 与 SMAP-R 卫星系统。

1. NASA CYGNSS

旋风全球导航卫星系统(CYGNSS)是 NASA 第一项“地球冒险任务”，由 8 颗 LEO 卫星组成，2016 年 12 月发射。轨道高度 510-520 km，倾角 35° ，因此其名义南北观测带被限制在 $\pm 38^\circ$ 纬度范围内。每颗卫星搭载一台“延迟-多普勒映射仪 (DDMI)” ，配置一副天顶天线（用于精确轨道确定）与两副天底天线（用于接收地球表面反射的 GNSS 信号，对地海面风、土壤湿度等参量进行反演）。原始设计目标是飓风风速观测，但 DDMI 在地面反射 GNSS 信号上的高灵敏度，使其同时成为天基 RFI 探测的良好观测站。每个观测时刻 DDMI 在 4 个反射通道上同步生成“延迟-多普勒图 (DDM)” ，提供 Level-1 标准数据产品。

CYGNSS 数据的干扰检测算法在过去几年经历了多次更新换代：

（1）NASA 峰度（Kurtosis）标志：原始的官方 RFI 标志产品。但该方法在陆地高海拔地区会出现假警，原因是高海拔地形导致预测反射延迟偏离，人为抬高了峰度值。

（2）均值（Mean）聚合法：改用 4 通道 DDM 噪声底

的均值作为统计量。该方法在持续性干扰条件下表现较好，但对“只污染部分通道”的干扰源会因均值稀释而漏检。

（3）最大值（Max）聚合法：把 4 通道 DDM 噪声底的均值改为最大值，可保留“最强通道异常”，对“局部通道污染”的灵敏度大幅提升。同时提出了基于无干扰参考区域反推的 41 dB 实用阈值。

（4）Al-Khaldi 等（2025）IEEE TGRS 论文：进一步引入“超中位绝对偏差（MAD）”与“ Δ EIRP 估计（有效全向辐射功率偏差估计）”两个分析量，结合多次过顶累积，把覆盖纬度扩展到 50° N（通过 CYGNSS 卫星周期性“滚动”以使朝向地面的左侧（port-side）天线指向更高纬度）。

在两个公开案例研究中，新方法的表现给出了硬数据对比：

测试场景	时间	峰度法	均值法	最大值法
白沙导弹靶场 (NOTAM 公告的干扰试验)	2025 年 5 月	微弱	漏检 3 个日期	3 个日期均探测到
中东地区(持续性干	2025 年 5 月	33% epochs*	46% epochs 标记	62% epochs 标记

扰)		标记		
----	--	----	--	--

*epoch: 直译为“被标记为有干扰的时段所占比例”。在 CYGNSS 系统里, 一个 epoch 是指生成一张完整时延-多普勒图 (DDM) 的时间单位。CYGNSS 每秒生成约 1-4 张 DDM (具体取决于工作模式), 这张 DDM 就是对某个镜面反射点附近区域的一次“快照”。

CYGNSS 还借助“卫星侧滚”操作扩展了北部覆盖范围——通过让左侧天线指向更接近地球地平线, 使观测最远可触及北纬 50° 。在 2024 年 12 月 23 日, CYGNSS 在乌克兰顿涅茨克州中心上方完成一次定位, 峰值天线增益约 11 dB, 这一次定位与当时顿涅茨克州军事行动的“加剧期”在时间上完全吻合。同期还在俄罗斯境内与白俄罗斯境内完成了类似探测。

韩国研究团队的独立分析进一步验证了 CYGNSS 在远东地区的态势监测价值——中东与朝鲜半岛地区的 DDM 最大值约为太平洋基线区域的 5 倍, 超阈值比率 (在所有有效的 DDM 测量样本中, 被算法判定为“存在 RFI”的测量数量所占的百分比) 分别达到 82.3% 与 23.1%。

2. NASA SMAP-R

土壤湿度被动主动反射测量仪 (SMAP-R) 起源于 NASA 的 SMAP 任务, 主任务是用 L 波段雷达和辐射计探测土壤湿度。其雷达接收机在 2015 年发射后被重新设计为“全极化 GNSS-R 反射仪”, 工作频段是 GPS L2c (中心频率 1227.6 MHz, 仅 CL 与 CM 码、带宽约 1 MHz)。与 CYGNSS 不同,

SMAP-R 同时接收垂直 (V) 与水平 (H) 双线极化分量, 能直接计算斯托克斯参数 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 ——这赋予它“看清干扰信号偏振特征”的独特能力。

与 CYGNSS 相比, SMAP-R 有两条独特优势: (1) 全球覆盖: 不受 $\pm 38^\circ$ 纬度限制, 可以从北极到南极完整观测; (2) 长程历史数据: 从 2015 年 10 月开始累积、迄今超过 10 年的全极化数据集, 是任何其他 GNSS-R 任务无法比拟的“时间深度”。这两个优势让 SMAP-R 成为 GNSS 干扰长程态势研究的旗舰数据源。

Rodriguez-Alvarez 等人 (2026) 在 IEEE JSTARS 上发表的研究中, 通过将 2024 年数据与 2016 年 (基线、几无干扰) 对比, 定量识别出三个主要冲突地区的 GNSS 干扰演化:

乌克兰-俄罗斯战区: 2021 年信号噪声仍极低, 2022 年随冲突爆发陡升, 到 2023-2024 年覆盖范围已扩展到乌克兰全境、俄罗斯西部、白俄罗斯, 反映了广泛的电子对抗与干扰活动。2024 年用 $\bar{S}_3 > 0.75$ 阈值绘制的地图清晰显示了俄乌战区的干扰源分布。

土耳其-叙利亚边境: 2020 年之前干扰水平较低, 2021 年起急剧上升, 与该地区持续的军事行动相吻合。同一张地图还把以色列-加沙冲突的痕迹 (特拉维夫周边几处定位) 展示了出来。

缅甸内战区: 2023-2024 年干扰强度上升, 集中在中部

和沿海地区，与缅甸内战中各方电子战手段使用一致。

值得指出的是，SMAP-R 的发现得到了美国陆军战争学院战略研究所的引用，称俄乌战争中的 GNSS 拒止行动“达到了前所未有的水平”——这意味着民用科学卫星的研究成果，已经被纳入了高级别的军事战略评估。SMAP-R 团队也在论文中明确提出，目前正在向 SMAP-R 数据集中加入“标记方法学”，让全球科研用户可以直接用 SMAP-R 数据做 GNSS 干扰相关研究。

CYGNSS 与 SMAP-R 体现了一个有意思的产业生态特征——这些原本“无意做干扰监测”的科学卫星，反而提供了最长时间序列、最广地域覆盖、最公开可访问的全球 GNSS 干扰数据。商业公司拿到具体干扰源的“高精度个体定位”是它们的强项，但要回答“过去十年全球 GNSS 干扰活动如何演化、哪些地区在什么时期出现了什么样的变化”这类长程态势问题，民用科学卫星反而拥有不可替代的优势。从这个意义上说，“专业 SIGINT 卫星+民用科学卫星副产品”形成了一种天然互补的“双层观测网络”，前者专注实时性、精度，后者专注历史性、连续性。

三、典型应用案例

（一）俄乌冲突中的 GNSS 干扰监测

1. 冲突爆发预警

俄乌冲突是天基 GNSS 干扰监测能力从“实验室演示”走向“地缘情报标配”的标志性事件。最早的天基探测时间线，比 2022 年 2 月 24 日俄罗斯启动“特别军事行动”提前了三个月。HawkEye 360 在 2021 年 11 月就开始在乌克兰东部卢甘斯克与顿涅茨克与亲俄武装的接壤地区监测到大量 GPS 干扰活动，并通过公开数据证实该地区的无人机作战受到了干扰影响。HawkEye 360 当时已将这一信号识别为“值得持续监测的有用信号”，并在东欧地区持续累积数据。

2022 年 2 月下旬冲突爆发前夕，HawkEye 360 在乌克兰与白俄罗斯边境、切尔诺贝利以北探测到 GPS 干扰活动，这一发现被公司公开为“俄军把电子战战术整合进作战行动以削弱乌克兰自卫能力”的证据。同年 3 月 4 日，公司发布《乌克兰 GPS 干扰检测》正式报告，把过去四个月的数据系统化对外披露，这是商业天基 RF 监测首次以“商业产品”形态进入冲突舆论场。

2. 冲突中的广域态势感知

随着冲突持续，多个独立的天基观测系统从各自角度勾勒出俄乌战区的 GNSS 干扰演化图谱。Spire Global 与 UT Austin 无线电导航实验室联合团队于 2022 年 4 月在东地中海双星采集中识别出跨叙利亚、土耳其、伊拉克、乌克兰、以色列五国的 30 余个干扰源。这次采集同时表明，俄乌冲突的电子战外溢已经波及到周边整个东地中海地区，而不只在

乌克兰境内。

到 2024 年底，NASA CYGNSS 星座在乌克兰顿涅茨克州中心上方完成一次定位。这一探测恰好与同期顿涅茨克州军事行动加剧时间吻合，给出了天基系统“实时印证地面冲突烈度变化”的硬数据。同期 CYGNSS 还在俄罗斯与白俄罗斯境内完成了类似探测。

NASA SMAP-R 全极化反射仪提供了最完整的时间序列证据：2021 年俄乌战区 GPS 噪声极低；2022 年随冲突爆发陡升；到 2023-2024 年覆盖范围已扩展到乌克兰全境、俄罗斯西部、白俄罗斯；2024 年的 $\bar{S}_3 > 0.75$ 阈值地图清晰勾勒出俄乌战区干扰源的几何分布。从 2016 年（基线）到 2024 年（满干扰）的对比图，是迄今为止 GNSS 干扰天基长程态势研究中最直观的“四年间从平静到沸腾”的证据链。这一研究还被美国陆军战争学院战略研究所引用。

3. 战场作战影响

俄乌战场的实际作战中，导航干扰已经从“单一频点压制”升级到“多系统频谱动态博弈”。中国学者苏珂等通过分析 IGS 监测站数据指出，俄乌双方在导航对抗领域的应用场景与战术应用方式持续扩展，导航定位性能与干扰模式直接相关——双方依托新技术不断扩展应用场景，从单一频点干扰演化为多系统多频段的动态博弈。魏蒸的分析则指出，美军在战场上利用 HawkEye 360、Unseenlabs 等公司的信号

情报（SIGINT）卫星进行战场无线电测向、信号特征分析和通信破译，并将干扰源溯源信息传递给乌军用于定点伏击。

HawkEye 360 的 RF 监测能力还被用于“非直接战斗”应用，通过监测船载 AIS 发射机的 RF 特征，追踪受制裁俄罗斯寡头的游艇，以及被记录为“逃避制裁的货船”的暗船，这帮助北约对俄实施金融与法律层面的制裁。

（二）中东地区的 GPS 欺骗事件

1. 叙利亚 Khmeimim 持续干扰

中东作为 GNSS 干扰天基监测的“经典战场”，其历史比俄乌冲突还要更早。从 2017 年起，叙利亚沿海赫梅米姆（Khmeimim）俄军空军基地一带就持续存在 GNSS 干扰活动——UT Austin 团队通过国际空间站上的 FOTON 接收机，2018 年首次在公开文献中定位出该处一台 100 瓦 EIRP 干扰器。

这一干扰活动随后持续多年。2022 年 4 月 Spire 与 UT Austin 双星采集中，针对 Khmeimim 同一位置的定位被进一步精细化——95%误差椭圆半长轴仅 7 米、半短轴仅 5 米。从 2017 年的 220 米精度到 2022 年的米级精度，反映了五年间天基监测技术的快速演进。

2. 以色列-加沙冲突期间的“圆圈式欺骗”

2023 年 10 月 7 日以色列-哈马斯冲突爆发后，中东 GNSS

干扰模式从“区域压制”演化为“主动欺骗”。多家媒体此后陆续报道：以色列军方使用大范围 GPS 欺骗来诱骗黎巴嫩真主党与哈马斯无人机偏离预定轨迹，但同时也波及了民航、商船等大量民用用户。这种欺骗的典型模式是“圆圈式欺骗”：受害飞机的 ADS-B 报告位置呈现规律性圆形轨迹，速度异常低（民航机正常飞行 100+节，但被欺骗后报告约 60 节），与真实飞行轨迹完全不符。

天基监测系统对这一模式的捕捉非常精细。SMAP-R 在 2024 年针对土耳其-叙利亚边境冲突区的扫描中，地图还显示了几个落在特拉维夫的定位点，明确凸显了以色列-加沙冲突的电子战痕迹。这与 2024 年 7 月报道形成了双向印证。NYU 研究团队还在 2024 年 ION 大会上首次完整演示了“LEO 单星单次过顶 GNSS 欺骗器地理定位”，把欺骗源的频率分量从接收机内部估计的“虚假钟漂时序”里反向提取出来，实现< 50 米精度的位置反演。

中东已经成为全球 GNSS 干扰/欺骗最复杂的地区。“圆圈式欺骗”从波罗的海蔓延到地中海，这种从战场单一节点扩散到整个地缘的过程，可以类比为“电磁雾霾”，干扰器最初是为战术目的部署，但其影响外溢的范围远超部署方的本意。

（三）波罗的海与欧洲民航 GPS 异常

2024 年 1 月，多家媒体开始密集报道波罗的海区域的

GPS 干扰激增。波罗的海三国（爱沙尼亚、拉脱维亚、立陶宛）、芬兰、瑞典、波兰、德国北部、丹麦等国上空的民航飞行普遍受到影响。俄罗斯加里宁格勒（Kalininingrad）飞地被广泛认为是主要干扰源之一。

Aireon 作为全球天基 ADS-B 接收服务提供商，通过其每日数十亿条 ADS-B 报文的数据集，开发出多种 GPS 异常分析方法，能在不依赖飞机 GPS 报告的前提下，独立验证 GPS 异常事件并把它们映射到 H3 六边形网格上做地理空间聚类。

值得指出的是，2025 年 1 月 22-25 日美国博伊西（Boise, Idaho）附近也出现了显著 GPS 干扰。但这一次是美国军方主动开展的“干扰能力测试”，事先通过美国海岸警卫队航行通告中心发布通告。盐湖城飞行情报区的 ADS-B 异常计数在该期间一度上升至基线水平的 13 倍后迅速回落。这与波罗的海或中东那种“对抗性干扰”完全不同，但它证明了天基 ADS-B 数据在区分“测试性干扰”与“对抗性干扰”上的能力——前者特征是“准时开始、准时结束、提前公告”，后者则是“持续性、无公告、波及大范围民航”。

四、发展趋势分析

当前国外天基导航干扰监测呈现出以下趋势。

（一）从单星座到天地一体多源协同

单一系统观测的局限性已经明显。任何单一卫星星座都

不能在所有维度上同时占优——HawkEye 在定位精度上领先，但更新率受限于星座规模；Spire 在覆盖度上领先，但单星 Doppler 对欺骗目标的能力受限；CYGNSS 与 SMAP-R 提供历史长程数据，但实时性较差；Aireon ADS-B 提供受影响区域的“间接证据”，但不直接定位干扰源。各家都把自己长项当作产品卖点，但用户的真实需求是“全维度态势感知”。

天地一体的产业生态正在加速形成。

HawkEye 360 收购了 Maxar 的部分商业遥感数据运营权，把光学影像与 RF 信号交叉验证，并与机载 ADS-B（如 Aireon、波音）建立合作关系，把空-地-海-天 RF 信号多源融合作为公司战略方向之一。

Spire Global 在“太空侦察”产品组合中明确把“触发第三方卫星影像视觉验证”作为产品能力之一，即一旦 Spire 卫星探测到地面 RF 异常，立即“提示并队列”光学卫星过顶拍照确认。

Aireon 把自家天基 ADS-B 数据明确定位为“提示与队列其他更耗资源的传感器网络”的工具，意味着 Aireon 自己定位于“低耗触发器”角色，把后续高精度处理留给合作伙伴。

美国空军研究实验室（AFRL）已经把 HawkEye 360 等商业 RF 数据纳入“混合卫星 ISR 架构”试验，与传统军用卫星之外构建一层商业卫星组成的、对盟友可分享的非密级

数据层。

民用科学卫星与商业 SIGINT 的协同也在加深。例如 Spire 与 CYGNSS 都基于 GNSS-R 反射测量原理但分别面向商业与科学市场；UT Austin 实验室与 Spire 的多年合作产出了多篇关于 LEO 单星与双星定位的公开论文；SMAP-R 的研究成果被美国陆军战争学院战略研究所引用。这些案例说明，“商业-学术-军政”三方的边界正在被持续模糊。从产业角度看，单家公司不再追求“什么都自己做”，而是在自己优势环节扎根，向上下游开放接口。

（二）从星上采、地面算到星上 AI 筛选

第一代体系普遍是“星上采、地面算”。HawkEye 360 早期使用 SDR 把宽带数据采集后下传地面 GPU 做相干积分；Spire STRATOS 把 60 秒原始 IF 数据存储到星上、然后下传地面用 UT Austin 的 GRID 软件接收机做精细分析；MOGSI-LISA 计划中同样把“星上检测、原始 I/Q 储存、地面定位处理”作为标准架构。这一模式的优势是地面端算力充裕、算法可灵活更新；但弱点也很明显——下行带宽成为瓶颈，星上储存空间限制了观测时段，数据从采集到可用情报的端到端延迟在数小时到数十小时量级。

第二代体系正在普及“星上 AI 筛选”。

HawkEye 360 自 2025 年 7 月升级 GNSS-I 产品套件以来，明确在星载 SDR 上做更多过滤、平衡和元数据提取工作，“以

减少星间和下行的数据量”——星载 FPGA 完成基础信号处理，盲相干累积等算力密集型工作交给地面 GPU。

Spire 在 2025 年 7 月扩展“太空侦察”组合时承诺，下一代卫星编队将具备“更强的信号采集、星上处理与下行性能”。

这一趋势的关键技术含义在于星载 AI 不是替换地面算法，而是充当“智能哨兵”——星载系统在原始数据流中识别“哪些时段值得重点保留、哪些可以丢弃”，从而把宝贵的下行带宽留给真正有情报价值的片段。这与“无人机视频实时人工智能分析、只回传关键帧”的逻辑同源。

（三）从原始数据到可行动情报

早期阶段为原始数据租赁模式。Spire 在 2021 年与 UT Austin 合作时，给客户的服务还是“原始 IF/IQ 数据收集与传送”；客户拿到原始数据后自己做后处理。这种原始数据租赁模式较适合学术机构和高级别政府客户使用，但对军队用户对此缺乏兴趣。

后续演变为定位结果交付。各公司开始提供“经过处理的定位结果与误差椭圆”。HawkEye 360 的 GNSS-I 产品提供“精确干扰源定位+干扰类型分类+误差椭圆+信号特征”。Spire 的 RF Geolocation Services 直接交付分析报告，客户不必再处理原始数据。这是从“信号情报数据商”向“分析结论提供商”的角色转变。

当前已经开始出现实时态势告警与多产品集成。新的产品形态正在涌现：

持续监控订阅：HawkEye 360 的“区域感知订阅(RAS)”以“地中海、南海、朝鲜半岛”等关键区域为单位提供日级 RF 信号采集服务，2021 年 10 月起在地中海开始日常运营。客户不需要单次任务式下单，而是订阅“区域监测日常推送”。

告警与第三方触发集成：Spire 的“太空侦察”把“信号活动提示与队列告警”作为独立产品，一旦满足触发条件，自动向客户的 ISR 系统、第三方光学成像或其他后续传感器发出任务请求。

行业垂直应用产品：Spire 列出了“国防与情报”“航空”“海事安全”“搜救”“物流与供应链”“环境监测”“保险与合规”“频谱执法”八大垂直行业的产品形态，意味着 RF 情报已经从“军用专属”扩散到民用合规、保险理赔、供应链运营等多行业用途。

数据主权部署：Spire 与 Unseenlabs 都明确把“主权部署”作为产品差异化能力，客户可以选择把数据控制权完全留在本国境内，规避美方云依赖。

API+仪表盘+数据库直连：Spire 提供 API、仪表盘、直连数据库、自定义管道四种数据交付方式；HawkEye 与 Spire 都向客户开放编程接口，让客户下游系统能直接调用 RF 情报。

原始数据仍然是基础，但随着产业成熟，基于数据的告警系统、第三方系统触发、垂直行业适配、主权部署、API接口等“客户工作流嵌入”能力，正成为新一轮竞争的核心。