在地下迷宫点亮“中国灯塔”



“地下停车再也不用毫无头绪地满场转悠，跟着导航走，每层的车位状态一目了然。”近日，中国电子科技集团网络通信研究院（简称“网通院”）工程师陈冲驾车来到河北雄安新区雄安科学园地下停车场，打开星原导航APP，点击“去停车”，车位总数、空闲数量和具体位置一目了然。选定车位后，导航直接从地面延伸至地下，引导他穿过入口、坡道和岔路，直达目标车位。“如果途中车位被占用，系统还会及时推荐新的空闲车位。”陈冲说。

随着我国城镇化进程的持续深化与能源产业的智能化转型，地下空间早已不再是单纯的交通通道或采掘场所，而成为数字经济发展的新型拓展空间。复杂地下空间内人员与物资的移动管控，对连续、精准、高可信的定位导航及控制服务，提出了全新需求。



地下空间为什么需要一张“时空网络”

卫星导航在室外已成基础设施，但地下空间存在天然的技术壁垒，传统卫星导航技术在此完全失效。地面定位导航依赖北斗、GPS等卫星信号，但卫星导航信号无法穿透厚重的岩土、混凝土与金属结构，这是地下定位面临的首要难题。

除此之外，地下场景还存在多重复杂挑战。电磁传播环境极端恶劣，巷道狭窄、结构遮蔽严重，金属设备、粉尘、水汽都会对无线信号造成强烈干扰，传统定位技术精度大幅衰减。场景跨度大、形态异构，既有狭长的矿井巷道、隧道，也有开阔的地下车场、物流空间，网络部署难度极高。

智能化需求迫切，地下无人车辆、智能采掘装备、巡检机器人的自主作业等都需要亚米级甚至更高精度的定位支撑，传统技术无法满足。安全要求严苛，矿山、隧道等场景属于高危环境，定位系统必须具备高鲁棒性、高并发能力，保障人员与设备的实时精准定位与应急预警。

当卫星导航信号在地下空间不够灵敏，就需要地下空间高精度定位导航的帮助。

由网通院综合时空网络与装备技术全国重点实验室团队（简称“实验室团队”）牵头研制的“地下大空间高精度定位导航与控制技术”项目瞄准的正是这一难题：为地下空间提供远距离、大容量、高精度的自主定位，并支撑无人导航控制服务。它对应的不是单一定位算法，而是一套“综合时空网络”能力——既要有时空基准，也要有网络化覆盖、终端接入、控制服务和工程运维。该项国家级研发计划在系统层面完成了阶段性闭环，对我国地下空间综合时空网络方向具有原创成果意义。

精准定位面向卫星信号无法覆盖的地下

陈冲在办完事后立即在手机上轻触“去找车”，步行导航又将他引导到车前，“如果乘坐网约车，只需输入车牌号，就能找到车辆所在的楼层和车位。”

陈冲体验的这套地下停车场智能导航服务，背后的技术支撑是实验室团队研发的“星原”北斗微基站地下空间定位导航系统。

实验室主任、项目负责人蔚保国介绍，实验室团队通过在地下停车场部署北斗微基站辐射北斗信号，突破智能布网和地上地下无缝定位导航技术，实现普通智能手机也能在地下空间定位导航。

停车、找车难题解决了，意味着地面成熟的导航出行和生活服务可“丝滑”延伸至地下。

在蔚保国看来，以后车辆可以精准寻找车位，乘客可以准确找到网约车，充电平台可以引导车辆直达充电桩，未来还可为自主泊车、地下物流配送、地下机器人作业、应急疏散等提供精准的定位导航授时支撑。“车位将不再只是供车辆停放的物理空间，而成为可识别、可检索、可导航、可调度的数字化交通节点。汽车企业、地图导航企业、停车场运营商、网约车平台、商业物业和充电运营商，都可以在这一位置服务底座上开发新产品、拓展新服务。”蔚保国说。

地下空间，不仅包括人们习以为常的停车场，还有复杂的地下物流通道和综合管廊。

在雄安新区，地下空间开发是其智能化建设的重要板块，对定位导航技术的精度、容量、智能化水平要求极高。“星原”北斗微基站地下空间定位导航系统，让人员巡检、群体作业管控、无人物流等均得以实现。

巡检人员进入危险区域时，后台及时发出预警；无人运输车辆在没有卫星信号的地下通道内，也能稳定行驶、准确停靠……“我们研制的这套地下空间定位导航系统实测数据显示，地下空间人员静态定位精度优于0.2米，高速无人车辆可实现亚米级稳定导航。”陈冲介绍。

蔚保国介绍，实验室团队联合国内优势力量，启动地下大空间高精度定位导航与控制技术系统性攻关，目标就是构建一套全自主、全链条、可规模化落地的地下综合时空网络技术体系。

另辟蹊径 从理论突破到技术创新

“传统信号建模有点像‘看日历猜天气’，主要根据历史数据总结一般规律。”蔚保国说，该方法可提供参考，但地下结构调整，车辆和人员活动，都可能改变信号传播状态。如果模型不能及时更新，预测就容易出现偏差。

另辟蹊径，实验室团队创新提出在线实时数据采集与离线模型优化相结合的数字孪生信道建模方法。新方法更像现代天气预报：前端如同“气象卫星”，实时感知现场变化；后台则像“预报中心”，结合长期积累的数据反复计算、校准模型。随着地下环境发生变化，模型也能随之调整。

要让地下信号看得又清又准，地下定位导航就得配上随机应变的“大脑”。

技术的核心是绘制一张“地下无线环境图”，如同天气云图，把信号哪里强、哪里弱，从哪个方向传来、经过多长时间到达等直观地呈现出来。“借助这张图，原本看不见、摸不着的无线信号变得可观察、可预测、可推演，从而为地下定位导航提供可靠支撑，从源头破解信号‘看不清、测不准’的难题。”蔚保国解释道。

在地下空间，不仅要导得准，还要足够智能。

“比如，要让无人车自主运行，首先得解决‘在哪儿’的问题。我们设计了‘图、网、端’三级弹性定位标准。这就像给无人车上了‘三重保险’，即便地下环境恶劣导致某一种定位失效，其他定位也能立刻补位，确保车辆不迷路。”导航控制课题负责人潘树国说。





研制“探界100”核心芯片 打破国外技术垄断

在地下定位导航领域，核心芯片是产业链的“心脏”，也是制约行业发展的关键因素。

“在2022年项目启动前，国内UWB（超宽带）定位核心芯片长期依赖进口，不仅成本高、供应链不稳定，而且核心技术与标准完全被国外掌控。”回忆起过往岁月，蔚保国心有不甘，他说，“没有自主芯片，地下定位导航技术就会受制于人。核心芯片国产化突破，必须实现！”

反复摸索、不断求证，实验室团队意识到要从信号标准源头进行原始创新，提出原创的HNav-UWB（导航增强型超宽带）自主信号标准，改变了传统技术“通信优先、导航为辅”的设计思路，转向“导航增强、通信协同”的全新范式。

“经全方位测试验证，相比国际通用标准，新标准覆盖范围提升28%，测距精度提升6%，单站容量提升65%以上，核心性能指标全面超越国际主流标准。”作为导航增强型超宽带信号标准设计负责人，杨梦焕颇为自豪地说。

基于原创导航增强型超宽带信号标准，国内首款全自主可控“探界100”脉冲定位芯片被成功研制。

为何取名“探界”？“寓意探测环境空间边界、探索测量性能边界。”实验室团队成员齐声说。

“该芯片采用射频与基带一体化高集成设计，测距精度优于10厘米，测角精度优于3度。在环境复杂的地下空间，这款芯片能够实现媲美地面北斗导航的超高定位精度，从根本上解决了传统地下定位模糊、误差偏大的行业痛点。”芯片研发负责人赵军表示。

“探界100”芯片的成功研制，打破了国外对超宽带定位技术标准及核心芯片的垄断，标志着我国在国际超宽带定位技术演进方面率先做出了新探索和新成果，也为地下空间定位导航自主化、规模化高质量应用奠定了坚实基础。

该项目的成功，不仅是技术层面的突破，更构建起我国地下定位导航领域全链条自主技术体系，形成了涵盖理论研究、芯片研制、装备开发、平台搭建、应用落地的完整地下综合时空网络装备生态基础，扭转了该领域核心技术依赖国外的被动局面，为我国地下空间开发、能源产业转型、地下城市运营、国防安全建设提供了坚实的自主时空信息保障。

夜幕降临，雄安新区万家灯火。地下车库里，一辆辆汽车在导航指引下有序停入车位，充电桩指示灯次第亮起。这项发端于雄安地下的技术，正从“千年大计”的试验田走向全国，为破解城市遮蔽空间导航难题提供着可复制、可推广的“雄安方案”。这座“地下城”不再令人迷航，它正变得透明、智慧、可感知——这正是雄安新区“地上一座城、地下一座城、云上一座城”宏伟蓝图中的生动一幕，也是中国式现代化城市治理创新的一枚坚实路标。

拓展技术场景 落地应用实现真正价值

科研技术的价值，要体现在实际应用中。在内蒙古鄂尔多斯市门克庆煤矿，一名矿工携带矿用智能手机从地面进入井下。穿过纵横交错的巷道，系统不仅能显示他所在的巷道，还能准确判断其所在水平和高度。即使进入工作面、水泵房等金属设备密集区域，定位仍能保持连续稳定。需要前往另一作业地点时，矿工可直接用手机发起叫车请求，系统根据其位置调度无人接驳车辆；车辆沿规划路线自主穿过岔路、弯道，精准到达指定地点，完成接送。

“过去，矿井定位更多是在一条线上寻找大致位置，遇到井下金属遮挡区域还易出现定位盲区。现在，人员和车辆位置可以在三维空间中连续呈现，北斗定位能够从井上延伸到井下，矿用车辆也具备了精准自主导航控制能力。”实验室团队系统集成技术负责人杜世通表示。

未来，地下空间的开发利用将进入发展新阶段，在精准时空信息服务的需求也将持续攀升。蔚保国表示：“我们将继续深耕时空网络与定位导航领域，持续优化核心技术与装备性能，拓展技术应用场景，推动成果在城市地下综合管廊、地铁隧道、深层矿山、地下人防工程等更多领域规模化应用落地，进一步提升我国在全球地下空间定位导航领域的核心竞争力，树立全球地下空间智能开发的‘中国标准’，支撑地下空间数字经济产业高质量快速发展。”

综合人民日报、光明网、河北新闻网等媒体报道