

量子时频

技术动态简报

(2025年第9期, 总第9期)

2025年12月28日

主办单位：导航与时空技术国家级重点实验室

1. 赛峰公司与Infleqtion宣布战略合作，将量子光学时钟技术整合至授时同步系统以提供GPS拒止环境下的弹性授时能力。

Quantum Insider网站2025年12月22日报道，赛峰电子与防务公司宣布与Infleqtion公司建立战略合作关系，共同加速开发和部署面向关键基础设施的下一代精密授时解决方案。Infleqtion是一家专注于中性原子量子技术的全球性企业。此次合作旨在整合Infleqtion的中性原子量子时间与频率技术以及赛峰公司在高可靠性同步系统和全球支持方面的技术能力，为国防、航空航天、电信和国家基础设施网络提供独立于GPS的弹性授时能力。合作的核心成果是双方联合验证

的下一代授时集成方案。该方案将Infleqtion的Tiqker™量子光学时钟与赛峰公司的White Rabbit和SecureSync®系统进行技术整合。该组合解决方案在GPS受限和GPS拒止环境下展现出稳定性和弹性能力，确保关键任务系统的运行连续性。验证完成的授时方案计划于2026年第一季度通过赛峰公司的全球分销和支持网络面向全球市场提供。赛峰电子与防务公司GNSS与授时业务负责人Alexandre Lenoble表示，确保授时能力是战略性资产，此次合作通过结合赛峰的同步技术专长与Infleqtion的量子授时技术，为高性能解决方案设定新标准。Infleqtion首席执行官Matt Kinsella指出，将量子授时解决方案与赛峰的同步系统及国际网络相结合，为安全、精确和广泛可及的授时能力奠定基础。双方认为弹性授时能力对国家安全、安全通信和下一代基础设施具有基础性作用。

2.美国《麻省理工科技评论》网站刊载文章《量子导航或许能解决军方的GPS干扰问题》。

2025年12月16日，美国《麻省理工科技评论》网站刊载文章《量子导航或许能解决军方的GPS干扰问题》。探讨了GPS干扰问题日益严峻的背景下，量子导航技术作为替代解决方案的发展现状与应用前景。自2022年俄乌冲突以来，俄罗斯大规模GPS干扰活动已影响数千架次航班，凸显了卫星导航系统的脆弱性及开发抗干扰导航技术的紧迫性。量

子导航技术利用光子和原子的量子特性构建超灵敏传感器，使载具能够独立于卫星进行导航。文章详细介绍了两大技术路线：第一是基于原子干涉仪的量子惯性导航系统，美国Infleqtion公司开发的量子陀螺仪、量子加速度计和Tiqker原子钟已在英国军事基地、美国陆军地面车辆和无人潜艇上完成测试，其原子钟精度达到每200万年误差仅1秒。第二是利用氮空位金刚石（NV diamond）测量地球磁场异常的量子磁力计导航系统，澳大利亚斯威本大学Allison Kealy团队的技术可同时测量磁场强度和方向，已于2024年完成飞行测试。技术挑战与突破方面，澳大利亚Q-CTRL公司专注于通过机器学习软件提升量子传感器在真实环境中的鲁棒性，其Ironstone Opal磁导航系统在塞斯纳飞机测试中实现了比战略级传统惯性导航系统精确94倍的定位效果，并已获得美国国防高级研究计划局（DARPA）合同，计划2026年交付首批商用设备。文章还对比分析了GPS系统自身的改进措施，包括GPS III卫星的抗干扰信号（L1C、L5、M-code）和低轨卫星导航方案，但强调未来导航将依赖“传感器融合”策略，即根据载具类型和环境动态整合卫星、量子传感器等多种技术。荷兰代尔夫特理工大学研究员Lotfi Massarweh指出，若量子技术能实现稳定运行一周以上（而非当前的数十分钟），将成为导航领域的“完全改变游戏规则者”。文章表明量子导航已从实验室阶段迈向

军事和商业实际部署，诺斯罗普·格鲁曼、洛克希德·马丁和空客等国防及航空巨头均已参与合作测试。

3.Quantum通过接入Elevate Quantum的共享“量子商业化实验室”，加速下一代PNT及相关量子计时和传感技术的验证与开发。

Quantum Insider 网站 2025 年 12 月 4 日报道，Mesa Quantum与Elevate Quantum开展合作，正式使用后者在科罗拉多建设的共享使用型“量子商业化实验室”，以开展下一代定位、导航与授时（PNT）技术的测试和研发，首要工作是基于Vescent光学原子钟平台进行高精度授时解决方案的验证。Elevate Quantum为包括Mesa Quantum在内的量子创业公司集中提供实验室与办公空间，以及光学原子钟、低温基础设施、量子系统和精密原型制作工具等专用设备，旨在以共享方式降低企业自建基础设施的成本和时间投入，并扩大量子企业对关键研发资源的获取能力。新闻稿中，Mesa Quantum首席执行官兼创始人Sristy Agrawal将该实验室及其设备形容为推进量子计时和量子传感方案迭代的关键条件，而Elevate Quantum则将此合作视为其商业化实验室模式在支撑区域量子创新生态和PNT技术工程化方面的一次代表性实践。

4.英国成功完成基于量子技术的导航系统飞行测试。

Inside GNSS网站2025年11月25日报道，由Inflection公

司牵头、英国研究与创新署（UKRI）资助近800万英镑的项目，成功完成基于量子技术的导航系统飞行测试。该系统利用超冷原子和紧凑型光学原子钟，不依赖GNSS信号即可获取位置与时间，测试在经改装的QinetiQ RJ100飞机上开展，且有BAE系统公司和QinetiQ合作参与，是抗干扰量子PNT技术在商业领域的全球首次空中测试。此成果符合英国《2025-26年英国航天局整体计划》中“超越GNSS、实现PNT来源多样化”的PNT弹性战略，能为关键基础设施在GNSS失效或受扰时提供保障。此外，英国通过国家量子技术计划（NQTP）支持量子PNT基础研究，如伦敦帝国理工学院获工程与物理科学研究委员会（EPSRC）250万英镑资助，参与格拉斯哥大学量子赋能PNT中心建设，该中心助力量子PNT系统从实验室走向实际应用；2025年，创新英国还启动“创新合同”竞赛，在国家量子战略任务下提供1400万英镑用于量子传感器与导航系统研发，14个入选项目中多个聚焦量子赋能PNT。英国正通过整合量子时钟、惯性传感器与先进算法，打造具备弹性的自主导航体系，在保留GNSS重要性的同时，构建起互补且独立的导航保障层。

5.英国团队完成冷原子量子-经典混合惯导系统的实船海试，验证量子PNT技术在非实验室海上环境中的稳定运行可行性。

Quantum Insider 网站 2025 年 11 月 25 日报道，

HARLEQUIN量子混合惯性导航系统在英方航标与航务机构 Trinity House的THV Galatea号上完成海上试验，航线覆盖加的夫到爱尔兰近海再至霍利黑德，期间经历多种气象和海况条件。试验在浪高最高约三米、风速可达约50英里每小时等海况下进行，船舶存在显著振动、姿态变化以及磁场和温度的波动，以模拟远离实验室条件的真实操作环境。试验属于Innovate UK资助的HARLEQUIN-ST计划，由CPI TMD Technologies牵头，联合斯特拉思克莱德大学、Covesion Ltd、Trinity House和NLA International等单位共同实施，目标是为海上用户构建可部署的量子PNT系统。HARLEQUIN系统将经典惯性器件与量子冷原子加速度计结合，用于高精度测量加速度和旋转量，在GPS等卫星导航信号不可用或不可靠时，维持定位、导航与授时能力。海试采用基于衍射光栅的磁光阱开展原子干涉测量，被描述为此类结构在海上平台的首次应用，其特点是结构紧凑和对环境变化的鲁棒性，有助于在无需实验室级隔振的条件下运行冷原子传感器。Covesion提供的LL2-Rb锁定激光系统经过加固设计，可抵抗振动、温度波动和磁场变化，为铷冷原子俘获与操控提供稳定光源，并与两套Harlequin激光系统及加速度计装置一起安装在接近主机、噪声显著的中层甲板空间。在航行和抛锚等多种工况下，系统表现出良好的频率与功率稳定性，即便在船舶高速航行时性能劣化

也较小；试验团队同时记录了噪声源、磁场、温度、气压和振动数据，为评估系统在真实操作应力下的行为提供了丰富样本。项目方将本次海试视为量子导航技术由实验室走向实船应用的重要步骤，认为结果表明加固型光子学与冷原子传感在动态海上环境中具备可行性，为后续引入光学钟、重力梯度仪等技术展开更复杂演示奠定基础。

6.以色列马里斯科技与量子陀螺仪公司签署战略协议，联合开发基于核磁共振量子陀螺仪技术的ME-Nav系统。

雅虎财经网站2025年11月13日报道，以色列马里斯科技有限公司（Maris-Tech Ltd.）与量子陀螺仪有限公司（Quantum Gyro Ltd.）签署战略合作协议，宣布双方将在量子物理惯性导航技术领域开展深度合作。双方将联合开发名为ME-Nav的先进导航系统，该系统整合了马里斯科技的边缘人工智能计算平台与量子陀螺仪公司的量子陀螺仪技术，旨在为全球定位系统（GPS）不可用或受到干扰的关键任务场景提供导航能力。ME-Nav系统的设计应用场景包括军事行动、城市作战、室内导航以及自主系统，特别针对无人机、无人地面车辆等小型平台的GNSS拒止导航需求。该系统的核心技术特点在于体积小、重量轻、功耗低，且不依赖无线通信，通过紧密集成视频、人工智能和导航功能实现边缘端的综合解决方案。量子陀螺仪公司的核心技术基于核磁共振原理，利用核磁矩在外加磁场中进动时的

拉莫尔频率偏移来感知旋转运动。该技术采用压缩光技术，通过使用高温铷蒸汽作为压缩光源，将测量灵敏度提高两个数量级，超越了传统性能极限，并在初始压缩度和光强度方面优于现有方法。项目预算约为100万美元，预期由马里斯科技和量子陀螺仪公司通过贷款方式提供资金支持。为推进ME-Nav系统的商业化，双方将共同组建一家新实体公司（NewCo）。马里斯科技持有新公司51%股权并获得控股地位，量子陀螺仪公司持有49%股权。

7.欧洲发展量子传感技术，以应对全球导航卫星系统干扰。

Inside GNSS网站2025年11月10日报道，当前地缘政治紧张加剧，尤其是东欧地区全球导航卫星系统（GNSS）干扰事件增多，量子传感技术成为保障定位、导航与授时（PNT）系统韧性的关键替代技术，其具备无源、抗干扰、高精度特性，可弥补惯性导航系统（INS）易漂移的缺陷，如量子磁强计能探测地球磁场微小变化，提供无漂移导航数据。欧洲多家企业积极布局该领域，法国KWAN-TEK专注金刚石量子传感器研发与商业化，英国Infleqtion主导Q-NAV项目将超冷原子技术融入惯性导航系统以应对GNSS信号受损场景，在欧洲有业务的澳大利亚Q-CTRL开发的量子保障导航系统精度优于传统INS且获美军DARPA项目奖项。欧盟也认可量子传感的潜力，2024年3月报告建议采用“系

统之系统”模式整合该技术，以构建抗干扰、防欺骗的独立安全导航能力，助力应对GNSS脆弱性问题。

8.英国Aquark公司获政府机构Innovate UK合同，旨在完成其冷原子原子钟在关键电信基础设施的部署。

Quantum insider网站2025年11月7日报道，英国国家创新机构 Innovate UK 已授予 Aquark 技术公司一份价值 1,409,702 英镑的合同，用于部署其紧凑型冷原子原子钟（AQlock）。该项目的主要目标是在2026年3月底前，将AQlock系统部署于英国一个主要的电信站点，以验证该技术的商业准备状态。该项目是Innovate UK“创新合同：量子传感器与PNT任务入门”计划的一部分，Aquark技术公司在竞争中获选。项目的执行将涉及多个合作方，其中英国国家物理实验室（NPL）和Purbrook公司将作为分包商参与。此次合作建立在Aquark公司此前与NPL和英国皇家海军成功进行的技术试验，以及先前与Innovate UK的合同和一项价值190万英镑的“未来领袖研究员”基金基础之上。AQlock技术的核心是一种基于冷原子的量子授时解决方案，能够实现分布式、不依赖GNSS的定位、导航和授时（PNT）功能。该技术利用真空技术、微细加工工艺以及一项独特的专利方法来捕获和冷却原子，从而实现量子系统的小型化和可扩展性设计。该项目的战略背景是支持英国的国家量子战略，该战略致力于建立独立于卫星信号的量子基础设

施，以应对因GNSS中断（如信号干扰、欺骗、太阳风暴等）可能造成的每日约10亿英镑的经济损失。通过部署该系统，英国旨在加强其电信网络、国家基础设施的韧性，并巩固其在可扩展量子传感解决方案领域的领导地位。

9.美方在AUKUS框架下完成对四台澳大利亚光学原子钟的六周评估试验并将结果在盟内共享。

Interesting engineering网站2025年11月4日报道，一项为期六周的量子计时系统试验在美国华盛顿特区完成，澳大利亚阿德莱德的QuantX Labs与阿德莱德大学（University of Adelaide）各提供两台量子钟，共四台设备在多种环境条件下接受评估以验证其在安全通信、导航与电子战等防务应用中的性能与适配性，试验结果被描述为成功并形成可与盟友共享的成果。被测设备均为光学原子钟，其中阿德莱德大学的方案基于温原子蒸汽的镱（ytterbium）光学原子钟并已走向商业化路径，QuantX Labs的便携式光学原子钟采用铷（rubidium）并使用澳大利亚专利的双色双光子工艺；两类设计均为澳大利亚主权知识产权，源于多年由国防科学与技术集团（DSTG）资助的研究，目标面向可出口的安全与韧性计时系统以支撑国防与民用关键基础设施。该项目归属奥库斯第二支柱（AUKUS Pillar Two）面向下一代能力建设的合作框架，试验由DSTG协作开展并获得澳大利亚政府先进战略能力加速器的支持；澳政府为本项目投入约

270万澳元，经费体系未来十年规划在相关新技术上累计投入上限约38亿澳元，试验结果将与美国与英国共享以促进防务协同；量子钟作为高精度计时基准可用于军事网络同步、GPS干扰与欺骗识别，并在GPS不可用或受阻环境中支撑可靠导航，从而提升AUKUS军队在抗拒止条件下的独立与有效行动能力。

10.英国皇家海军在水下自主潜艇上首次部署量子光原子钟。

StockTitan网站2025年10月28日报道，美Infleqtion公司与英国皇家海军及MSubs公司合作，成功在水下自主潜航器上首次部署量子光原子钟，该试验将Infleqtion公司的Tiqker光原子钟整合到皇家海军的Excalibur（XCal）试验潜艇上，验证了其在无GPS环境下对定位、导航与授时（PNT）至关重要的精确授时能力。由于潜艇无法完全依赖全球导航卫星系统（GNSS），传统微波时钟虽稳定但会随时间累积漂移，而Tiqker这类高精度本地时钟能自主维持精确授时与导航，减少对外部信号依赖，此次试验中其为潜艇提供稳定“时间心跳”，降低导航漂移，还可作为声呐、火控和保密通信等关键系统的精确参考，且经多次下潜验证了可靠性。皇家海军相关负责人、Infleqtion英国总经理及MSubs工程总监均对此次突破及量子技术在海军领域的应用前景表示认可，该合作也彰显了英国在将下一代量子系统整合到

国防平台方面的领先地位。

11.麻省理工学院物理学家团队开发全局相位光谱学方法，成功将光学原子钟精度提升一倍并有望实现可运输部署。

麻省理工学院网站2025年10月8日消息，麻省理工学院物理学家团队于2025年10月8日在《自然》期刊发表研究成果，成功将光学原子钟精度提升一倍。该研究由莱斯特·沃尔夫物理学教授弗拉丹·武勒蒂奇（Vladan Vuletić）领导，第一作者为莱昂·扎波尔斯基（Leon Zaporski），核心成员包括刘琦、古斯塔沃·维莱斯、马修·拉齐霍夫斯基、李泽洋、西蒙·科伦坡和埃德温·佩德罗索-佩尼亚菲尔，均隶属麻省理工-哈佛超冷原子中心和麻省理工电子研究实验室。研究获美国海军研究办公室、国家科学基金会、国防高级研究计划局等多家机构资助。团队开发的“全局相位光谱学”（global phase spectroscopy）技术，核心在于通过降低量子噪声提升光学原子钟稳定性。当前主流铯原子钟振荡频率超过每秒100亿次，而下一代镱原子光学钟理论频率可达每秒100万亿次，快1万倍，但激光稳定性始终是瓶颈。该团队在2020年首次通过量子纠缠技术降低测量不确定性，2022年进一步开发“时间反演”技术放大频率差异，但均局限于微波频段。本次突破在于将时间反演方法成功应用于光学频段，并利用此前被忽视的“全局相位”

现象。研究发现，激光穿过纠缠原子使其能量跃迁后回落至原始能级时，原子保留的相位记忆取决于激光频率，可用于测量激光与原子跃迁频率之差。该方法结合量子放大技术，将微小差异放大至量子噪声极限之上，使光学原子钟可分辨的频率差异缩小近一倍，精度实现倍增。团队预期精度将随原子数量增加而稳步提升。武勒蒂奇教授指出，该技术的关键价值在于实现可运输光学原子钟，可部署至暗物质探测、基本作用力验证、地震预测等应用场景。扎波尔斯基表示，该方法将降低技术实现难度，推动稳定可运输原子钟的实用化。

12.澳大利亚悉尼大学团队在量子传感技术上取得新突破，或将解决GPS盲区导航难题。

Interesting Engineering网站2025年9月25日报道，悉尼大学的科学家近期在量子传感领域取得了一项重要突破，他们通过一种新方法重塑了量子不确定性，成功绕过了著名的海森堡不确定性原理所施加的部分限制。这项研究为开发用于探测微弱信号的超高精度量子传感器奠定了基础，尤其在军事和航天领域展现出巨大的应用潜力。研究团队将量子不确定性比作一个气球内的空气：虽然无法被完全移除，但可以被“挤压”和转移。基于此，他们将不可避免的量子不确定性推向了测量中不太重要的维度，从而能够以前所未有的精度测量其关注的核心细节。实验中，研

究人员利用单个囚禁离子的微小振动运动，并将其置于最初为纠错量子计算而开发的“网格态”，成功实现了对粒子位置和动量的同时测量，其精度超越了传统经典传感器所能达到的“标准量子极限”。这项技术最重要的应用之一是为在GPS信号无法覆盖的环境中运行的平台提供精确导航。对于潜艇、地下设施或深空飞行器等长期面临自主导航挑战的军事及航天平台而言，这种新型量子传感器能够提供不依赖外部信号的可靠定位与导航能力。此外，该技术还可用于增强生物医学成像、监测材料与引力系统以及探索基础物理学等领域。尽管该技术目前仍处于实验室阶段，但它已展示了一个全新的传感技术框架。它并非旨在取代现有方法，而是作为一种强大的补充工具，为量子传感工具箱增添了新的能力。

13.英国格拉斯哥大学发布报告《下一代定位、导航与授时（PNT）的量子技术》。

2025年9月16日，英国格拉斯哥大学发布报告《下一代定位、导航与授时（PNT）的量子技术》。报告总结了由英国量子赋能PNT中心（QEPNT Hub）与皇家导航学会联合举办的“下一代PNT的量子技术”研讨会成果。会议旨在应对英国对全球导航卫星系统(GNSS)的过度依赖，并与国家“量子任务4”（Quantum Mission 4）战略对齐，通过汇集产学研及国防各方，为量子PNT技术的发展制定路线图。报

告的核心成果是将量子PNT技术的应用划分为短、中、长期三个阶段。短期（1-3年）优先发展量子增强时钟和不依赖GNSS的导航演示；中期（3-7年）聚焦于量子惯性传感器在铁路和自动驾驶等领域的商业化；长期（7年以上）则展望通用的混合量子导航系统和下一代星载量子钟的部署。为实现这一蓝图，报告指出了五大关键挑战。首要制约是必须大幅降低量子系统的尺寸、重量、功耗和成本(SWaP-C)。此外，建立自主可控的供应链、制定行业互操作性标准、完善性能评估体系以及发展成熟的量子系统工程，是确保技术从实验室走向实际应用、并能可靠集成到现有体系的必要条件。报告最后明确，QEPNT中心将通过组织社区活动、成立特别兴趣小组制定技术路线图，以及实施人才培养计划等措施，持续推动产学研合作，加速量子PNT技术的商业化与实地应用。

14.美空军探索原子钟技术，确保无人机群在GPS受扰时仍能运行。

Interesting Engineering网站2025年9月8日报道，根据美国空军研究实验室（AFRL）发布的一份最新信息征询书，美国空军正寻求利用原子钟技术，为无人机蜂群开发不依赖全球定位系统（GPS）的先进定位、导航与授时（PNT）系统。该计划的核心是一个名为“联合多情报源精确参考”（JMPR）的加固测试平台，其集成了“下一代原子钟”

(NGAC)，能够达到亚纳秒级的授时精度。通过这种极高的精确度，无人机群即使在“冷启动”且无GPS信号的恶劣环境中，也能建立一个去中心化的PNT架构，实现位置和时间的共享与同步。这种能力使无人机群能够作为一个连贯的整体系统来行动，而非一群独立的无人机。AFRL对此项技术提出多项关键要求，包括：实现亚纳秒级授时精度以进行完美协同；具备对抗GPS干扰和欺骗等电子战攻击的韧性；满足小型无人机严格的尺寸、重量和功率（SWaP）限制；以及系统具备从少数几架扩展至数百架无人机的可扩展性。此外，该系统还需支持协调打击、传感器融合和情报共享等多样化任务，赋予蜂群在对抗环境下执行复杂任务的灵活性。若此项技术研发成功，将显著降低美国军方对GPS的依赖，并改变无人系统在未来高风险对抗环境中的作战模式。它将使美军无人机群即使在卫星信号不可用的情况下，也能通过快速通信与精准协调保持作战优势。

15.美军在导航领域推进量子技术应用以突破传统GPS局限。

YourSurvivalGuy网站2025年8月28日消息，美国军方在导航技术领域取得重大进展，通过量子技术来克服传统全球定位系统（GPS）的局限。一方面，美国国防高级研究计划局（DARPA）启动“稳健量子传感器（RoQS）”项目第一阶段，旨在研发能适应实战环境的量子传感器——该传

感器虽在磁场、电场、加速度等测量精度上具有优势，但易受振动、电磁干扰影响，项目通过重新设计传感器而非依赖屏蔽或隔离等临时方案提升其固有稳健性，首阶段将打造紧凑型“即插即用”量子传感器并在政府提供的直升机上测试，以验证其应对强电磁、振动等复杂环境的能力；联合国防工业界明确量子传感器可发挥战略价值的国防部记录项目及平台类型，为第二阶段奠定基础，后续还计划将传感器集成到实际军事平台。另一方面，美国军方于2025年8月21日借助X-37B空天飞机在轨道上首次测试量子惯性传感器，该技术利用超冷原子和量子物理原理，可实现不依赖GPS的高精度导航，适用于太空、水下及GPS信号被阻断或欺骗的冲突区域，此前NASA“冷原子实验室”等项目虽验证了太空原子干涉测量原理，但未聚焦导航，此次X-37B测试若成功，有望推动太空导航实现重大突破。

16.澳大利亚Q-CTRL公司与美洛·马公司将合作为DARPA开发量子导航。

GPSWORLD网站2025年8月27日消息，澳大利亚量子软件公司Q-CTRL获得美国国防高级研究计划局（DARPA）“稳健量子传感器（RoQS）”项目两份价值2440万美元的合同，将联合美国洛克希德·马丁公司（作为分包商）开发下一代量子导航传感器，用于高性能军事车辆等实际场景。该技术依托Q-CTRL经实地验证的量子传感技术及专有

AI驱动的软件加固技术，能在移动的国防平台上可靠运行，无需传统屏蔽或隔离，可应对复杂现实环境，作为GPS的补充方案，具备抗外部干扰、填补覆盖空白的能力。DARPA启动RoQS项目旨在加速量子传感器在实际国防应用中的开发、测试与验证，以应对环境干扰、机械振动和强重力等影响。Q-CTRL公司的“Ironstone Opal”量子导航系统近期在飞行测试中表现优于高端惯性导航系统，GPS不可用时定位精度提升至多111倍，还在澳大利亚皇家海军“MV Sycamore”号上完成海事试验验证。此外，两家公司曾于2025年3月获美国国防部创新部门（DIU）合同，研发量子增强惯性导航系统原型。

17.美国国防高级研究计划局正推进QuANET项目，旨在实现未来量子设备与当前经典网络的互操作。

防务一号网站2025年8月19日报道，美国国防高级研究计划局（DARPA）正推进QuANET项目，旨在实现未来量子设备与当前经典网络的互操作。该项目负责人艾莉森·奥布莱恩（Allyson O’ Brien）指出，网络连接一直是量子研究的“短板”，该项目核心挑战是将量子系统整合到现有通信基础设施中，探索量子设备作为传感器、更优计时器及新型数据载体的应用，借助量子通信固有的安全特性保护美国机密，其定位类似催生现代互联网的阿帕网（ARPANET）。QuANET暂不将量子计算纳入整合重点，

当前聚焦量子时间同步、量子传感与计量数据向现有网络的传输，例如探索量子传感器提升信道监测能力，解决传统信道监测需额外硬件且占用通信带宽的问题，实现传感与通信的整合，以保障医院、金融机构等关键基础设施通信顺畅并增强安全性。项目另一关键成果是量子网卡（qNIC），其可规范量子信息通道与传统节点的适配，实现量子信号和信息的有效共享，未来有望接入普通笔记本电脑，避免额外设备投入；研发中需优化纠错能力与比特率，初期面向政府用途规模化应用。QuANET分三阶段推进，总周期60个月（5年），目前处于第一阶段（已完成qNIC设计提交），第二、三阶段将分别研究光纤基础设施适配与空基链路扩展，该项目不同于当前量子网络研究，更贴近技术落地，致力于推动量子技术整合与实用化。

18.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。

19.美太空军X-37B空天飞机将于8月执行第八次任务，

以测试量子导航技术。

2025年7月28日消息，美国太空部队宣布其神秘的X-37B空天飞机将于下月执行第八次任务，此次发射不早于8月21日，将由猎鹰9号火箭从佛罗里达州肯尼迪航天中心发射。X-37B由波音公司制造，外形类似小型航天飞机，目前有两架在役，首架于2010年4月首次飞行，此后这两架无人航天器多次执行长时间飞行任务，其中首架在2020年至2022年期间完成了长达908天的飞行，第二架则于2025年3月7日在范登堡太空军基地着陆，此前在轨道上运行了434天。此次任务将测试量子导航技术。波音公司此前曾在常规飞机上测试过一种量子惯性测量单元，该设备利用原子干涉测量技术检测旋转和加速度，现该技术的先进版本将被送入太空，以验证其可行性。此次太空测试的目标是在GPS服务不可用的环境中，展示精确定位、导航和计时能力。

20.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。

21.六国科学家完成10台光学时钟协同比对实验，为2030年国际单位制秒的重新定义提供关键技术验证。

Interesting Engineering网站2025年7月10日报道，2025年6月，由69名科学家组成的欧洲-日本联合团队完成了迄今最大规模的光学时钟比对实验。该项目历时45天，横跨芬兰、法国、德国、意大利、英国和日本六国，利用卫星信号和超稳定光纤连接互联10台光学时钟，完成38次频率比测量，一致性水平达到前所未有高度。其中4次直接比对系全球首次，验证了构建全球光学时间标准的可行性。意大利国家计量研究所高级研究员Marco Pizzocaro指出，这些测量为光学时钟达到国际计时所需精度和可靠性提供了关键数据。该实验还创建了一个分布式实验室网络，可用于暗物质搜寻等基础物理测试。技术层面，项目采用多链路混合架构。

GPS卫星信号实现全球连接，但受信号噪声和大气干扰限制，精度有限。定制光纤链路连接法、德、意三国时钟，精度比卫星方法高出100倍。英国和德国境内采用短距离光纤进行同机构比对，进一步提升测量稳定性。芬兰VTT MIKES高级科学家Thomas Lindvall强调，多时钟协同比对和多链路技术相比传统成对比对方式，能提供更多信息并验证一致性，有助于确定新秒定义应采用的光学时钟类型。英国国家物理实验室首席科学家Rachel Godun表示，虽然实验中观察到部分不一致现象，但多时钟多链路架构使问题溯源更加容易。国际单位制秒的重新定义预计于2030年实施，研究成果已发表于《Optica》期刊。

22.美国Adtran公司发布新型光学铯钟以提升网络授时精度。

Defense Advancement网站2025年7月9日报道，美国Adtran公司于近期发布了其Oscilloquartz光学铯原子钟产品组合的两款新成员——OSA 3200 SP和OSA 3250 ePRC，旨在将高精度授时技术推广至更广泛的网络应用环境。这两款新产品利用先进的光泵技术，为电信运营商、数据中心、电力设施及国防网络等关键领域提供了现代化同步基础设施的解决方案。新时钟提供了更强的保持能力（holdover），并简化了维护流程，其设计使用寿命长达10年，比传统磁泵ePRC时钟延长了两年。通过采用将激光组件置于真空室

外的独特专利技术，新时钟不仅实现了紧凑的物理封装，还显著降低了维修的复杂度和系统总成本。此次推出的两个型号针对不同的应用需求。OSA 3200 SP是一款标准性能（SP）铯钟，主要面向需要成本优化的PRC（主参考时钟）级应用；而OSA 3250 ePRC则专为对保持能力有更高要求的定位、导航和授时（PNT）应用而设计。这两款光学铯钟的推出，旨在为市场提供传统磁泵时钟的替代方案，以应对后者日益凸显的维护难题和供应链风险。新产品与Adtran的旗舰型号共享超过95%的电子器件，确保了部署的兼容性和较低的运营风险，使更多运营商能够以更低的成本获得光学铯钟技术带来的高精度、长寿命和现代化管理能力。

23.澳大利亚阿德莱德大学研发的量子钟实现海上导航重大突破，精度远超GPS。

phys.org网站2025年7月8日报道，澳大利亚阿德莱德大学的研究团队成功研发出便携式光学量子钟，并在海军演习中证明其导航精度远超现有全球定位系统（GPS）。这项在2022年7月于夏威夷附近举行的环太平洋（RIMPAC）海军演习中完成的测试，标志着光学原子钟首次在海环境中成功部署并展现卓越性能。当前的通信和定位应用严重依赖GPS提供的时间信号，但在复杂环境中，GPS信号易受干扰或欺骗，导致时间同步能力迅速下降。为了应对这一挑战，阿德莱德大学光子学与先进传感研究所（IPAS）与

国防科技集团（DSTG）合作，开发了这款坚固耐用的便携式时钟，旨在为澳大利亚国防军（ADF）提供一个在GPS失效时仍能可靠运行的主权授时解决方案。该量子钟技术的核心是利用密封单元内的低压铷（rubidium）和镱（ytterbium）原子气体。通过特定颜色的激光对这些原子进行探测，系统能够提取信息并精确控制激光波长，从而产生极其纯净和稳定的时间信号。在为期三周的海上实地演习中，阿德莱德大学的量子钟在与全球其他顶尖量子技术同场竞技时，性能表现位居前列。其测量精度比现行国际标准高出20至200倍。此次海上测试的成功验证了该技术的稳定性和可靠性。未来，这项技术不仅有望应用于下一代GPS卫星星座或高频金融交易等领域，其相关知识产权和技术也正通过与本地量子技术公司Quantx Labs的合作，从研究领域转向产业化应用。该项研究的完整成果已于近期发表在《自然通讯》期刊上。

24.美国Adtran发布低成本光泵铯钟，强化国防等关键领域授时能力。

雅虎财经网站2025年6月24日报道，美国ADTRAN控股公司于近期宣布，扩展其Oscilloquartz光泵铯原子钟产品组合，推出了OSA 3200 SP和OSA 3250 ePRC两款新型原子钟。这些新型号旨在通过提供成本更低的光泵浦铯技术，使高精度授时在更广泛的网络环境中得到应用。新产品采用先

进的光泵浦技术，与传统的磁选态铯钟相比具备显著优势。其主要特点包括更优的保持能力、简化的维护流程以及长达10年的典型使用寿命，比传统磁选态ePRC钟延长了2年。该技术解决方案适用于电信运营商、数据中心、电力设施及国防网络等关键领域，旨在帮助用户以更低的成本和运营复杂度，实现同步基础设施的现代化。据称，Adtran是目前唯一提供光泵浦铯钟解决方案的供应商。此次推出的低成本方案，将使更多用户能够受益于该技术在精度、寿命和现代可管理性方面的优势，从而为构建更具弹性、更安全的国家关键授时基础设施提供支持。

25.英国Aquarkj技术公司与英国皇家海军合作，完成了全球首次冷原子原子钟海上试验。

Inside GNSS网站2025年6月24日消息，英国Aquarkj技术公司（Aquark Technologies）与英国皇家海军合作，在“追击者”号（HMS Pursuer）舰艇上完成全球首次基于冷原子技术的原子钟海上试验。此次由英国皇家海军颠覆性能力与技术办公室（DCTO）支持的试验中，Aquark公司的AQlock原子钟系统在公海恶劣条件下连续运行三天，验证了其稳定性。该技术通过将冷却至接近绝对零度的原子稳定性转移至传统振荡器，减少长期漂移，可在无需全球导航卫星系统（GNSS）校正的情况下长时间保持高精度，助力降低军事、通信、交通等领域对卫星导航的依赖。

AQlock的研发得益于英国创新署（Innovate UK）的小企业研究计划（SBRI）资助，其核心“超微阱”（supermolasses trap）技术具有鲁棒性强、便携且成本低的特点，组件数量和功耗优于同类方法，适合小型化应用。英国国防科学与技术实验室（Dstl）为试验提供了时间频率测试设备与专业支持，皇家海军海岸部队中队指挥官指出，此次试验利用P2000近岸巡逻舰模拟真实挑战环境，验证了该量子技术在实际部署中的应用潜力。

26.印度将用自主原子钟系统替代GPS时间同步，保障关键领域安全。

2025年6月18日，印度消费事务部长普拉哈德·乔希宣布，印度即将停止依赖美国GPS进行国家时间同步，转而启用自主研发的原子钟网络，为导航、国防、金融等关键领域提供本地化高精度时间基准。这是印度提升技术主权、降低对外依赖的重要举措。官方介绍，该系统由分布在古瓦哈蒂、班加罗尔、艾哈迈达巴德、法里达巴德和布巴内什瓦尔五地的高精度原子钟组成，已完成测试，即将正式投入运行。新系统具备纳秒级同步能力，将作为唯一强制的时间来源，覆盖所有商业实体、银行及机构，确保国内操作具备统一且权威的时间戳，防止因时间标准分歧导致的法律或金融风险。印度这一举措的部分动因，源于历史上因美方拒绝GPS数据支持所带来的军用障碍。官方强调，

面向未来，独立掌控国家核心时间基准将有效防范外部干扰，保障航天、武器发射等高敏感业务的时基安全。此举也与俄罗斯、中国等大国同步，响应全球核心基础设施自主可控趋势，成为印度“自力更生”战略（Atmanirbhar Bharat）中的关键一环。

27.英国皇家海军测试新型原子钟技术，有望终结卫星信号干扰威胁。

每日电讯报2025年6月17日报道，英国皇家海军近日成功测试了一项突破性的量子原子钟技术，该技术有望终结针对卫星导航系统的恶意干扰攻击。这项被誉为世界首创的技术在HMS Pursuer号舰艇上完成了为期三天的海上试验。传统上，皇家海军的舰艇时钟依赖卫星信号来确定时间，但这种方式容易受到干扰和破坏。新开发的AQlock原子钟大约只有鞋盒大小，无需依赖传统的定位、导航和授时系统（主要通过全球导航卫星系统GNSS提供），能够独立确定时间。英国政府此前警告称，过度依赖GNSS系统使其容易受到信号干扰攻击和欺骗攻击的威胁。由量子传感专家Aquark Technologies公司制造的这款时钟，通过比较时钟滴答声频率与原子频率来检测任何时间变化，无需依赖GNSS的时间校正。该设备的关键优势在于它被部署在接近作战和操作点的位置，而非发射到太空中，因此相比距离地面约2万公里的典型卫星，它不易受到干扰攻击。通过在舰艇

上连续运行的成功演示，该技术展现了减少军事行动、基础设施、电信、金融、交通运输等多个领域对GNSS全球依赖的潜力。Aquark Technologies首席执行官亚历克斯·詹岑博士表示，这是一种地面导航替代方案，未来可能不再需要卫星。该技术的核心是将原子保持在 $-273.149996^{\circ}\text{C}$ 的超低温下，以确保原子特性的精确测量和时钟的稳定运行。该项目得到了英国国防部防务科学技术实验室的支持，标志着量子系统在实际部署环境中的重要进展。

28.美国科罗拉多大学研发出新型量子三维导航仪。

科学博客网站2025年6月11日报道，美国科罗拉多大学科学家研发出一种全新量子导航设备，可在无需GPS信号的情况下，实现对三维空间加速度的高精度测量。该装置采用温度接近绝对零度的玻色-爱因斯坦凝聚态（BEC），通过激光操作实现原子的高灵敏干涉测量。与传统加速度计只能测量单一方向不同，这一量子干涉仪能同时捕捉三个维度的运动信息，为未来潜艇、航天器及自主系统在复杂环境下的精准导航提供了突破性方案。设备核心创新在于通过复杂的激光和AI算法操控数万枚铷原子，利用原子波的叠加与干涉效应，实现对不同加速度向量的“指纹”式识别。输出的49通道数据网格能精确区分不同方向和强度的运动，极大提升导航和探测能力。研究团队采用机器学习优化激光控制序列，不仅大幅提升了实验效率，还为量

子装置小型化、便携化奠定基础，预计未来可实现现场部署。实验已成功实现两轴方向、2g强度的加速度同步测量，并显示出优于传统机械传感器的寿命和稳定性优势。设备具有高度可编程性，可按需切换为加速度计、陀螺仪或重力梯度仪，并采用贝叶斯统计算法，大幅提高单次测量的信息提取效率，为即时、多参数的物理量测量提供了新范式。目前，该设备已获得美国国家航空航天局（NASA）550万美元投资，未来应用前景包括GPS受限环境下的高精度导航、引力波探测、基础物理测试等。

29.印度初创企业QuBeats获国防部3百万美元资助，将为印度海军研制自主可控的量子定位系统。

印度防务研究之翼网站2025年6月8日报道，印度量子科技初创企业QuBeats近日荣获印度国防部IDEX ADITI 2.0国防创新基金，获得2500万卢比（约合300万美元）拨款，用于为印度海军研制自主可控的量子定位系统（QPS）。该系统将采用自主研发的高精度量子磁力计技术，可在GPS信号受阻或被干扰的环境下，实现高效、准确的导航，为现代军事行动提供关键保障。QuBeats的创新量子传感器打破传统局限，利用地球独特磁场异常信号进行定位，能实现全天候、全环境自主导航。QuBeats由一支由物理学家、工程师和国防技术专家构成的团队创立，目前正通过种子轮融资加速产品研发。其产品组合涵盖量子磁力计、量子陀

螺仪、微型原子钟、Rydberg雷达及高灵敏目标探测器等，广泛应用于军事及关键民用领域。公司创始团队表示，获得本次ADITI 2.0挑战赛冠军，是对其技术路线的高度认可，更是印度量子技术自强不息的有力宣言。

30.德国启动国家级光纤网络建设，提升高精度时间与频率传输能力。

Quantum Zeitgeist网站2025年6月7日报道，德国宣布计划在未来十年内建设国家光纤基础设施“QTF-Backbone”，以实现高精度时间与频率信号的全国性分发。该项目将扩展现有的欧洲光纤网络，在为科研与工业提供可扩展服务的同时，致力于建立一个覆盖全国乃至全欧洲的时间与频率传输枢纽。多家德国顶尖学术和科研机构的专家联合提出，通过专用的国家级光纤网络，广泛实现量子信息及高精度时间与频率信号的分发，推动相关领域从实验室演示迈向大规模、实用化应用。此次QTF-Backbone计划由德国马克斯普朗克核物理研究所、国家科研与教育网络（DFN）、物理技术联邦研究院（PTB）、波恩大学、埃尔朗根-纽伦堡大学、杜塞尔多夫大学等机构专家共同推进。根据最新发布的提案，该网络不仅将大幅提升德国境内乃至欧洲的同步精度，还将为量子通信技术的发展提供基础支撑。在欧洲范围内，基于光纤网络的泛欧时间与频率传输基础设施已投入运行。新一代光纤网络采用波分复用等

技术显著提升数据传输容量，并为量子密钥分发（QKD）等新兴加密手段提供支撑，实现安全通信能力的根本性提升。德国PTB等国家计量院校，在网络的标准维护和精度溯源中发挥着核心作用。

31.美国Infleqtion公司获1亿美元融资，加速原子级量子技术国防应用部署。

2025年6月2日，美国量子科技公司Infleqtion宣布完成1亿美元C轮融资，由Glynn Capital、摩根士丹利Counterpoint Global、S32、SAIC等知名机构投资。Infleqtion以原子为基础，专注量子计算、感知和高精度授时等领域，现已在全球多项政府及商业项目中部署相关系统，2024年营收近3000万美元，客户储备突破2亿美元。新一轮资金将用于扩大原子级量子平台的应用规模，加速现场可用量子系统在国防与智能系统等关键领域的落地。该公司研发的中性原子量子计算机“Sqale”已落户英国国家量子计算中心，同时成为日本国家“量子登月”计划唯一外籍合作企业。Infleqtion近期通过自研Superstaq编译器及Nvidia CUDA-Q平台实现材料科学突破，并推出面向国防和生物科技的量子启发AI系统CML。在定位、导航和授时（PNT）领域，Infleqtion的原子钟已实现对传统系统百倍精度提升，并获美国国防部1100万美元创新合同，现已应用于NASA和美军关键任务之中。通过与SAIC等战略伙伴深度协作，Infleqtion

正推进量子感知、原子钟、量子射频通信及惯性导航于国防和航空航天领域的扩展应用。公司计划在北美、英国、澳大利亚等地加快部署，巩固其在量子安全、关键基础设施和智能系统市场的领先地位。此次融资还获得In-Q-Tel、NSSIF、Breakthrough Victoria等多家战略资本支持，展现出其在国家安全和前沿科技市场中的高度认可。

32.芬兰将牵头开发欧盟量子防务项目。

Quantum Insider网站2025年6月2日消息，芬兰国防部于5月31日宣布将牵头一项欧盟新计划——“量子技术助力战略优势”（Quantum Enablers for Strategic Advantage, QUEST），旨在探索量子技术在国防领域的应用，重点聚焦于定位、领土监视以及防空和导弹防御等方面，以借助下一代技术提升欧洲的防务能力。芬兰国防部长安蒂·哈卡宁（Antti Häkkinen）表示，芬兰在量子技术领域拥有前沿专业知识和先进的生态系统，将致力于把量子技术融入国防能力建设。该项目是欧盟“永久结构性合作”（PESCO）第六批项目之一，由芬兰与德国、丹麦、拉脱维亚和意大利合作开展，瑞典、希腊和荷兰作为观察员参与。该项目目标之一是开发独立于全球导航卫星系统（GNSS）的高精度定位、导航和授时（PNT）系统。此项目将由芬兰VTT技术研究中心和芬兰国防管理部门共同实施，体现了欧盟通过整合资源、提高互操作性和强化国防技术

工业基础来加强欧洲防务合作的努力，随着该项目的加入，PESCO项目总数已达75个。

33.美智库新美国安全中心发布报告《原子优势：加速美国量子传感技术，助力下一代定位、导航和授时》。

2025年5月28日，美智库新美国安全中心（CNAS）发布了报告《原子优势：加速美国量子传感技术，助力下一代定位、导航和授时（PNT）》，报告由康斯坦萨·M·维达尔·布斯塔曼特博士撰写。报告深入探讨了美国在新一代PNT领域中量子传感技术的战略地位与发展现状。当前，全球定位系统（GPS）广泛支撑军事、民用和关键基础设施，但其脆弱性不断暴露，面临电子干扰、欺骗攻击和反卫星武器威胁。量子传感器因能利用原子固有的、不可篡改的物理属性，成为极具前景的PNT替代方案；其在测量精度、长期稳定性和抗干扰方面远超传统手段，有望在无GPS信号甚至对抗性强的环境下实现高可靠PNT。美国2018年《国家量子倡议法案》推动联邦量子研发投入增长，学术与产业生态活跃，但在资金持续性、供应链韧性、生产能力和政府统筹上仍存显著短板。相比之下，中国量子传感研究扩张迅速，战略定力强，制造能力突出，有望弯道超车。报告全面梳理了量子时钟、加速度计/陀螺仪、重力仪和磁强计等主流传感器的原理、性能、应用前景与工程挑战，指出美国虽具全球领先的研究和产业基础，但碎片化管理、

私募资本不足和供应链单一等风险可能阻碍其技术落地与规模化部署。报告建议美国加快推进军事平台应用、强化量子器件本土供应链、促进量子PNT向民用基础设施拓展，并培育跨学科人才和创新生态，以确保未来在量子科技领域的持续领导地位。

34.LEO-PNT可行性分析：卫星导航载荷的尺寸、重量及功率分析（LEO-PNT Feasibility Aspects: Satellite Navigation Payload Size, Weight, and Power Analysis）

2025年5月19日，本文针对低地球轨道定位、导航与定时（LEO-PNT）系统的可行性问题，开展了卫星导航有效载荷的尺寸、重量与功率（SWaP）综合分析。研究背景源于LEO卫星在增强全球导航卫星系统（GNSS）鲁棒性、可靠性与抗干扰能力方面的潜力，但其大规模部署的可行性仍受制于高昂成本与技术挑战。为此，作者提出了两种基于商用现成组件（COTS）的有效载荷设计方案——低SWaP与高SWaP配置，分别面向单频与双频导航信号生成，并兼顾时钟稳定性、信号质量与天线性能。研究方法包括对时间同步模块、GNSS模块、导航信号生成模块等关键组件的详细调研与选型，结合链路预算、功率预算与质量预算模拟，评估了两种设计在载噪比（ C/N_0 ）、时钟稳定性（艾伦偏差）与几何精度因子（GDOP）等方面的性能。结果表明，低SWaP有效载荷（功率36 W，质量1.1 kg）依赖

芯片级原子钟（CSAC）与GNSS信号频繁同步，自主运行时间约100分钟；高SWaP有效载荷（功率77 W，质量2.6 kg）采用超稳振荡器（USO）与铷原子频标（RAFS）冗余设计，自主运行时间可达24小时，且双频操作显著提升了电离层误差校正能力。创新点在于提出了适用于小卫星平台的新型LEO-PNT有效载荷架构，开发了自定义等通量天线以实现100°视场角覆盖，并设计了包含132颗卫星的Walker Delta星座（800 km轨道），在75° S至75° N纬度范围内实现四重全球覆盖。与现有商业LEO-PNT系统（如Iridium、PULSAR等）的对比显示，本文设计在SWaP与导航性能上具备竞争力，尤其通过宽波束天线减少了星座规模。文末指出未来可通过多层轨道优化进一步提升极地覆盖，并建议开展在轨演示验证以推动LEO-PNT实际应用。

35.欧洲航天局在国际空间站安装世界上最先进的原子钟。

InnovationNewSnetwork网站2025年4月28日报道，欧洲航天局（ESA）在国际空间站（ISS）上安装了全球最先进的原子钟系统——“空间原子钟组合”（ACES），这是精密科学领域的历史性突破。ACES于2025年4月21日搭乘SpaceX猎鹰9号火箭发射，4月25日由ISS上的加拿大机械臂部署在ESA“哥伦布”实验舱朝向地球的一侧，计划运行30个月，汇聚了迄今送入太空的最精准原子钟，旨在以极高

精度计时、突破基础物理边界、变革全球计时方式并助力重新定义人类对时间的测量。原子钟是基于原子振动（通常为铯或氢原子）计时的高精度设备，依托原子跃迁的稳定频率，数百万年才误差一秒，区别于依赖机械部件或石英振动的传统时钟，对GPS、深空导航、电信及物理定律验证实验至关重要。ACES由空客公司牵头欧洲企业研发，搭载法国国家空间研究中心（CNES）的铯喷泉钟PHARAO与瑞士赛峰计时技术公司的空间氢脉泽两种创新计时装置，结合精密微波与激光链路，能实现太空到地球的超高精度时间传输；通过连接地球与轨道上的时钟，它将构建时钟网络，助力科学家探索时间本质、验证爱因斯坦广义相对论预测，并为下一代光学时钟重新定义“秒”奠定基础。ESA ACES项目科学家西蒙·温伯格表示，该复杂且重要的项目历经多年努力终入太空，是ESA与科学界的重大成就，也是ESA在ISS上的“皇冠明珠”。ACES于4月28日首次启动，工程师将建立与地面站的通信链路、稳定热系统以备战状态；未来六个月将进入严格调试阶段，校准设备并测试时间传输能力，预计时间比对精度可达10飞秒（10的负15次方秒），比现有GPS系统高10至100倍；调试结束后将进入两年科学阶段，为基础物理研究提供新见解并革新时间测量科学。

36.英国研发出本国首台量子钟。

Interesting Engineering网站2025年4月2日报道，英国在高度机密的国防科学与技术实验室（Dstl）研发出本国首台量子钟，该量子钟精度极高，数十亿年误差不足一秒，主要功能是提供高度安全且稳定的时间源，以提升英国情报与侦察行动能力，Dstl首席执行官保罗·霍林斯黑德称其是英国量子技术能力的重要成果。目前军事行动严重依赖易受干扰的GPS技术，而这款量子钟能作为更安全可靠的导航与计时替代方案，英国国防部指出其将减少对GPS的依赖，推动情报、监视与侦察能力飞跃，还可提升GPS精度以改善全球导航系统（助力卫星通信、飞机导航等）、强化军事通信网络安全（加密与同步需精准计时），并大幅提高制导导弹等先进武器系统精度（轨迹计算和协同攻击依赖精准计时），在网络战等对时间敏感的作战领域为英军提供战略优势。英国国防部计划未来五年部署该技术，目前正在推进其小型化以实现量产，进而整合到各类军用车辆、飞机等装备中；需注意的是，它并非全球首台量子钟，美国科罗拉多大学博尔德分校约15年前就已研发出量子钟。此外，英国国防部通过Dstl已投入超3400万美元，确保量子技术新突破融入主流国防与安全行动，皇家海军首席技术官办公室未来技术官员马特·斯蒂尔指挥官表示，未来几年量子技术与GPS协同应用，将在作战效能、生存能力、导航及打击能力上为英军带来行动优势。

37.美国橡树岭国家实验室成功研发出首款集成关键量子光子组件的“一体化芯片”。

SciTechDaily网站2025年3月29日报道，美国橡树岭国家实验室（ORNL）的科学家成功研发出首款集成关键量子光子组件的“一体化芯片”，该成果发表于《Optica Quantum》期刊。这款芯片首次在单芯片上整合多种量子光子功能，能生成并操控纠缠光子，可产生与光纤网络兼容的宽带纠缠量子比特（qubits），其核心组件包括用于生成纠缠光子对的微环谐振器和根据光偏振分离光路的偏振分束旋转器，可通过光波振动方向在宽波长光谱上编码信息。芯片支持超116个不同传输信道（光波颜色），其中超100个信道保真度高，创纪录水平，还可能借助微环谐振器生成“超纠缠量子比特”（在偏振、颜色等多维度纠缠），提升信息承载能力。该芯片可利用现有光纤基础设施传输量子信息，无需大规模新建硬件，且能按标准规格量产，降低量子互联网的成本与复杂度，推动其从桌面演示走向实用化。研究获美国能源部先进科学计算研究项目、国家科学基金会及空军研究实验室支持，为构建可扩展量子互联网奠定重要基础。

38.洛克希德·马丁公司、Q-CTRL公司和AOSense公司合作开发用于无GPS环境的量子导航系统。

Quantum Insider网站2025年3月13日报道，洛克希

德·马丁公司宣布获得美国国防部国防创新部门（DIU）的合同，将研发量子赋能惯性导航系统（QuINS）原型，该系统无需依赖GPS即可实现精准定位追踪，能应对卫星导航不可用或不可靠的对抗环境。QuINS借助量子传感技术，通过内部测量极高精度地测算运动，得出位置、速度和方位，可解决现代导航系统依赖GPS易受干扰或信号丢失的问题，在军事应用中优势显著。洛克希德·马丁公司将与量子控制工程公司Q-CTRL（提供量子控制专业技术，此前获该公司风投部门投资，有量子控制解决方案研发经验）及高性能量子传感器开发商AOSense（擅长设计制造基于超冷原子特性、能高精度测量加速度与旋转的原子量子传感器）合作，推动量子导航从研究走向实际部署。合同初始阶段将在真实环境中测试QuINS，评估其军事应用可行性，探索对国防导航策略的影响，该项目契合美国国防部开发抗干扰PNT解决方案、减少GPS依赖的举措，若成功，有望成为未来军事及民用导航技术的基础。

39.美国防高级研究计划局启动“稳健量子传感器”项目，旨在研发能在抵御环境干扰的同时保持高灵敏度的量子传感器。

Interesting Engineering网站2025年2月9日报道，美国国防高级研究计划局（DARPA）启动“稳健量子传感器（RoQS）”项目，旨在研发能在抵御环境干扰的同时保持

高灵敏度的量子传感器，确保其在实验室外可靠工作并整合到美国国防部平台中。量子传感器在测量磁场、重力和运动方面精度极高，对国防领域意义重大，但在现实环境（尤其是移动平台）中易受振动、电磁干扰等影响，现有 bulky 屏蔽或隔离解决方案难以大规模应用。RoQS项目不依赖此类传统方案，转而聚焦新的传感器设计策略与架构，包括设计可自然抵御环境干扰的传感器架构、开发能区分有效信号与背景噪声的紧凑型传感器阵列、研究稳定性更强的先进原子系统，以提升传感器在动态不可预测环境中的可靠性。项目还注重推动传感器开发者与国防平台制造商早期合作，缩短技术从实验室到实际部署的时间与资源成本，弥合研发与实战应用的差距。DARPA微系统技术办公室项目经理乔纳森·霍夫曼博士表示，量子传感器有望革新国防领域关键信息获取方式，RoQS项目是打造兼具高精度与抗干扰能力传感器的重要一步。

40.Xairos公司获美太空军创新部门SpaceWERX合同，将开发时钟系综量子与光学同步的融合PNT系统。

Inside GNSS网站2025年2月7日报道，Xairos系统公司获美太空军创新部门SpaceWERX授予的直接进入第二阶段（Direct-to-Phase II）SBIR合同，金额190万美元，项目聚焦开发融合量子与光学时钟组同步技术的定位、导航与授时（PNT）系统，以解决美国空军（DAF）面临的紧迫挑战。

Xairos将与合作伙伴Luminous Cyber公司、Eritek公司共同推进该项目，目前团队已完成初步设计评审（PDR）。SpaceWERX作为美国太空部队的创新分支，隶属于AFWERX，此次与空军研究实验室（AFRL）合作，旨在优化小型企业创新研究（SBIR）和小型企业技术转让（STTR）流程，具体措施包括缩短从提案到授奖的周期、扩大小型企业参与机会以丰富潜在申请者群体、持续改进合同执行流程以减少行政成本。美国空军自2018年启动开放式主题SBIR/STTR项目，以拓展资助的创新范围，此次项目正是在该计划框架下开展，致力于打造突破性能力以强化美国国防安全。

41.英国计划加强在时钟、eLoran和量子等方向的PNT研究。

GPS World网站2025年1月21日消息，英国在定位、导航与授时（PNT）领域凭借时钟、eLoran和量子研究处于西方领先地位。英国科学大臣帕特里克·瓦伦斯勋爵在2024年11月20日的皇家导航学会英国PNT领导力研讨会上宣布，将国家物理实验室国家时间中心（NTC）项目资金从3000万英镑增至6270万英镑，计划2027年1月使NTC和首批新型eLoran信号塔具备初始运行能力，并支持2023年发布的十项PNT政策框架落地。NTC项目已在苏格兰、中部和南部的三所大学设立节点，为行业和学术界提供可溯源的时间和频

率信号；eLoran方面，英国计划未来两年新增发射台以覆盖全国及周边水域，并与欧空局合作开发相关设备，国防部也就可部署eLoran能力发布信息请求。英国在量子研究上投入超10亿英镑，设有五个量子中心，目标2030年在飞机上部署量子导航系统。国家PNT办公室积极与多国合作，相关举措不仅保障国家韧性与安全，还将带来经济收益，皇家导航学会也发布了系列工具助力解释PNT及评估GNSS中断应对准备情况，英国因此成为西方唯一构建连贯且具韧性的国家PNT体系的国家。

42.西北大学的工程师成功演示了在已传输互联网流量的光纤电缆上的量子瞬移。

美国西北大学2024年12月20日报道，美国西北大学工程师首次成功在承载互联网流量的光纤电缆上实现量子隐形传态，该成果发表于《Optica》期刊。此次突破为量子通信与现有互联网电缆结合提供可能，大幅简化了先进传感技术或量子计算应用所需基础设施。研究由西北大学麦考密克工程学院电气与计算机工程教授、光子通信与计算中心主任Prem Kumar领导，其团队通过利用量子纠缠（两个粒子无论距离如何均存在关联）实现量子隐形传态，该过程无需粒子物理传输信息，而是让纠缠粒子远距离交换信息，且量子信息仅使用单个光子，不同于传统通信的数百万个光子。此前研究人员担忧量子光子会在传统通信的大

量光子中“淹没”，而该团队通过深入研究光纤内光散射原理，找到散射最小的特定波长放置量子光子，并添加特殊滤波器减少常规互联网流量干扰，成功避免干扰。他们搭建30公里长光纤电缆，两端放置光子，同时传输量子信息与高速互联网流量，在中点进行量子测量执行隐形传态协议，最终量子信息成功传输。未来，Kumar团队计划将实验扩展到更长距离，使用两对纠缠光子演示纠缠交换，并尝试在实际地下光缆而非实验室线轴上开展实验，该成果为量子与经典网络共享光纤基础设施、推进量子通信实用化奠定基础。

43.美国防部向Infleqtion公司授予一份1100万美金的合同，旨在加速其原子计时技术的研发。

Interesting Engineering网站2024年12月3日报道，美国国防部（DoD）向量子技术公司Infleqtion授予一份1100万美金的合同，旨在加速其原子计时技术的研发，该合同资金来自国防部2022年设立的“加速创新技术采购与部署（APFIT）”计划。Infleqtion公司聚焦研发名为Tiqker的紧凑型光学原子钟，该时钟可轻松集成到标准服务器机架中，利用原子量子态间的快速光学跃迁，相比同类产品精度和稳定性显著提升，能支持军方多领域需求，包括可靠通信、GPS拒止环境下的导航、抗欺骗计时同步，以及为单向攻击无人机防护等新兴技术提供支持。原子钟是全球最精准的

计时技术之一，通过监测原子极稳定的共振频率计时，最精准的原子钟约1亿年误差仅1秒，已应用于太空领域（如GPS卫星依赖其实现高精度定位，NASA曾测试“深空原子钟”用于深空旅行，因太空航行中1秒误差可能导致航天器偏离数千英里）。

44.三家初创公司成功将实验室级光学原子钟商业化为公文包尺寸产品，经DARPA资助并通过海上和空中军事测试验证。

IEEE Spectrum网站2024年10月15日报道，2024年，Vector Atomic、Infleqtion和QuantX Labs三家公司成功将实验室级光学原子钟压缩至约30升公文包尺寸，实现国防计时技术的突破性进展。这些设备在保持优于现有商用原子钟性能的同时，体积缩减至原实验室系统的零头。Vector Atomic的Evergreen-30采用碘分子频率参考，精度达3200万年误差一秒。该公司由叶军教授前研究生Martin Boyd创立，设计围绕成熟的电信级红外激光器展开，通过倍频实现532纳米波长激发碘分子跃迁。Infleqtion和QuantX Labs选用铷原子标准，使用频率加倍的1560纳米激光器探测780纳米能级，后者采用双激光方案降低功耗。三家公司均放弃激光冷却和光学晶格技术，转用玻璃气室原子蒸汽配合商用频率梳，将太赫兹光学振荡转换为微波输出。在美国国防高级研究计划局（DARPA）资助下，Vector Atomic和阿德莱

德大学团队于2022年参加珍珠港“环太平洋”演习的五眼联盟授时挑战赛。Vector Atomic设备在舰艇上连续运行20天后保持实验室级性能，项目经理Jonathan Hoffman强调这是光学原子钟首次实现无人工干预的自主运行。2024年5月，Infleqtion在英国军用飞机测试基地完成飞行验证，性能超越所有机载参考源。GPS信号在战争中频繁遭受干扰，威胁军事通信系统。光学原子钟可在GPS长期中断时为舰船、飞机和卫星提供授时保障，同时满足数据中心、金融机构和5G网络对100纳秒精度的需求——现有微波原子钟每天损失数纳秒，难以胜任。三家公司计划将设备进一步缩减至5升，Infleqtion的100毫升集成光子学版本可装入口袋。QuantX Labs的Kairos任务将于2025-2026年分阶段发射空间系统。Vector Atomic提出“GPS 2.0”愿景，认为毫米级定位精度可支撑自动驾驶车道保持和无人机精确投送。NIST前计量组负责人David Howe指出，突破现有应用对GPS局限性的依赖需要更宏大的探索视野。

45.美国桑迪亚国家实验室研发量子导航芯片，旨在摆脱GPS依赖并抵抗电子战。

Aviacionline网站2024年8月19日报道，美国桑迪亚国家实验室的科学家们正在开发一种基于量子导航原理的高精度运动传感器。通过采用原子干涉测量法这种超精密技术，该传感器能够实现比当前导航设备高出一千倍的灵敏度。

这项技术的核心在于利用硅光子微芯片组件，将原本体积庞大的精密传感设备大幅小型化。研究团队的目标是打造一种“量子罗盘”，使导航系统能够最大程度地摆脱对全球定位卫星的依赖。一旦成功，目前广泛使用的大型、昂贵的精确导航系统，将被这种成本更低、尺寸仅如计算机芯片大小的量子惯性测量单元所取代。在现代战争中，电子战部队能够通过干扰或欺骗卫星信号来扰乱军事行动，或大幅降低GPS/GLONASS制导武器的精度，乌克兰战场的情况便是例证。这种新型量子导航技术因其利用量子现象进行超灵敏测量的特性，能够提供远超现有系统的加速度和角速度测量精度，确保无人机、弹药、飞机和导弹等武器系统在无卫星信号的情况下，依然能精确知晓自身位置。除了关键的军事应用外，该技术的微型化和低成本化也使其在商业领域具有巨大的吸引力。例如，它可以用于探测地下洞穴、定位自然资源，以及开发更先进的光学通信系统，为多个行业带来革新性的应用前景。

46.澳美团队联合发文，报告移动光学原子钟的首次海上实战测试，实现光学钟从实验室到实际应用的关键跨越。

2024年6月，来自澳大利亚阿德莱德大学、美国Blue Halo公司、美国空军研究实验室、澳大利亚国防科学与技术集团的研究人员在预印本平台arXiv发表文章《海上移动光学钟集成展示》，报告了三台移动光学原子钟的首次海上

实战测试，实现了光学钟从实验室到实际应用的关键跨越。三台原子钟采用不同技术路线：阿德莱德大学研制的镱蒸气池钟和铷双光子钟，以及空军实验室的光学铷原子频率标准。2022年7-8月，它们被部署于新西兰海军奥特亚罗号舰船，在环太平洋军演中连续自主运行三周，航程逾150公里。海上环境极为严苛：原子钟承受了 $\pm 5 \text{ m/s}^2$ 的加速度冲击、每小时6 K的剧烈温度波动（峰值达10 K）、高湿度及海水侵蚀。即便如此，三台光学钟的表现仍碾压现役最佳商用微波钟（如铯束钟5071A），性能优势达数个数量级。借助“三角帽”统计法，团队精确测定了各钟独立频率稳定性——镱钟在100毫秒至80,000秒区间稳定在 10^{-14} 量级。技术突破体现在小型化与鲁棒性兼顾：阿德莱德双钟仅占7机架单元，重40-45公斤，功耗210-340瓦；空军实验室钟虽较大（46机架单元、310公斤、1300瓦），但三者均实现全自主运行，具备冷启动和故障自愈能力。该研究首次证实紧凑型蒸气池光学钟可在移动非受控环境稳定工作，标志着便携式光学钟技术已迈入应用阶段，将革新导航授时、通信同步、大地测量及基础物理研究等领域。

47.澳大利亚投资270万美元采购量子原子钟，强化AUKUS框架下导航授时能力。

澳大利亚皇家空军网站2024年9月13日报道，澳大利亚政府已与本土企业QuantX Labs签订价值270万美元的合同，

用于采购量子光学原子钟，旨在提升澳大利亚国防军（ADF）在定位、导航与授时（PNT）领域的关键能力。此次采购是AUKUS第二支柱合作框架下的重要举措，旨在加速量子技术的军事化应用，为澳大利亚、美国 and 英国三方合作伙伴提供决策优势和增强的海上态势感知能力。根据合同，位于阿德莱德的QuantX Labs将为国防部提供先进的量子时钟技术。这些设备源于阿德莱德大学光子学与先进传感研究所超过七年的研发成果，并与国防部紧密合作。其中，一台光学原子钟将于2025年初作为移动测试与测量系统的一部分交付给国防部。该系统将用于测试和评估通信和导航等关键国防硬件在GPS信号受限环境下的运行弹性和授时精度。澳大利亚国防部首席科学家Tanya Monro教授指出，投资下一代原子钟技术符合《国防战略》中对新兴颠覆性技术的重视，旨在为作战人员提供决定性的能力优势。她同时强调，此次采购是QuantX Labs的首个订单，也是将尖端自主研发成功转化为国防军先进作战能力的一次典范，展现了产学研协同创新的重要价值。

48.英国完成全球首次商用飞机量子导航技术飞行测试。

Interesting Engineering网站2024年5月13日报道，英国完成全球首次商用飞机量子导航技术飞行测试，该技术可实现无法被敌方干扰或欺骗的航空器通信，是航空技术领域的重大突破。此次测试的量子定位、导航与授时（PNT）系

统由量子技术公司Infleqtion研发，在英国国防部威尔特郡博斯克普基地开展，BAE系统公司与QinetiQ公司参与，使用QinetiQ改装的RJ100空中技术验证机测试了两项关键量子技术——紧凑型超冷原子量子系统与小型Tiqker光学原子钟，旨在推动量子惯性导航系统（Q-INS）研发，该系统可自主运行、不依赖传统GPS卫星导航，能提供极高精度与可靠性，未来或可辅助现有卫星系统保障全球每日数千架航班稳定运行。此次测试是英国研究与创新署（UKRI）资助项目的一部分，政府投入超800万英镑，契合英国国家量子战略“任务4”目标，旨在解决英国对GNSS/GPS在计时、导航和定位数据方面的高度依赖，同时也是英国通过国家量子技术计划及25亿英镑国家量子战略巩固其量子经济领先地位的举措之一。此外，英国目标2030年将量子导航系统安装于飞机。

49.Aquark技术公司在小型无人机上演示了机载冷原子系统。

欧洲国防工业网站2023年11月2日报道，Aquark技术公司成功在小型无人机上演示了可用于传感的冷原子持续捕获技术，将助力增强导航、精确测量及态势感知等一系列应用。此次演示的实地试验由Aquark技术公司联合MBDA与Innovate UK合作开展并共同出资，由Wright Airborne Computing负责无人机飞行；试验中，整套系统在冰冻温度、

高湿度大雾及复杂机动条件下表现稳定，依靠内部电源在全天试验中运行超一小时。冷原子量子技术以铷等第一或第二族元素为基础，在超高真空环境（ $>10^{-8}$ 毫巴）中通过精准调谐的激光约束并减缓原子运动，从而操控量子叠加与纠缠状态，该技术能显著改进量子计算与高精度传感器性能，可用于测量时间、加速度、电磁波、磁场及旋转；而Aquark技术公司采用独特且已获专利的无磁场原子捕获与冷却方法，使相关系统更小巧、简易且成本更低。

50.美国国家科学基金会计划投入2900万美元用于量子传感技术研究。

防务一号网站2023年8月23日报道，美国国家科学基金会（NSF）计划投入2900万美元用于量子传感技术研究，该资金将分配给18个美国大学旗下的研究团队，每个团队在四年内可获得约100万至200万美元资助。量子传感技术有望实现对亚原子粒子温度、运动、方向及其他特性变化的先进精准测量，此次受资助团队的重点研究方向包括构建基于纠缠光子运行的量子增强望远镜、研发便携式原子钟以更好地测量不同高度地球引力场的变化，以及探索观察活细胞内部的新技术以推进先进医疗治疗。