

卫星导航与人工智能融合

动态简报

(2026年第1期, 总第10期)

2026年1月28日

主办单位: 导航与时空技术国家级重点实验室

1. Oscilloquartz网站发布文章《复杂环境下确保PNT (定位、授时和导航)可靠性的多层次保护方法》。

2026年1月14日, Oscilloquartz在其官网发布文章, 提出复杂环境下确保PNT (定位、授时和导航)可靠性的多层次保护方法。文章指出, 现代国防与关键基础设施运营依赖可靠PNT, 而GNSS干扰 (如干扰、欺骗、转发干扰等) 愈发频繁复杂, 单一保护层存在单点故障风险, 会引发连锁反应影响系统同步与关键操作。拥有75余年授时经验的Oscilloquartz公司, 其多层次策略经实际测试验证, 符合美国国土安全部 (DHS) 弹性PNT合规框架及IEEE P1952标准, 通过四层保护形成叠加弹性: 第一层为天线系统前端保护,

用抗干扰天线等减少信号干扰；第二层是GNSS信号监测验证，结合伽利略OSNMA等实时验证信号可信度；第三层通过探测与交叉参考验证检测转发干扰，对比GNSS与独立可信时间源；第四层为系统管理控制与智能，依托网络管理平台及人工智能/机器学习实现集中管控与预警。该方法已在国防、航空等领域部署，未来将持续聚焦网络安全与冗余，助力构建适应复杂环境的PNT架构。

2. iHLS网站发布文章《为什么未来的战场无人机能完全不需要GPS》。

2026年1月14日，iHLS网站发布文章称，现代军用无人机高度依赖卫星导航（如GPS、GNSS）实现定位、地形测绘及支援地面部队，但在信号受干扰、欺骗或不可用的电子战密集环境中，其能力会迅速下降，导致侦察受限、计划延迟并使部队暴露于地雷等未知威胁。为解决此问题，一套新的人工智能（AI）算法应运而生，该算法是“安全专业目标威胁检测（SPOTD）”战场图像分析平台的一部分，该平台可处理无人机采集的视频以识别和测绘小型爆炸威胁，最新升级聚焦提升无人机在无GPS环境下的性能，同时加快整体处理速度。该系统不单纯依赖实时卫星输入，而是通过分析视觉数据生成精确的地形及潜在危险2D和3D模型，几乎所有无人机拍摄的画面均可用于建模，处理可

在边缘端实时进行或通过云基础设施完成，且这些新算法是在乌克兰实战演习后优化的，当时终端用户要求提升在强电子干扰下的性能。在GPS中断时，该AI系统能持续测绘地形、识别爆炸威胁并辅助路线规划，降低地面部队和无人平台风险，可支持传统工具失效环境下的侦察、任务规划及人道主义排障任务。该平台基于大量真实训练数据构建，迄今已分析超220万张无人机图像，在约11400公顷区域识别出超41000个威胁，这些数据支撑计算机视觉模型在导航数据降级时仍能检测目标并生成地图。此外，该系统还有其他运行模式，如快速测绘功能可生成地形模型用于无需自动威胁识别的情报、监视与侦察任务，还能提供详细地形和危险地图辅助无人地面车辆路线规划，近期更新将处理时间缩短了多达10倍，提升了时间敏感行动的响应速度。随着电子战成为现代冲突的关键特征，不依赖卫星导航的工具正从小众解决方案转变为核心能力，此类AI驱动的测绘与威胁检测系统预示着未来无人机及自主平台在传统导航手段失效时仍能有效运作。

3. AsterNav: 利用被动计算实现的自主空中机器人在黑暗中导航 (AsterNav: Autonomous Aerial Robot Navigation In Darkness Using Passive Computation)

2026年1月12日，该论文发表于《IEEE Robotics and

Automation Letters》, 由伍斯特理工学院感知与自主机器人 (PeAR) 小组的Deepak Singh、Shreyas Khobragade和Nitin J.Sanket共同撰写。论文针对灾后搜救等场景中, 小型空中机器人在完全黑暗环境下难以自主导航的问题, 提出了名为AsterNav的自主空中机器人导航系统。该系统无需GPS或运动捕捉等外部设施, 结合红外单目相机、大孔径编码镜头与结构光, 通过深度相关的散焦线索 (结构光点呈现深度相关图案) 为AsterNet深度估计模型提供强先验; AsterNet仅在仿真中用简单光学模型生成数据训练, 无需微调即可直接应用于现实场景, 在NVIDIA Jetson Orin™ Nano上实现20Hz的机载运行, 且对结构光图案变化及发射器与相机相对位置不敏感, 降低构建成本。研究团队在多种现实实验中验证AsterNav, 包括黑暗环境中的哑光障碍物和6.25mm细绳索, 面对未知形状、位置和材质的物体, 整体导航成功率达95.5%, 硬件采用定制PeARCorgi210四旋翼机器人, 搭载特定相机、编码光圈及结构光投影仪, 高阶感知与控制在机载设备完成。此外, 团队还对比了编码光圈与针孔、全开光圈的深度估计性能, 提出简约导航方案 (基于高斯差分、模板匹配), 指出AsterNav是首个基于单目结构光实现四旋翼在绝对黑暗中导航的技术, 未来可结合事件相机等进一步优化, 为黑暗环境搜救等应用提供可能。

4. 面向自动驾驶车辆的基于强化学习的轻量级语言模型在GPS欺骗防御中的应用 (RL-Enabled Lightweight Language Models for GPS Spoofing Defense in Autonomous Vehicles)

2026年1月12日，该论文发表于《IEEE Transactions on Information Forensics and Security》由IEEE高级会员Hassan El Alami与IEEE高级会员Danda B. Rawat共同撰写，均来自美国霍华德大学电气与计算机科学系国防部人工智能与机器学习卓越中心，研究获美国陆军研究实验室资助。论文针对自动驾驶汽车（AV）依赖GPS导航却易受各类GPS欺骗攻击，且现有防御方案存在难以适应新型攻击、依赖浅层特征、扩展性差等问题，提出一种融合轻量化语言模型（LightLMs，含BERT、RoBERTa、DistilBERT、TinyBERT）与强化学习（RL，含Q-Learning、深度Q网络、优势演员-评论员、近端策略优化）的防御框架，以提升GPS欺骗检测与缓解效果。在技术方案上，LightLMs采用“冻结骨干网络+训练适配器（瓶颈维度64）”配置，先通过离线阶段将结构化GPS特征（如载噪比、伪距等）文本化并训练适配器，生成语义丰富的状态嵌入；RL智能体以该嵌入与环境观测融合的状态为输入，学习检测攻击与执行缓解策略。同时，构建Python仿真环境模拟多种欺骗场景（简单型、中间型、

复杂型)，环境包含5辆基于自行车运动学模型的AV，模拟GPS观测值扰动，并设定固定参数确保可复现。实验方面，从检测性能、计算效率、泛化扩展性等维度评估：检测上，LightLM增强的RL模型显著优于基线RL模型，如PPO结合RoBERTa后准确率达98.92%、缓解延迟低至0.29秒，且对复杂攻击检测率优势更明显；计算效率上，TinyBERT相关模型推理时间仅3.1-3.3毫秒、内存占用135MB，适配AV嵌入式硬件；泛化扩展性上，在AV-GPS和TEXBAT数据集上，该框架仍保持高准确率与低延迟，如PPO-RoBERTa在两数据集准确率分别为98.57%、98.11%。此外，与SVM、LSTM等传统机器学习/深度学习模型相比，该框架在准确率、召回率等指标上均更优。论文还指出未来方向，包括将框架扩展至GPS干扰、信号衰减等威胁，整合IMU、相机等其他定位源以在GPS失效时维持有限导航能力。该研究为AV的GPS欺骗防御提供了高效、可扩展的解决方案，对保障AV导航安全具有重要意义。

5. LinkedIn网站发布报告《美国军用GPS设备市场战略指南：机遇、威胁与应采取的行动》。

2026年1月11日，LinkedIn网站发布由Verified Market Reports提供的报告样本《美国军用GPS设备市场战略指南：机遇、威胁与应采取的行动》相关内容显示，2024年美国

军用GPS设备市场规模达45亿美元，预计2026-2033年复合年增长率为5.5%；市场在战术导航、自主车辆集成等细分领域增长强劲，小型化、加固型GPS模块等新兴领域未来五年复合年增长率超8%，同时面临监管合规、与系统互操作性及高集成成本等障碍，还需应对敌方信号干扰与欺骗风险。需求受无人机等自主系统推动，技术上抗干扰、量子抗性加密等突破重塑市场，区域增长集中在东南部等传统区域及太平洋战区等新兴热点。竞争方面，主要防务承包商整合技术，与AI企业合作，行业领导者包括BAE系统、雷神技术等。未来市场有增长潜力，但需关注监管、经济波动等风险，建议企业聚焦模块化平台研发、区域拓展及战略联盟，以把握机遇、降低风险。此外，报告还包含区域分析、细分市场（如按技术、应用、设备类型等）、常见问题解答等内容，提及军用GPS设备与商用设备的差异及潜在非国防应用。

6. LinkedIn网站发布报告《军用GNSS抗干扰系统工业4.0应用现状》。

2026年1月7日，LinkedIn网站发布由Market Wire Insight提供的报告样本《军用GNSS抗干扰系统工业4.0应用现状》显示，2024年军用GNSS抗干扰系统市场规模达12亿美元，预计2033年将增至21.4亿美元，年复合增长率7.5%；工业

4.0技术加速融入该领域，推动实时数据处理、自适应信号韧性等能力提升，自动化、物联网、数字孪生等技术缩短先进抗干扰方案研发部署周期，AI、机器学习等助力开发智能自适应性系统以应对复杂电子攻击，同时行业注重网络安全、数据完整性及互操作性，模块化和软件定义架构受青睐，还采用节能组件与环保制造践行可持续目标。市场主要参与者包括罗克韦尔柯林斯、雷神公司等，企业通过扩产品线、研投、合作并购增强竞争力，采购倾向集成化工业4.0解决方案。市场按产品分有机载、舰载平台，按应用含GPS、GLONASS，区域上亚太增长最快，北美和欧洲市场成熟，拉美及中东非逐步拓展。

7. 美普渡大学将为美国陆军开发无需全球定位系统的空地协同人工智能机器人团队。

InterestingEngineering网站2025年12月26日报道，普渡大学（Purdue University）获得美国陆军作战能力发展司令部陆军研究实验室一份为期五年、150万美元的合作协议资助，将开发无需全球定位系统（GPS）的空地协同人工智能（AI）机器人团队。该项目由普渡大学计算机科学副教授阿尼凯特·贝拉（Aniket Bera）领导，依托该校智能探索与增强系统（IDEAS）实验室开展，聚焦于将无人机与地面无人车辆配对的空地机器人团队，旨在让这些AI驱动的机器

在敌方区域、GPS信号缺失的复杂且不可预测环境中自主完成侦察、测绘和机动任务，减少士兵部署风险，同时提升态势感知能力。项目开发工作多在普渡大学希克斯机器人与自主测试平台（Hicks Robotics and Autonomy Testbed）进行，该平台面积超1.3万平方英尺，配备人形机器人、四足机器人、空中无人机及先进传感器平台，支持从模拟到现实世界的无缝测试。此项目是在陆军此前支持的单智能体在恶劣环境导航研究基础上的拓展，将实现多智能体系统的信息共享、计划协同与规模化协同执行任务，其研发的AI原理还可支持自主侦察、威胁侦察、后勤路线规划和战术监视等多种国防任务，未来团队计划整合自适应学习、开展实地评估并向更大规模机器人网络拓展。

8. Safe Pro公司推出基于GPS的威胁检测和地图绘制算法。

雅虎网站2025年12月22日报道，Safe Pro公司为其专利的Safe Pro目标威胁检测（SPOTD）技术部署了升级的AI算法，以适用于GPS受限环境下的无人机操作，该增强功能将在德克萨斯州胡德堡举行的2026年美国陆军概念聚焦作战人员实验（CFWE）技术演示中重点展示。SPOTD是基于亚马逊云服务（AWS）或边缘计算运行的战场图像快速分析平台，可识别并绘制无人机视频中的地雷、伏击无人机等

小型爆炸威胁，此次升级源于乌克兰实战演习经验，新增功能包括处理任意无人机视频生成2D/3D模型、在GPS/GNSS受限环境运行、支持无人地面车辆路线规划的地形建模、仅快速绘图模式及处理速度提升10倍等，其技术依托超220万张无人机图像、识别41400多个威胁的真实数据集。

9. Waron the Rocks网站发文《追求真正的AI自主性：从传统思维到战场统治》。

2025年12月15日，Waron the Rocks网站发文《追求真正的AI自主性：从传统思维到战场统治》指出，西方军队仍在争论“自主性”定义，而俄中已在研发无需GPS、数据链路甚至指令的设备，若美国不重新理解自主性，其部署的系统或在战场断联时失效，美及其盟友需摒弃传统“自主性”概念，转向真正的AI自主性，系统能在无法依赖GPS、外部数据和人员监督的对抗环境中自主感知、决策和行动，否则恐落后。文中明确真正AI自主性的定义，区别于当前易混淆的术语，强调其无需外部连接；分析了其对国防至关重要的原因，如应对电子战与GPS干扰、解决人员操作手短缺、提升后勤与伤员撤离效率；指出生态系统面临数据稀缺与孤岛、测试设施不足、开源协作有限、监管限制等挑战，认为智能模块化架构是关键，还展望了未来AI自主

性的发展方向，最后呼吁美国防部明确需求、投入基础设施，以推动真正AI自主性发展，获取战场优势并带动经济等领域收益。

10. 美Infleqtion公司宣布获美陆军一份价值200万美元合同，用于开发“边缘定位、导航与授时安全人工智能”。

2025年12月11日，美Infleqtion公司宣布获得美国陆军一份价值200万美元的直接进入第二阶段小型企业创新研究（SBIR）合同，用于开发“边缘定位、导航与授时安全人工智能（SAPIENT）”，该18个月项目将应用其情境机器学习（CML）技术，增强陆军在对抗环境中提供具备韧性的导航与授时数据的能力，此前Infleqtion在xTechScalable AI挑战赛中从133份初始提交中脱颖而出获第一名，为该合同奠定基础，CML技术于2025年3月在NVIDIA GTC上首次推出，能让AI模型从多样化数据源和更长时间范围内学习；SAPIENT结合量子启发的多模态学习技术与玻尔兹曼机模型，可整合多种来源数据（即便部分信号受损或遭故意干扰），并能在紧凑、节能的边缘平台运行，该合同将资助项目至2026年10月完成全系统开发与测试；Infleqtion在量子技术、人工智能和高性能计算交叉领域创新成果丰硕，其CML技术依托NVIDIA的CUDA-Q平台及量子启发算法，已在陆军QuIRC（应用于射频信号处理）等军种项目中初步应

用，此外，该公司已于2025年9月宣布计划通过与Churchill Capital Corp X公司合并上市，业务涵盖量子计算机、精密传感器及量子软件等。

11. Geoweeknews网站发布文章《SandboxAQ公司与磁导航的承诺》。

2025年12月5日，Geoweeknews网站发布文章介绍美国SandboxAQ公司的“MagNav”磁导航系统。该系统作为不依赖卫星的替代定位、导航与授时（Alt-PNT）方案，借鉴迁徙物种利用地磁场导航的原理，结合量子传感器与人工智能，检测地球地壳磁场特征中细微的特定位置变化，将地质信息转化为全球定位参考层，可全天候、在各类地形（含水下）工作，不受干扰、欺骗，且不发射可被追踪的信号。文章提及GPS干扰问题严峻，2021年8月至2024年6月国际航空运输协会记录超58万起干扰事件，2024年相关事件激增，干扰影响军民用领域，日损失超10亿美元。MagNav可补充现有导航系统，还能作主要导航源，满足航空行业所需导航性能（RNP）标准；还能提升地理空间表征，每趟导航飞行可高精度采集地磁数据，助力地磁图优化。SandboxAQ自2022年测试该系统，2023年与美空军完成首飞，2024年7月验证其作为实时主要导航源的能力，2025年公布与空客Acubed的全国性测试结果，150多飞行小时、4.4万公

里测试中，该系统100%时间达RNP2精度，95%达RNP1，64%达RNP0.3，展现出实际应用可行性。

12. 印度空间研究组织主席明确欢迎在导航技术等领域引入并强化私营企业参与。

Times of India网站2025年11月26日报道，印度空间研究组织（ISRO）主席V·纳拉亚南在喀拉拉邦特里凡得琅出席活动并发表讲话，明确欢迎私营企业参与空间任务和国防用途的导航系统研发，以减轻对高成本进口设备的依赖。他在向媒体说明时强调，导航系统属高度复杂且关键的技术领域，仅依靠ISRO自身力量难以全面覆盖，因此需要通过引入工业界力量来共同承担研发与工程化任务。纳拉亚南将这一方向界定为国家层面推进自主可控、降低长期成本、完善航天与防务关键分系统供应链的重要举措。纳拉亚南是在为一家私营企业新建的“导航卓越中心”揭牌后作上述表态的，该中心由总部位于海得拉巴的Ananth Technologies设立，落地于特里凡得琅的Kinfra Inforpark园区。该中心定位于本土化研发和制造先进惯性传感器与量子传感器，并开发面向多源导航的人工智能融合算法，结合全球卫星导航系统（GNSS）、惯性导航系统（INS）、视觉与雷达等多种手段，支撑复杂环境下的高可靠导航能力。同时，中心还计划推进军民融合应用，并与ISRO、国防研

究与发展组织（DRDO）以及国内一流高校开展联合科研和人才培养合作，形成面向航天与防务任务的技术与人才集群。

13. 美国陆军选定Tern公司的人工智能驱动独立推导定位系统用于2026年作战部队验证。

GPS World网站2025年11月21日报道，Tern公司宣布，其研发的人工智能驱动独立推导定位系统（IDPS）在美国陆军xTechOverwatch无人系统竞赛中获胜。Tern公司从超过600家参赛企业中脱颖而出，经过2025年10月27日至29日在德克萨斯州布莱恩市布什作战发展综合体进行的士兵实际操作测试后被选中。Tern将在2026年将IDPS直接集成到陆军“接触转型”编队中，由现役部队在作战场景中持续验证该系统。IDPS的核心能力是在无卫星信号条件下提供不间断、高精度导航。该系统经美国交通部测试验证，能够在无任何卫星输入的情况下，在超过180英里的连续距离内保持±4米的定位精度，并在实际冲突区域的GPS欺骗攻击环境中表现完美；设计针对GPS失效的典型环境，包括隧道、密集城市峡谷、偏远地形和GPS拒止区域；已在多个战术平台上完成测试，覆盖公路和越野环境，包括活跃冲突区域。IDPS的技术架构基于三个核心组件的融合。第一，系统使用预加载的基础地图数据，建立对前方道路的结构化认知，

使其能够在卫星信号无法覆盖的区域保持逻辑路径跟踪。第二，系统利用现代车辆现有传感器的输出，无需额外昂贵硬件如低地球轨道卫星或地面信标，计算和处理负载较低，可作为硬件或软件解决方案部署。第三，系统采用专有人工智能引擎，将地图数据与传感器输入融合为实时位置信息，其自适应加权算法实时测量、解释和重新校准车辆传感器数据，并与基础地图进行比对以提高精度。系统具有持续自我修正能力，通过预测、确认和精炼车辆位置，从每次移动中学习以保持精确定位。系统可独立运行，也可配置为位置管理器并与广泛使用的导航应用程序集成。

14. Skyline Nav AI公司的无GPS导航软件面向军事和国防应用领域。

Milivox网站2025年10月27日报道，Skyline Nav AI公司推出面向军事和国防应用的无GPS导航软件。该软件原设计用于商业和自动驾驶汽车领域，现凭借计算机视觉与人工智能，通过对比实时摄像头画面与高分辨率3D地图或卫星图像（如Maxar、Planet Labs数据）确定位置，理想条件下精度达分米级，可在GNSS信号受扰（如俄乌冲突中的干扰、南海的欺骗）或无信号（城市峡谷、地下等）环境使用，为军事车辆、无人机、徒步部队等提供PNT保障，还支持特种部队隐蔽任务。其为纯软件，可部署于现有带光学传感

器和计算能力的硬件，能离线运行，相比INS（易漂移）、eLORAN等（需基础设施）有被动传感、无信号依赖等优势，但受地图可用性限制，不过已与商业卫星提供商合作缓解。美国国防部通过相关项目表达兴趣，目前已有早期评估

15. 应用深度学习方法与可解释人工智能技术检测无人机GPS欺骗（Applying Deep Learning Approach for GPS Spoofing Detection of UAV with Explainable AI）

2025年9月，该论文在“2025年AIAA DATC/IEEE第44届数字航空电子系统会议（DASC）”上发表。论文聚焦无人机（UAV）GPS欺骗检测难题，提出融合可解释AI（XAI）的CNN-BiLSTM混合深度学习模型，旨在解决传统检测方法精度低、分类粗、缺解释性等问题。研究背景方面，无人机在航拍、农业、救援等领域应用广泛，但易受GPS欺骗攻击——攻击者通过虚假信号误导无人机获取错误定位、导航与授时（PNT）信息，可能导致无人机偏航、坠毁或被恶意利用。2011年伊朗捕获美军RQ-170无人机、2024年日均1500架航班受欺骗影响等案例，以及低成本软件无线电（如HackRF）的普及，凸显威胁严重性。GPS欺骗攻击分为简单型（高功率噪声干扰，易检测）、中间型（模拟真实信号伪装多径干扰，需多天线监测）、复杂型（用载波相位同步设备欺骗多天线接收机，难检测）三类。传统检

测方法如子空间投影、天线阵列等存在计算效率低、依赖额外硬件等局限，普通机器学习模型也难以处理GPS信号的非线性与高维特征，且缺乏细分类能力。研究方法上，首先构建数据集，包含8通道GPS接收机与USRP软件无线电捕获的真实信号（覆盖静态/移动场景，提取13个特征），以及模拟的三类欺骗信号；预处理阶段用MinMaxScaler标准化特征，SMOTE技术解决数据不平衡（原始数据约30万真实样本、10万欺骗样本，处理后各类样本均达40万）。接着设计CNN-BiLSTM模型，通过2层1D卷积层（64个滤波器、核大小3、ReLU激活）提取空间局部特征，BiLSTM层（64个隐藏单元）捕捉时序依赖关系，最终经全连接层与Softmax激活将信号分为“真实”“简单欺骗”“中间欺骗”“复杂欺骗”四类，模型采用Adam优化器（学习率0.001）、交叉熵损失函数，训练15轮，批次大小32。同时引入SHAP技术，基于博弈论计算特征重要性得分，提升模型可解释性。实验结果显示，CNN-BiLSTM整体精度达97.87%，超SVM-CNN（97.81%）、CNN（97.79%）、GRU（97.84%）等模型，对各类信号F1值均超96%，复杂欺骗F1值超99%；传统机器学习模型中随机森林精度最高（94.27%），远低于该模型。SHAP分析发现，Feature_9对复杂欺骗分类至关重要，Feature_1、Feature_2对中间欺骗识别影响显著，为特征优化提供依据。研究意义在于首次实现GPS欺骗“四类

细分类”，结合SHAP解决深度学习“黑箱”问题，为无人机GPS安全提供高效可信方案。未来将推进模型实时部署、融合多传感器数据、研究欺骗缓解策略，并扩展检测范围至GLONASS、北斗等其他GNSS系统。

16. 赛峰推出人工智能工具，旨在实现GNSS仿真的自动化。

GPS World网站2025年9月12日报道，赛峰电子与防务公司（Safran Electronics & Defense）发布了一款名为Skydel AI的创新工具，该工具利用人工智能技术，旨在实现全球导航卫星系统（GNSS）仿真场景设置的自动化与简化。Skydel AI通过其智能自动化功能和直观的用户界面，显著优化了GNSS仿真场景的创建流程。用户可通过自然语言下达指令，查询GNSS相关主题、请求技术支持，并动态配置仿真参数。该系统随后会自动生成可供Skydel仿真引擎使用的Python代码，从而消除了传统设置的复杂性，并大幅缩短了准备时间。据赛峰PNT项目总监Pierre-Marie Leveel介绍，该技术将帮助客户加速手动场景调试，缩短在Skydel内的冗长测试周期，从而显著改善开发流程。此外，赛峰公司还发布了一款由人工智能驱动的对流层模型，进一步增强了其仿真能力。该模型集成了Open-Meteo API，利用实时天气数据和人工智能预测，提升了对流层湿延迟的仿真精度。

其神经网络基于来自221个GNSS站点的1400万个样本训练而成，可将仿真精度提升高达88%。此模型将在未来的Skydel版本中提供。

17. GPS World网站刊载文章《空间人工智能革命：迈入智能时代》。

2025年9月8日，GPS World网站刊载文章《空间人工智能革命：迈入智能时代》，精准地捕捉了从“信息时代”向“智能时代”演进的核心驱动力——空间人工智能（Spatial AI）。文章开篇即指出，当前全球数据量已远超人类认知和现有系统的处理极限，造成了“信息过载”的瓶颈。作者通过回顾“科罗娜”卫星图像从耗时17天的人工拼接到KH-11卫星数小时数字处理的革命性转变，生动地类比了我们正在经历的相似技术飞跃，即AI正成为解决数据困境、开启新时代的关键。文章的核心在于对“空间人工智能”的阐述。它被定义为一种能理解空间与时间维度的演进式AI，能够通过迭代学习、自然语言交互及自主代理，从海量信息中发掘深层模式与洞见。为具象化其颠覆性潜力，作者构建了一个详尽的未来医疗场景：神经外科医生借助空间AI助理“SAIMA”和机器人“ROSA”，实现了从三维诊断、智能规划到高精度人机协同手术的全流程。这个案例有力地证明了空间AI不仅是技术构想，更是作为

增强人类专家能力的“超级工具”，将彻底改变专业领域的工作范式。最后，文章发出明确的呼吁。作者将空间AI的崛起视作与互联网同等级别的突破性创新，它正在开启一个充满机遇的技术裂变时期。面对这场不可逆转的变革，文章敦促各行业专业人士应积极学习空间AI、GeoAI及其相关的AR/VR等技术，主动在新兴领域中探索专业定位，从而在即将到来的智能时代中占据领先优势。

18. Dimetor与SkAI合作，开发覆盖全空域的GNSS中断监控服务。

UNMANNED AIRSPACE网站2025年8月27日报道，Dimetor公司与SkAI数据服务公司宣布建立战略合作伙伴关系，旨在共同开发一套全新的空域监控解决方案，以应对日益严峻的全球导航卫星系统（GNSS）中断威胁。此次合作旨在整合双方的技术优势，为全球的载人与无人驾驶飞行器及其他关键领域用户提供覆盖低空至高空的全面GNSS健康状况监测。本次合作将整合SkAI公司基于广播式自动相关监视（ADS-B）开发的GPS威胁感知平台“GPSwise”，以及Dimetor公司的人工智能驱动平台“NAV Sentry”。前者已广泛应用于航空公司与空中导航服务商，后者则通过融合多技术层和多数据源来实时检测GNSS中断，保障定位、导航与授时（PNT）数据的安全。通过此次技术集成，将首

次创建一个能够实时、统一展示所有高度、所有类型（载人与无人）飞行器所在空域的GNSS健康状况视图。这一多层次的解决方案将为航空航天、关键通信、空中交通管理（ATM/UTM）、无人机运营、国防及情报等多个领域的决策者提供可操作的实时情报，显著提升导航安全与态势感知能力。

19. 英国AI视觉导航技术取得突破，旨在克服GPS信号拒止挑战。

Interesting Engineering网站2025年8月21日报道，英国萨里大学的研究团队近日发布了一款名为“姿态增强地理定位”（PEng）的新型人工智能导航工具。该系统旨在解决全球定位系统（GPS）在城市峡谷、隧道或信号受扰区域中普遍存在的覆盖不可靠问题。在测试中，PEng系统展现出卓越的性能，成功将定位误差从734米大幅降低至22米，为在GPS拒止环境下实现高精度导航提供了可行的解决方案。与传统依赖卫星信号的导航方式不同，PEng系统通过融合卫星图像与地面街景图像进行定位，完全不依赖GPS信号。其核心技术利用常见的单目摄像头，通过两步流程实现精确定位：首先在街道层面初步确定大致位置，随后运用相对姿态估算技术精确计算出设备的方向与具体坐标。这种技术方案不仅成本效益高，且易于集成在现有车辆及自主

平台中。对于军事和航天领域而言，该技术的意义尤为重大。PEng作为一种不依赖GPS的弹性导航备选方案，能够显著提升军事平台在严苛或对抗环境下的生存能力与任务执行的可靠性。它为下一代自主系统在不可预测场景中的精准导航与操作奠定了技术基础。目前，这项研究成果已在《IEEE机器人与自动化快报》上发表，其核心代码也已开源，以鼓励全球开发者共同推动该技术的发展。萨里大学的研究团队正致力于开发可用于真实世界测试的工作原型机，标志着该技术正从理论研究迈向实际应用阶段。

20. Inside GNSS网站刊载文章《INDALOS方法：通过基于人工智能的多层监测系统增强全球导航卫星系统的韧性》。

2025年8月18日，Inside GNSS网站刊载文章《INDALOS方法：通过基于人工智能的多层监测系统增强全球导航卫星系统的韧性》。详细介绍并论证了由IGASPIN公司开发的INDALOS方法，这是一种基于人工智能（AI）的多层次监控系统，旨在增强全球导航卫星系统（GNSS）的韧性。文章将现有的GNSS防护策略归纳为“保护”（Protection）、“增强”（Augmentation）和“加固”（Toughening）三大支柱，并分析了各自的优缺点。文章的核心论点是，尽管“增强”（如OSNMA认证）和“加固”

（如CRPA天线）等策略至关重要，但它们存在被高级攻击绕过或成本过高难以普及的局限性。因此，作者主张应将“保护”策略，特别是基于智能监控、检测、分类和定位的防护体系，作为GNSS防御策略的基石。这种策略能够为从关键基础设施到普通消费级设备在内的所有用户提供最广泛的保障。为实现这一目标，文章详细阐述了INDALOS系统的架构与功能。该系统通过部署一个由静态、流动、城市、无人机、星载等多种类型传感器节点组成的分布式网络，对GNSS信号环境进行全方位、全频谱的实时监控。所有节点收集的数据被传输至一个AI驱动的中央服务器进行处理。该服务器利用基于数据流、接收机和通道的14种以上高级检测算法，并结合一个基于确定性的AI融合模型进行决策，能够有效识别干扰类型（如欺骗、干扰、多径等），精确定位干扰源，同时显著降低误报率。实验结果表明，该系统能成功识别欺骗了先进接收机的复杂攻击，并通过增加传感器数量提高定位精度。

21. 欧洲推出人工智能增强型海上定位系统——NEURONAV。

InsideGNSS网站2025年8月15日消息，由罗马尼亚InSpace Engineering（RISE）与海洋水文局（MHD）合作开发，并由欧空局NAVISP Element 2项目资助的NEURONAV

系统，是一款先进的人工智能增强型海上定位系统，旨在改善复杂条件下全球导航卫星系统（GNSS）数据的准确性。该系统基于先前欧空局项目中在黑海、爱琴海和多瑙河收集的大量数据开发而成，核心是一个机器学习模型，具体为卷积神经网络（CNN），通过训练可预测并校正多路径效应导致的位置误差。其工作流程为：先收集卫星方位、仰角、载噪比（C/N0）和伪距残差等GNSS衍生参数，将其转换为笛卡尔误差空间表示作为CNN的输入矩阵，再通过卷积层、最大池化层和全连接回归层处理，预测X、Y、Z坐标的位置校正值。硬件方面，该系统集成了Septentrio mosaic-X5多星座、多频率GNSS接收机和用于AI计算的Jetson Nano单板计算机，能自动进行数据采集、处理和存储，无需人工干预即可持续进行模型训练和验证。在黑海利用MHD水文船进行的测试显示，即便在强射频干扰下（该区域自乌克兰冲突以来GNSS干扰和欺骗事件增多），系统仍有显著精度提升。例如，在一次验证运行中，平均位置误差从原始接收机输出的1.507米降至经NEURONAV校正后的1.268米，95百分位误差较未校正的GNSS数据改善超25%。该系统可增强现有GNSS接收机性能，且能本地处理数据以保障安全性和韧性，对专业和休闲海事领域用户均有潜在价值，未来将致力于提升在严重干扰下的性能、扩大数据集并整合更多导航传感器以增强稳健性。

22. 埃及研究团队在期刊《Neural Computing and Applications》发表论文《提升航空安全性与效率：应用人工智能（AI）解决导航挑战》。

2025年8月12日，埃及研究团队在期刊《Neural Computing and Applications》发表论文《提升航空安全性与效率：应用人工智能（AI）解决导航挑战》，针对航空导航系统中ADS-B系统的安全漏洞提出基于AI的飞行轨迹预测框架（AFTPF）。ADS-B系统因未加密广播特性易受干扰攻击、消息劫持和GNSS欺骗等威胁，而传统预测方法在动态空域中难以应对信号噪声和突发计划变更。AFTPF采用混合深度学习架构，融合门控循环单元（GRU）与支持向量机（SVM）。GRU捕捉飞行参数的时序依赖关系，SVM进行异常分类检测。框架基于OpenSky网络的25000条ADS-B记录，涵盖位置、速度、高度等关键参数，通过线性插值和Min-Max标准化完成数据预处理。实验显示AFTPF异常检测准确率达94%，超越现有方法（89%-92%），误报率仅0.5%，远低于其他方法的1-2%。结合单类SVM和ARIMA模型，系统检测出1,275个速度异常。DBSCAN聚类分析表明异常数据分布分散，反映航空异常行为的多样性。特征分析发现垂直速率与异常相关性最高（0.177），触发警报的航班多表现为低速度、窄航向范围和高运行高

度。框架优势在于高可扩展性和实时集成能力，通过网格搜索优化GRU参数（64个隐藏单元、10个时间步长）和SVM参数（RBF核，C=10，gamma=0.01）。创新之处在于将时序建模与异常分类有机结合，弥补传统方法在实时性和弱信号处理方面的不足。研究局限性包括：仅基于历史数据未评估实时运行性能；高密度空域中航迹相似时识别精度待提升。未来方向涵盖：在真实空管系统中进行实时验证、探索CARU等先进时序模型处理长期依赖、采用自适应密度聚类算法（OPTICS/HDBSCAN）提升模式识别，以及整合多源数据增强轨迹区分能力。

23. 美国芝加哥大学新闻网站刊载文章《量子技术如何助力飞行员更安全地导航》。

2025年8月11日，美国芝加哥大学新闻网站刊载文章《量子技术如何助力飞行员更安全地导航》，深入探讨了量子技术如何为面临GPS信号干扰与欺骗风险的航空导航提供更安全的替代方案。文章指出，量子传感技术为解决这一难题提供了不依赖卫星信号的全新路径。文章重点介绍了两种核心的量子导航技术：①量子惯性导航系统：该技术利用极度灵敏的量子加速度计和陀螺仪，通过精确测量飞行器从已知起点开始的速度和方向变化来推算当前位置。其精度可达飞米（femtometer）级别，远超传统惯性导航系

统。②地磁匹配导航（MagNav）：此技术通过机载量子磁力计实时感测地球地壳磁场的细微波动，并将其与预先绘制的高精度地磁图进行比对，从而实现精确定位。这类似于某些鸟类利用地磁场进行迁徙导航的原理。芝加哥量子交易所（CQE）是推动该技术发展的核心枢纽，联合了顶尖高校、国家实验室和企业。文中提到了多家在该领域取得突破的公司，如Infleqtion、SandboxAQ和AOSense，以及航空巨头波音公司。例如，波音在2024年成功完成了一次整合了SandboxAQ的地磁导航系统和AOSense的惯性导航系统的飞行测试，验证了多量子系统协同工作的可行性。Infleqtion则在英国完成了商业飞行试验，并开发了AI工具以融合多传感器数据，提升导航信号的稳健性。文章认为，量子导航技术是克服GPS脆弱性的一个革命性工具，它不仅能大幅提升现有导航系统的性能，更代表了一种全新的导航思路。随着全球地缘政治冲突加剧，电子战手段日益普遍，对这种不依赖GPS的弹性导航技术的需求只会与日俱增。行业内的多次成功测试已经证实了该技术在真实环境中进行实时导航的可行性，预示着其巨大的应用潜力与商业价值。

24. SandboxAQ与空客成功测试AI量子磁导航系统。

量子计算报告网站2025年7月16日报道，SandboxAQ与

空客（Airbus）旗下的硅谷创新中心Acubed联合宣布，双方合作研发的人工智能磁导航系统（AQNav）已成功完成全国范围的飞行测试，验证了其不依赖卫星信号的精准定位能力。该技术旨在应对全球导航卫星系统（GNSS）在军事及民用航空领域中面临的信号中断、干扰和欺骗等日益严峻的挑战。AQNav系统融合了先进的量子磁力计与人工智能技术。其核心工作原理是通过高灵敏度量子传感器实时读取并绘制地球地壳的磁场异常特征，再利用大型量化模型（LQM）精准过滤掉来自飞机本身的电磁干扰，从而在无卫星信号的环境下确定飞行器的精确位置。此次测试在美国大陆不同地形和路线上进行，累计收集了超过150小时的飞行数据。测试结果显示，AQNav系统在充满挑战性的地形上进行的一小时飞行测试中，定位精度优于74米。在超过两小时的持续飞行测试中，其性能表现已超越传统的惯性导航系统（INS），证明了该技术在机场间的航路飞行阶段具备满足商业航空导航需求的潜力。该项目自2022年起便与美国空军合作开发，并于近期成功入选2025年度北约“国防创新加速器”（NATO DIANA）计划，凸显了其在军事和商业航空领域的战略价值。

25. ResearchAndMarkets发布《2025-2034年国防导航展望报告》表示人工智能和量子导航有望彻底改变军事导

航系统。

GlobeNewswire 网站 2025 年 7 月 14 日消息，据《2025-2034 年国防导航市场展望》报告显示，全球国防导航市场 2025 年估值为 2718 亿美元，预计到 2034 年将以 15.7% 的复合年增长率增长至 1 万亿美元。该市场涵盖用于陆、空、海军事应用的先进导航技术、系统和设备，关键组件包括 GPS 接收器、惯性导航系统（INS）和战术导航系统，对部队与车辆引导、飞机导航、导弹制导及态势感知至关重要。市场增长受 GPS 和惯性导航系统进步、对弹性的定位导航授时（PNT）解决方案需求增加及人工智能整合等因素驱动，当前注重提升 GPS 的准确性和抗干扰能力，推动 GPS 与 INS 整合以应对 GPS 受限环境，同时开发量子导航等替代 PNT 技术，且对小型低功耗、防欺骗和抗干扰的导航系统需求上升，未来人工智能与机器学习的整合、多传感器数据融合系统等将成趋势。

26. 欧洲加速无人机 AI 化：聚焦自主导航与目标打击。

防务新闻网站 2025 年 6 月 30 日报道，受乌克兰战场成功经验的启发，欧洲无人机制造商正加速将人工智能（AI）技术融入其产品设计中，特别是在自主导航和目标打击领域。乌克兰在近期一次深入俄罗斯境内的“蛛网”行动中，

便运用了AI技术支持的察打一体无人机。这些无人机通过AI软件进行训练，能够自主识别威胁、规划攻击点，并在与操作员失去联系时独立飞向目标，展现了AI在现代战争中的关键作用。目前，欧洲多家防务公司已在这一领域取得显著进展。在爱沙尼亚近期的无人机峰会上，拉脱维亚的Origin Robotics公司展示了其名为“Blaze”的自主无人机拦截器，该系统经由AI训练，可精确识别并撞击敌方无人机。与此同时，由芬兰帕特里亚公司（Patria）牵头，涵盖瑞典、意大利等六国的欧洲工业联盟，已启动名为“AI-WASP”的项目，旨在为中小型无人与有人平台开发AI控制软件，并已获得欧盟委员会4500万欧元的资金支持。此外，捷克的LPP Holding公司已向乌克兰提供了可在GPS拒止环境下进行视觉导航的MTS无人机，德国的Quantum Systems公司也推出了能利用机器学习进行任务规划与蜂群作战的Mosaic UXS指控平台。尽管AI技术的应用前景广阔，但其在无人系统上的集成仍面临挑战，核心在于训练数据。专家指出，无人机在执行打击任务时，若仅依赖机载数据进行决策，将难以应对瞬息万变的战场环境。为此，乌克兰采取了更灵活的策略：利用战场行动或社交媒体上的开源数据，在小型数据集上训练小型AI模型。这种方法能确保模型在算力有限的小型芯片上快速高效运行，并能被迅速更新和再训练，有效适应了实战需求。乌克兰国防企业也

在同步开发可广泛集成于各类平台的独立AI软件和紧凑型芯片，持续推动该技术的实战化应用。

27. 德国汉堡联邦国防军大学的研究团队在期刊《IEEE Access》上发表论文《当前用于检测GNSS欺骗攻击的机器学习方法的系统性文献综述》。

2025年6月30日，德国汉堡联邦国防军大学的研究团队在期刊《IEEE Access》上发表论文《当前用于检测GNSS欺骗攻击的机器学习方法的系统性文献综述》，针对GNSS欺骗攻击机器学习检测方法的研究空白，采用PRISMA方法论从三大数据库筛选出70篇核心文献，并创新性引入Bell/Whaley欺骗理论框架，按机器学习技术和欺骗方法两个维度分类文献。研究显示，当前检测方法以监督学习（XGBoost、SVM、决策树）和神经网络（CNN、LSTM、GAN）为主，其中XGBoost和自编码器性能最优，准确率达99.95%。欺骗类型方面，研究集中于“模仿型”攻击（通过细微偏差模拟真实信号），而“诱骗型”攻击研究几乎空白。研究揭示三大局限：绝大多数方法仅在仿真环境测试，缺乏真实场景验证；过度依赖GPS系统，对Galileo等其他GNSS系统关注不足；尚无同时检测干扰与欺骗重叠攻击的研究。理论层面，本研究首次将社会科学欺骗理论应用于GNSS技术领域，将攻击从纯技术问题提升至战略意图层

面理解。实践层面，结合Freeman利益相关者理论和EFQM生态系统地图分析了军事、民航、无人机等关键基础设施的安全需求。未来方向包括：开发多攻击类型同步检测方法、应用时序融合变换器等最新深度学习模型、利用真实数据集验证，以及探索跨GNSS系统通用检测框架。

28. 埃及、美国的研究团队在《GPS Solutions》期刊发布论文《在伽利略轨道误差预测中应用人工智能以实现实时离线定位》。

2025年6月13日，埃及、美国的研究团队在《GPS Solutions》期刊发布论文《在伽利略轨道误差预测中应用人工智能以实现实时离线定位》，针对全球导航卫星系统（GNSS）实时定位中的轨道误差难题，提出基于深度学习的离线解决方案。在无移动网络覆盖的偏远地区，接收设备长时间离线无法获取国际GNSS服务（IGS）的超快速轨道文件，传统误差修正方法因此失效。研究团队针对欧洲伽利略系统开发了深度神经网络（DNN）模型预测轨道误差，使用2019年1月至2024年9月近6年数据进行训练。他们比较了DNN、卷积神经网络（CNN）和长短期记忆网络（LSTM RNN）三种架构，输入参数包括广播星历、精密星历、日月位置、太阳辐射指数（F10.7）、地磁扰动指数（Kp）及卫星类型等13个因素。实验显示DNN架构性能最

优：轨道误差的平均绝对误差（MAE）平均降低72.0%，最高达75.4%（E21卫星）；实时定位测试中，位置解算精度的历元级改善最高达0.86米（49.4%），平均改善0.17米（10.7%）。该模型的创新在于通过AI非线性建模处理复杂轨道摄动因素（地球质量分布、太阳辐射压、日月引力、大气阻力及卫星姿态等），避免了传统滤波技术对动力学模型和初始条件的依赖。研究通过WHC1 IGS站点24小时静态观测数据验证了实际应用效果，与在线超快速轨道文件对比，证实了离线AI方法的可行性。该成果为偏远地区GNSS离线实时定位提供实用方案，未来将扩展至GPS、GLONASS和北斗等系统。

29. 克罗地亚研究团队在《Electronics》期刊发布论文《基于小波和机器学习的全球导航卫星系统欺骗检测》。

2025年6月11日，克罗地亚研究团队在《Electronics》期刊发布论文《基于小波和机器学习的全球导航卫星系统欺骗检测》，针对全球导航卫星系统（GNSS）欺骗攻击日益猖獗的威胁，提出了一种将离散小波变换（DWT）与机器学习融合的检测方案。研究源于GNSS系统广泛应用背景下，低成本软件定义无线电设备使恶意攻击门槛显著降低的现实困境。研究采用Daubechies db4和db8小波对GPS和Galileo系统的OAKBAT数据集进行一级分解，提取小波系

数的统计、频谱和纹理特征，并比较了支持向量机（SVM）、k近邻（KNN）和随机森林（RF）三种算法在不同输入类型（原始图像、图像特征、统计频谱特征）下的性能。DWT的核心优势在于能在时频域精准定位信号异常，且计算复杂度低，适合实时应用。实验结果显示，当使用统计和频谱特征时，所有模型均达到近100%准确率，其中高斯核SVM表现最优，即便面对微弱至0.4 dB功率差的欺骗信号仍保持高准确性。研究进一步证实，预提取特征代替原始图像输入可大幅降低计算开销，为实时GNSS接收器实现开辟了可行路径。该研究的创新点在于系统对比了不同小波类型和特征提取方式对检测性能的影响，提出了计算高效的实用方案。然而研究仅覆盖静态场景，未来需拓展至动态环境验证、优化特征选择算法，并探索深度学习与小波变换的协同应用。

30. 美空军MagNav项目成功演示了实时磁导航技术。

美国空军官网2023年5月25日报道，在5月11日至15日的“金凤凰”演习期间，美国空军-麻省理工学院人工智能加速器（AIA）的MagNav项目，首次在美军C-17A“环球霸王III”运输机飞行中成功演示实时磁导航技术，成为首个在美军飞行器上实现该前沿技术实时演示的机构。此次项目由AIA MagNav团队联合麻省理工学院、麻省理工学院

林肯实验室、空军研究实验室传感器局及空军理工学院自主与导航中心开展，使用加利福尼亚州特拉维斯空军基地的3架C-17运输机飞往爱德华兹空军基地测试场；团队借助AIA的校准与定位神经网络，利用商用笔记本电脑在几分钟内完成飞行中训练，并通过基于过往C-17数据构建的AI模型迁移学习加速训练过程，特拉维斯空军基地第60空中机动联队提供飞机用于构建和训练MagNav原型系统，还参与了演习中的“大象漫步”展示。该项目还通过“磁导航开放挑战赛”全球协作，依托开源软件库整合全球贡献者力量，优化神经网络架构以消除飞机磁噪声、对比已知磁图定位，相关技术报告将提交美国政府，为其他美军平台提供参考。

31. GPS World网站刊载文章《人工智能在全球导航卫星系统定位、导航与授时中的应用及前景》。

2025年5月23日，乔伊·奇科利尼（Joey Ciccolini）在GPS World网站刊载文章《人工智能在全球导航卫星系统定位、导航与授时中的应用及前景》。文章系统阐述了人工智能（AI）及其主要分支（特别是机器学习、深度学习等）在全球导航卫星系统（GNSS）定位、导航与授时（PNT）中的当前应用与未来发展前景。文章首先明确定义了AI及其子领域，包括自然语言处理、计算机视觉、机器学习、

神经网络、专家系统等，梳理了AI技术的发展历程和当前主流技术栈。随后，重点探讨了机器学习（ML）在GNSS领域的应用方向和技术路线，包括信号采集、信号处理与分析、测量误差抑制、PNT估算等关键环节。文章引用了大量文献研究，并对2020-2021年200余项ML在GNSS应用的最新进展做了综述，指出神经网络和深度学习成为主流方法，能够有效提升在多路径、干扰、欺骗等复杂环境下的GNSS性能。文中进一步分析了典型应用场景，如多径信号分类、天线设计优化、射频干扰检测与分类、误差源建模（对流层、电离层）、卫星轨道与时钟估算，以及高精度实时定轨（RTK/PPP）。逐步介绍机器学习的流程、模型开发、验证与部署环节，并强调了数据质量、计算资源、实际部署成本等实际问题。文章最后指出，随着GNSS/PNT在低成本硬件、极端环境与安全关键场景的需求激增，AI/ML方法具备明显潜力成为下一代高鲁棒性、高精度GNSS系统的核心技术方向，同时强调了亟须开展大规模真实环境验证与模型调优工作。

32. 西班牙 GMV 公司研究团队在《Engineering Proceedings》期刊发表论文《借助人工智能增强GNSS精密单点定位算法：致力于减轻多路径效应》。

2025年5月19日，西班牙GMV公司研究团队在

《Engineering Proceedings》期刊发表论文《借助人工智能增强GNSS精密单点定位算法：致力于减轻多路径效应》，提出用人工智能增强GNSS精密单点定位（PPP）算法，以应对城市环境中的多路径干扰难题。多路径效应源于卫星信号经建筑物反射或衍射，严重影响定位精度。研究团队将K-Means聚类算法集成至自研的GSHARP PPP算法中，利用马德里不同场景下收集的GPS、Galileo和BeiDou三系统约50小时数据训练模型。特征工程筛选出信噪比、卫星仰角、码残差、电离层延迟、 Δ CMC和CRC六个关键指标，全面刻画干扰模式。通过对比2至6个聚类方案，结合Silhouette系数、DBI和CHI三项评估指标，确定5聚类模型最优（DBI=0.836727）。该模型将观测值分为五类：Cluster 3代表高质量LOS信号；Clusters 1、2为轻微多路径干扰；Clusters 0、4指示严重多路径或NLOS条件。从开阔天空到城市峡谷的场景测试证明，聚类结果与环境变化高度契合。该方法具有设备无关性优势，无需特定接收器即可实现检测。研究指出，未来将通过调整EKF观测值权重实现多路径缓解，并探索深度学习或强化学习等更复杂AI模型以优化性能。

33. 捷克LPP公司启动AI导航无人机量产。

2025年5月19日，捷克无人系统开发公司LPP Holding近

日宣布，正式启动具备人工智能（AI）自主导航能力的攻击型无人机批量生产。这批无人机此前已在乌克兰军队服役，经过实战检验。据悉，产品最大亮点在于完全不依赖无线电通信通道，AI系统可通过视觉环境分析、气压与多种传感器数据进行独立导航，有效规避俄方电子战干扰。LPP公司联合所有人Radim Petrash指出，该产品为世界上首批通过实战验证的视觉AI自主导航无人机。软件开发周期不足一年，与乌克兰军方的紧密合作推动了产品的快速落地。公司已向乌克兰交付数十架不同型号无人机，包括战术型MTS05、中程MTS25及可携带12公斤弹头的重型MTS40，工厂现有月产能约50架，并计划进一步扩产。北约专家认为，抗干扰与自主化是现代战场对无人机的核心要求，但高度自主决策也引发了伦理争议。LPP无人机目前已由乌克兰第33突击团等部队在前线部署数月，表现受到关注。

34. Insidefpv网站发布文章《GPS、人工智能和视觉系统如何驱动自杀式无人机》。

2025年5月17日，Insidefpv网站发布文章介绍GPS、人工智能（AI）和视觉系统如何驱动自杀式无人机运作。这类无人机不同于传统导弹或侦察无人机，能在目标区域上空盘旋，借助AI和视觉系统识别高价值目标后实施精准打

击，GPS、AI和视觉系统是其核心技术。GPS负责导航，支持无人机识别预设目标、远距离飞行、在特定区域盘旋，还能实现地理围栏功能，不过美、印、以等国也在研发惯导系统、视觉地标识别等GPS失效时的备用系统；AI作为“大脑”，可实时分析环境、识别目标（如坦克、人员）、判断打击时机、动态调整飞行路径，减少人工干预，提升作战效率；视觉系统含高清光电相机、红外传感器等，能提供360度战场视野，即便恶劣环境下也能识别目标，且常与AI融合实现实时图像处理。

35. 瑞典研究团队在预印本平台arXiv发布论文《基于机会数据的自监督联邦全球导航卫星系统欺骗检测》。

2025年5月9日，瑞典斯德哥尔摩皇家理工学院网络系统安全组研究团队在预印本平台arXiv发布论文《基于机会数据的自监督联邦全球导航卫星系统欺骗检测》，针对GNSS易受欺骗攻击的安全痛点，提出创新性检测框架。传统深度学习方法存在三大短板：依赖大量标注数据、计算成本高昂、位置数据敏感引发隐私风险；现有方案多为单设备部署，缺乏分布式协同能力。该框架采用云端-本地协同架构。每个移动平台部署LSTM网络构建自监督异常检测器，通过欺骗偏差预测算法本地自动生成训练标签，确保隐私保护。各平台独立完成本地训练后，仅上传模型参数

至云端，服务器运用FedAvg算法聚合生成全局模型，再分发回各平台迭代优化。研究基于Jammertest 2024真实数据集（涵盖6部智能手机、85条驾驶轨迹的多维传感器数据）开展评估。结果显示联邦学习AUC达87.4%，显著优于集中式训练（86.6%）和传统PDS方法（83.5%）。核心创新在于：首次融合自监督联邦学习与机会数据用于GNSS欺骗检测；消除对标注数据集的依赖；在隐私保护前提下实现更高检测精度。泛化性测试验证了方法在同设备、跨设备型号、不同轨迹等场景及i.i.d./非i.i.d.数据分布下的鲁棒性。局限性方面，Pixel 4 XL设备性能偏低，可能与信号功率分布差异和数据集规模不足相关。未来研究将在真实无线环境中部署方案，并引入防御恶意参与者的安全机制。

36. 美国、瑞士研究团队预印本平台arXiv发表论文《迈向用于GNSS射频干扰检测的简单机器学习基准》。

2025年4月14日，美国约克大学、瑞士空中导航服务有限公司（Skyguide）研究团队预印本平台arXiv发表论文《迈向用于GNSS射频干扰检测的简单机器学习基准》，针对全球导航卫星系统（GNSS）射频干扰检测中深度学习模型被过度采用却缺乏实证验证的问题，提出了简单高效的机器学习基线方法，挑战“模型越复杂性能越好”的普遍假设。研究采用瑞士空军和瑞士空中救援组织“直升机随

机飞行记录项目”（HRRF）的真实数据，该数据集包含超过54,000次飞行记录，涵盖约30架直升机在正常运行条件下的GPS、姿态航向参考系统及飞行管理系统数据，并包含实际干扰演习中受真实干扰器影响的飞行记录。研究基于载噪比统计特性分析，结合航向、横滚、俯仰角、地速和真空速等多维测量信息，构建了包含总和、中位数、均值、标准差等十个基础特征函数的简单特征工程体系。实验结果显示，逻辑回归和LightGBM等简单机器学习模型在GNSS射频干扰检测中达到91%准确率，ROC AUC评分分别为0.86和0.91，显著优于ResNet、InceptionTime、FCN、LSTM-FCN等多种先进深度学习架构。深度学习模型在召回率和F1分数上普遍表现不佳，可能源于训练数据有限及对正常飞行行为的过拟合。该研究的核心贡献在于为GNSS射频干扰检测建立了透明且易于复现的基线标准，强调在安全关键型航空应用中简单性、可解释性和实用性的价值。该方法能在GPS信号未完全丧失时检测干扰，解决了现有基于ADS-B方法的主要局限。研究呼吁学术界在开发检测方案时应谨慎评估复杂工具的必要性，优先考虑具有实际操作价值的简洁解决方案。

37. 德国研究团队在预印本平台arXiv发布论文《基于真实世界数据差异的全球导航卫星系统干扰分类中（非）

监督机器学习方法的评估》。

2025年3月31日，德国纽伦堡弗劳恩霍夫集成电路研究所和德国航空航天中心（DLR）的研究团队在预印本平台arXiv发布论文《基于真实世界数据差异的全球导航卫星系统干扰分类中（非）监督机器学习方法的评估》，系统评估了监督与无监督机器学习方法在全球导航卫星系统（GNSS）干扰分类中的性能。研究聚焦于真实世界数据差异场景，针对低成本干扰设备泛滥威胁定位可靠性这一痛点，为自动驾驶、收费系统等应用提供技术保障。团队在德国高速公路、奥地利Seetal阿尔卑斯地区及室内环境采集超过150万样本，涵盖快照数据与低成本传感器时间序列。基准测试包括20种监督学习模型（ResNet18、LSTM、Transformer）、29种异常检测方法及24种域自适应方法。实验揭示了干扰设备多样性、采样频率差异、天线特性、多路径效应等因素造成的跨域挑战。针对标注稀缺问题，作者提出多模型投票伪标签方法，有效利用未标注数据提升泛化能力。ResNet18在高速公路数据集上达99.9%准确率，但跨数据集测试性能骤降，凸显域迁移必要性。结合域自适应技术（最大均值差异MMD、深度相关对齐CORAL）和数据增强后，模型对多源异构数据的适应性显著改善。研究验证了干扰信号对可见卫星数量和智能手机定位精度的

直接影响，为“干扰速度陷阱”检测车载干扰设备提供了技术支撑。该研究首次公开大规模真实世界GNSS干扰数据集，系统对比跨域场景下多种学习范式，并提出半监督方法降低标注成本。不足之处在于多路径场景准确率下降，跨天线类型迁移效果待优化。未来需探索更鲁棒的自适应算法和持续学习机制，应对新型干扰设备涌现。

38. 福布斯网站发布文章《基于人工智能的无卫星GPS：导航的未来》。

2025年3月17日，福布斯网站刊登Luis E. Romero的文章，介绍美国奥斯汀初创公司Tern AI研发的无卫星人工智能导航系统。该系统名为独立衍生定位系统（IDPS™），无需卫星连接，通过在第三方基础地图上运行专有人工智能，分析车辆和智能手机中已有的加速度计、陀螺仪等运动传感器数据，并结合精密地图，可精准定位，在奥斯汀实际道路测试中，即使仅依靠缓存地图和车辆传感器数据，也能追踪车辆移动，在高楼林立的市中心表现甚至优于易受干扰的传统GPS，还能在停车场、隧道、山谷等GPS无法覆盖的区域工作，且不会被敌方干扰或欺骗。当前众多关键系统依赖GPS卫星，但卫星面临敌方干扰、摧毁、欺骗等威胁，美国众议院情报委员会曾警告俄罗斯具备针对GPS卫星的能力，若GPS失效将造成灾难性影响。Tern AI于2024年2

月走出保密阶段，获440万美元种子资金，还赢得美国交通部合同，其方案无需昂贵新基础设施，仅需向兼容设备下载软件，被前交通部官员视为解决该部门数十年难题的低成本方案，或为导航领域带来变革并应对国家安全担忧。

39. 意大利研究团队在期刊《Electronics》发表论文《一种机器学习评估：比特深度对全球导航卫星系统中无线干扰检测与分类的影响》。

2025年3月14日，意大利研究团队在期刊《Electronics》发表论文《一种机器学习评估：比特深度对全球导航卫星系统中无线干扰检测与分类的影响》，系统评估信号比特深度对全球导航卫星系统（GNSS）中机器学习算法检测和分类无线干扰的性能影响。GNSS信号因接收功率弱且低成本干扰器广泛可用，极易受射频干扰影响。虽然机器学习已应用于GNSS干扰检测，但比特深度（涉及处理时间与存储空间权衡）对检测性能的影响尚未得到充分研究。研究团队使用USRP软件定义无线电平台，在真实GPS L1和Galileo E1信号中注入三种干扰类型（宽带chirp、高斯噪声、窄带chirp），每种设置三个功率等级。原始16比特信号通过LabVIEW生成8、4、2、1比特降质版本。分析采用两条路径：浅层机器学习方法提取9个统计特征输入决策树、随机森林和极随机树分类器；深度学习方法使用两层CNN配

合多头注意力机制。在干扰检测任务中，CNN在比特深度 ≥ 4 且中高功率干扰时准确率达99%以上，但比特深度降至1-2或低功率时性能显著下降。在三分类任务中，使用6颗或8颗卫星可实现近100%准确率，而1-2颗卫星准确率明显下降，表明6颗卫星已足够。不同干扰类型可检测性存在差异：低功率下窄带干扰更易检测，高功率时高斯干扰准确率最高。浅层算法中，极随机树(ERT)表现最佳，在某些配置下与CNN性能相当，且计算效率更高，可能更适合资源受限场景。主要创新包括：首次系统评估比特深度影响，将CNN应用于GNSS接收机的C/N0数字产物而非原始射频信号（更实用），并向研究社区开放数据集。局限性在于数据采集基于静态环境和固定时间窗口，卫星筛选阈值为经验性设定，动态环境中需要自适应机制。未来研究可在动态环境中评估该方法，探索Transformer等先进架构，并整合多种GNSS接收机输出特征以提升鲁棒性。

40. 中国台湾海洋大学的研究团队在《Sensors》期刊发布论文《面向GNSS多路径LSTM训练模型的可解释人工智能》。

2025年2月6日，中国台湾海洋大学的研究团队在《Sensors》期刊发布论文《面向GNSS多路径LSTM训练模型的可解释人工智能》，聚焦全球导航卫星系统（GNSS）

多径效应检测的可解释性人工智能研究。GNSS在自动驾驶、精准农业和航空等安全关键领域的广泛应用，使信号可靠性至关重要，而多径干扰——尤其在城市环境中建筑物反射产生的复杂模式——是影响定位精度的主要挑战。深度学习模型虽性能优异，但其“黑箱”特性限制了在安全应用中的可信度。研究团队提出将长短期记忆网络（LSTM）与层级相关性传播（LRP）技术结合的创新框架。核心贡献体现在三方面：开发专门处理GNSS观测值的可解释LSTM架构，输入特征涵盖多径变量、载波噪声比和卫星高度角；将LRP技术适配到GNSS信号分析，实现模型决策的特征归因；发现LRP相关性得分与信号异常存在显著相关性，开辟异常检测新途径。团队采用Trimble双频接收机的真实数据进行验证，重点分析低仰角卫星（更易受多径影响）。LSTM模型配置256个隐藏单元，训练500轮，实现高精度预测：多径误差通常在1米以内，载波噪声比误差在1 dB/Hz以内。关键发现来自异常信号实验：在特定时段人为引入信号异常后，LRP相关性得分持续显著增长。不同特征类型的增长率差异明显——多径参数增长7.34%-8.81%，载波噪声比变化12.50%-32.48%（CNR1异常时高达32.48%），高度角参数增长16.10%。这种强相关性为GNSS信号质量监测提供了新的分析工具。论文讨论了实际应用考量：每样本处理时间约8.1毫秒，选择性处理可降低60%计算负载。LSTM

结合LRP在可解释性和计算效率间取得良好平衡，特别适合需要透明决策的安全应用。研究局限包括对训练数据多样性要求高、环境泛化能力有待提升、实时实现需要硬件改进等。未来方向涵盖开发更高效的LRP算法、增强模型泛化能力，并扩展至其他GNSS误差检测。该研究为GNSS深度学习模型可解释性提供实用框架，推动更可靠导航系统的发展。

41. 英国帝国理工学院研究团队在期刊《Sensors》发表论文《基于机器学习的全球导航卫星系统伪距在测量域中的故障检测与排除》。

2025年1月29日，英国帝国理工学院研究团队在期刊《Sensors》发表论文《基于机器学习的全球导航卫星系统伪距在测量域中的故障检测与排除》，提出基于机器学习的全球导航卫星系统（GNSS）伪距故障检测与排除（FDE）综合框架。该研究针对GNSS在航空、海事、自动驾驶等安全关键领域应用中的完整性需求，解决了现有方法中机器学习模型与质量指标数量有限、评价体系不完善的问题。研究首次系统评估1-40米范围内的40个故障阈值，采用六类传统机器学习模型（决策树、K近邻、判别分析、逻辑回归、神经网络及三种集成树模型），利用11个质量指标——载噪比、多径标准差、相位锁定、卫星高度角、速度等作为

输入特征。基于瑞士境内约3455公里动态采集的453万行数据完成训练与验证。当故障阈值 ≥ 4 米时，FDE准确率可超95%，加权KNN（10邻居）性能最优，Bagged Trees和神经网络次之。研究从准确率、误检概率、虚警概率和数据排除率四个维度全面评估，发现KNN误检概率最低（ 3×10^{-3} 至 7×10^{-2} ），但虚警概率略高于Bagged Trees，意味着会损失更多清洁数据。该框架可作为GNSS定位算法的额外FDE层增强用户完整性，简化高级RAIM算法复杂度，降低保护级别，特别适用于复杂环境下的动态模式。研究揭示了阈值选择的权衡：降低阈值提升数据质量但降低准确率并增加误检概率，而2-7米阈值范围最可靠，数据排除率仅2%-9%。该方法可广泛应用于航空、海事、无人机、自动驾驶和农业等领域，提升系统性能。

42. 伊朗科技大学研究团队在预印本平台arXiv发布论文《使用机器学习和深度学习识别GNSS/GPS欺骗与干扰》。

2025年1月4日，伊朗科技大学电气工程学院研究团队在预印本平台arXiv发布论文《使用机器学习和深度学习识别GNSS/GPS欺骗与干扰》，针对全球导航卫星系统（GNSS）的欺骗与干扰威胁，提出基于机器学习和深度学习的综合检测方案。GNSS作为定位、导航和授时服务的核心基础设施，在交通、通信、应急等领域广泛应用，但易

受恶意攻击：欺骗攻击发送伪造信号误导接收器，干扰攻击则发射干扰信号使合法信号失效。传统检测方法依赖预定义阈值，误报率高且无法适应动态攻击策略。研究团队采用多种机器学习算法（逻辑回归、支持向量机、随机森林、XGBoost等）和深度学习模型（CNN、ResNet18等）进行实验。欺骗检测使用包含510, 530个样本、13个特征的无人机GPS数据集，涵盖三类攻击类型；干扰检测使用120000张光谱图像的Raw IQ数据集，涵盖六类干扰信号。针对数据不平衡问题，采用随机欠采样和网格搜索交叉验证优化超参数。实验结果显示，基于XGBoost的梯度提升机在GPS欺骗检测中达到94.44%准确率，ROC AUC接近完美表现（0.99-1.0）。干扰信号分类任务中，自定义CNN模型和ResNet18实现98.93%准确率，较先前研究提升约4%；干扰检测准确率达99%，提高约5%。据作者所述，这是首个系统性同时解决GPS欺骗和干扰检测的综合性研究，所有代码和数据已在GitHub开源。研究创新点包括：首次综合处理两类威胁、系统比较多种算法、将计算机视觉应用于光谱图分类、达到领域最优水平并公开全部资源。局限性在于部分数据在受控环境采集，实际泛化能力待验证；模型对复合攻击场景的鲁棒性需进一步测试。

43. GMV主导的BREGO项目成功研发AI驱动的GNSS

干扰与欺骗防护系统。

Inside GNSS网站2024年12月26日报道，欧洲航天局（ESA）资助的BREGO项目已成功开发出基于人工智能的全球导航卫星系统（GNSS）实时干扰检测与缓解装置，并通过多地验证测试。该项目由西班牙技术公司GMV主导，构建了一套整合优化信号处理技术与AI/机器学习算法的新型防护体系，可实时完成干扰和欺骗的检测、分类与缓解。GNSS技术的脆弱性长期困扰业界——低功率信号易遭干扰压制，GPS L1与Galileo E1频段的开放式结构更为欺骗攻击留下可乘之机。GMV工程师Wahyudin Syam指出，该项目旨在为安全关键型、责任关键型及商业应用提供抗干扰导航能力。研发团队系统梳理了GNSS威胁现状与现有缓解技术，利用内部数据集训练算法模型，最终形成基于数字信号处理的AI解决方案。系统采用“黑盒”外挂架构，可兼容任意消费级商用GNSS接收机。核心硬件包括配备USRP X410多通道软件定义无线电前端的高性能计算机，以及Septentrio公司的GPS L1/Galileo E1双频接收器。验证阶段分三地进行：GMV英国实验室采用模拟数据与TEXBAT数据集开展初步测试，ESA位于荷兰的ESTEC设施则使用2024年挪威Jammertest演习采集的实战数据完成最终验证。测试结果显示，系统具备接收机无关性与灵活配置特性，能实时

抵御线性调频脉冲与CDMA类干扰，并创新性地改进了自适应陷波滤波器，可在快速响应频率变化的同时避免非线性相位失真。该项目由ESA的NAVISP计划提供资金支持。

44. 德国、越南的研究团队在《GPS Solutions》期刊发布论文《利用集成机器学习对连续GNSS站点进行分类》。

2024年12月19日，德国、越南的研究团队在《GPS Solutions》期刊发布论文《利用集成机器学习对连续GNSS站点进行分类》，针对全球导航卫星系统（GNSS）台站分类问题，创新性提出人机协同机器学习（H&M）方法。随着GNSS台站网络快速扩张至近9000个连续监测站，因各站精度差异显著，迫切需要有效分类方法来识别高精度参考站和形变分析适用站点。研究采用两种核心策略：一是“建议-决策”阶段，无监督算法（K-means、Fuzzy C-means等）进行聚类，人类专家基于经验分配标签；二是“纠正-再训练”阶段，利用专家反馈优化模型。团队从Nevada数据库提取9000个全球台站1994-2022年坐标时间序列，以1900个欧洲台站为训练样本，从46个参数中筛选出15个关键特征，包括速度矢量、均方根误差、标准差、不连续点、异常值、天线变更和地震影响等。实验结果显著：仅用400个样本训练的传统模型准确率低于50%，而H&M方法创建的1900样本模型准确率跃升至97.7%；对全球7075个

台站分类后，通过“纠正-再训练”将全部9000个台站数据用于再训练，准确率进一步提升至99.2%。在测试的15种分类模型中，基于决策树的集成模型（Boosted-Tree和Bagged-Tree）表现最优，误判率仅0.2%-1.0%。研究将台站分为三个质量等级，欧洲高质量站占比39.7%，略高于全球其他地区的35.9%。核心创新在于有机整合人类智能与机器学习，通过人类监督校正AI错误、处理异常并进行超参数调优，有效突破样本量不足和数据异常的瓶颈。该方法不仅适用于GNSS台站分类，还可推广至自然灾害预警等领域，通过双向反馈机制持续优化性能。未来可应用于IGS台站或国家级CORS网络分类，具有广阔应用前景。

45. 波兰研究团队在《GPS Solutions》期刊发布论文《极端天气条件下基于机器学习的实时精密单点定位对流层延迟预测》。

2024年12月9日，波兰研究团队在《GPS Solutions》期刊发布论文《极端天气条件下基于机器学习的实时精密单点定位对流层延迟预测》，提出基于机器学习的对流层延迟预测方法，专门应对极端天气下全球导航卫星系统（GNSS）精密单点定位（PPP）的挑战。对流层延迟是影响GNSS定位精度的主要误差源，因其非色散性和时空变异性，传统PPP将其作为未知参数估计，导致收敛时间冗长。

现有研究多聚焦于特定站点的天顶延迟预测，鲜少涉及极端天气下的三维湿折射率预测。研究采用体素化GNSS层析技术获取三维湿折射率场，结合长短期记忆网络（LSTM）和遗传算法（GA）优化超参数，实现2小时分辨率预测。以波兰暴雨带和加州风暴为案例，通过射线追踪技术计算各卫星方向的斜路径延迟（STD）。团队对比了三种PPP处理方法：常规PPP、射线追踪PPP和差分PPP。静态模式下，差分PPP使三维坐标平均绝对误差（MAE）降低8-33%；动态模式下降幅达30%，垂直收敛时间缩短6-17%。创新之处在于将预训练LSTM-GA模型应用于极端天气的三维湿折射率实时预测，通过差分策略补偿残余延迟。但预测数据的不确定性使精度略低于真实层析数据，且模型泛化能力有待验证。

46. 芬兰Modirum Defence聚焦AI赋能无人机抗干扰作战。

Defence Industry Europe网站2024年9月7日报道，芬兰国防技术公司Modirum Defence宣布完成重大融资，将用于加速GNSS拒止导航和无人机集群自主作战两项核心AI技术的产品化，计划2024年第四季度正式推向市场。Modirum Defence此轮融资将重点投入两大技术方向的研发与商业化。其一是GNSS拒止环境导航AI系统，该技术通过算法确保无

人机在对抗环境中保持航迹精度，有效应对信号压制威胁。其二是无人机集群自主作战AI，可实现多架无人机的协同自主控制，覆盖ISR（情报监视侦察）和打击效应器双重任务场景。该公司首席执行官Elias Silvola表示，产品定位对标美国同类先进方案，但在成本控制上更具竞争力，主要产品发布窗口锁定2024年第四季度，随后启动全球交付。值得注意的是，公司董事会主席Philip Niedermair曾长期服务于美国情报系统及技术评估中心，其加盟被视为强化了Modirum Defence在欧美防务市场的战略渗透能力。从技术指标看，GNSS拒止导航方案的核心价值在于打破无人机对卫星信号的单一依赖，这在俄乌冲突中已被验证为关键短板。与此同时，无人机集群AI通过分布式决策架构实现多机协同，可显著提升编队作战的容错性与任务灵活性。公司首席商务官Matthew Millward强调，这两项技术填补了当前无人机作战体系的关键空白，预期将开拓新的市场增量。本轮融资还将用于扩展全球销售网络与市场推广体系。公司管理层透露，已建立可观的商业订单储备，有望在未来财年实现规模化交付。

47. UAVOS公司进行无人直升机导航测试，借助计算机视觉与AI技术在GNSS拒止环境实现精准自主飞行。

Inside GNSS网站2024年8月23日报道，UAVOS公司与

其客户合作，对搭载自身自动驾驶系统的无人直升机开展测试，该测试由UAVOS工程服务部门凭借集成了先进航空电子系统的无人直升机提供支持。此次测试的核心是UAVOS自动驾驶系统，其借助计算机视觉与人工智能技术，能在全球导航卫星系统（GNSS）拒止环境中实现高精度、高可靠性的无人机导航。系统搭载的基于计算机视觉的替代导航模块，配备深度学习算法，可为航空电子系统提供地理空间坐标，且该计算机视觉技术支持昼夜环境下精准、稳定的导航，能让无人机独立完成安全起降。通过这种信息获取与处理方式，无人机可“感知”并解读周边环境，从而在无需GNSS的情况下实现自主导航。

48. 空军技术连接网站发文《美国空军正在训练人工智能驾驶飞机，以防未来战斗中GPS系统遭到破坏》。

2024年5月21日，空军技术连接网站发文称未来战争中电子战与反卫星武器可能使美军失去导航和瞄准关键工具GPS，为此美国空军正试验将人工智能（AI）作为替代导航方式，这也是美军众多可能重塑战争的AI项目之一。若美军与中俄等大国开战，GPS卫星及其他导航技术或成首要目标，即便仅遭干扰或欺骗，也会给依赖GPS的美军系统带来混乱。美国空军-麻省理工学院人工智能加速器项目主任加里·弗洛伊德上校表示，他们或许为GPS拒止环境下的行动

增添了新手段，且未来必然会面临这类环境。去年，空军测试了用AI程序借助地球磁场为C-17运输机导航，该方式因飞机自身等产生的电磁噪声而难度较大，但AI通过飞行测试学会了识别应遵循的信号以指引飞机航向。AI作为GPS导航替代方案的潜力，反映出对未来战争中GPS失效的担忧加剧，这在乌克兰战争中已有体现——双方均使用电子战和GPS欺骗干扰无人机与导弹、使武器偏离轨道。五角大楼长期致力于联合部队电子战解决方案，研发抗干扰导引头及其他不依赖GPS的定位方案，2023年8月有国防官员称陆军正重启战术电子战能力重建投资，乌克兰战争让相关工作更紧迫。此外，美军还有其他AI整合项目，如2023年9月进行了AI驾驶F-16战机与有人战机的标志性测试，虽未公布结果，但官员称AI进展达预期或超预期。本周美中还将在日内瓦就AI使用举行重要会谈，美方表示会讨论各类风险，但暂不预设具体内容。

49. Inside GNSS 网站刊载文章《电离层异常：利用GNSS和人工智能检测地震信号》。

2024年4月2日，Inside GNSS网站刊载俄勒冈州立大学研究团队的论文《电离层异常：利用GNSS和人工智能检测地震信号》，验证了利用深度学习自动识别地震等地球物理事件诱发的行进式电离层扰动（TIDs）的可行性。核心

挑战与创新：地震、海啸、火山等事件产生的重力波或声波传播至电离层，可通过GNSS信号总电子含量（TEC）检测形成的TIDs。传统方法依赖已知事件和人工筛查，本研究逆转流程——先检测TID异常，再追溯源事件，有望实现灾害先期预警。团队针对信号-噪声分离、多源扰动区分等难题，提出基于长短期记忆网络（LSTM）的自动化方案，填补深度学习TID检测的研究空白。方法设计：选取阿拉斯加10个GNSS站点2021年全年数据为测试集。构建双层LSTM网络（各256神经元）叠加双层全连接层（各128神经元），用15分钟窗口去趋势TEC（dTEC）数据预测下一15秒采样点。采用动态阈值与滚动MSE误差计数（10分钟窗口）识别异常，当站点对相位同步性超过0.9时触发标记。数据经四阶巴特沃斯高通滤波，仰角截止20度。关键成果：LSTM性能超朴素预测器6倍，检出5个异常时刻。2021年7月29日06:26:15 UTC的异常发生于阿拉斯加8.2级地震后约10分钟，4站超阈值、6站高同步。250公里电离层穿刺点分析显示dTEC振幅从震中向西南递增（ ± 0.25 至 ± 0.90 TECU），扰动传播速度约1 km/s，与地震TID特征吻合。另一异常（8月28日）来源待查。研究价值：首次证明LSTM可用于北美地区长期TID自动监测，为实时预警提供技术路径。团队指出需进一步开发异常源分类算法，提升对地震、海啸、核试验等事件的识别预警能力。

50. 美国斯坦福大学研究团队在预印本平台arXiv发布论文《机器学习技术在改进全球导航卫星系统中的应用综述》。

2024年3月29日，美国斯坦福大学航空航天学院研究团队在预印本平台arXiv发布论文《机器学习技术在改进全球导航卫星系统中的应用综述》，系统梳理机器学习技术在全球导航卫星系统（GNSS）定位改进中的应用。传统GNSS方法在城市峡谷等复杂环境中受多径效应、非视距误差和信号遮挡影响，定位精度显著下降。这些方法依赖高斯噪声假设，难以适应不确定噪声模型。机器学习技术为突破这些局限提供了新路径。论文覆盖多种技术路线：支持向量机和决策树在NLOS检测中分类准确率达75%-99%；卷积神经网络和循环神经网络在信号分析、多径缓解中表现突出，部分研究使定位精度提升超70%；图神经网络和Transformer在处理不规则测量数据时展现独特优势，卫星可见性预测准确率超96%。针对智能手机定位，混合学习方法在Google分米级挑战赛中取得优异成绩。论文也指出当前局限：数据依赖性强、计算资源需求高、泛化能力不足、缺乏标准化评估体系等。作者展望迁移学习、联邦学习、边缘计算、生成对抗网络数据增强等前沿技术的应用潜力，为GNSS领域提供全面技术参考。