

本刊专稿

时空智能助推新质生产力发展

李德仁, 郭昊南*

摘要 给出了时空智能(spatio-temporal intelligence, STI)的定义,揭示了时空智能在测绘遥感地理信息学中的数字化、信息化、网络化、智能化与实时化特征,及其在人工智能领域的重要地位,它通过自动和实时地感知与认知自然和人类活动,为人工智能开拓了广阔的应用前景。回顾并展望了时空智能从定位、导航与授时(PNT)服务向定位、导航、授时、遥感与通信(PNTRC)服务的创新演进,建立通导遥一体化的空天信息实时智能服务系统,并构建中国的空天信息全球实时监测网络。在此基础上,探讨了时空智能在低空经济、公共安全与大健康、自动驾驶与机器人、智慧电网与智慧工厂、林草监测与国家公园智能管理、应急管理等领域的应用案例,展示了其在推动新质生产力发展中的重要作用。

关键词 时空智能;通导遥一体化;东方慧眼星座;人工智能

2023年9月,习近平总书记在黑龙江考察时首次提到“新质生产力”,指出要整合科技创新资源,引领发展战略性新兴产业和未来产业,加快形成新质生产力^[1]。新质生产力是创新起主导作用,摆脱传统经济增长方式、生产力发展路径,具有高科技、高效能、高质量特征,符合新发展理念的先进生产力质态。新质生产力主要由技术革命性突破催生而成,其成果能转化为现实生产力,还能带动发展方式、生产方式、人才培养机制的创新^[2]。

新质生产力的显著特点是创新,关键在质优,本质是先进生产力。具体地,“新”体现在5个方面:新时代,我们正处于一个万物互联、数字孪生蓬勃发展的信息化时代;新基建,通过信息基础设施的发展、融合和改造传统基础设施,同时为未来的发展构建新的基础设施;新能源,更积极利用太阳能、风能、水能、核能和氢能等清洁能源,减少环境污染,支持社会的

可持续发展;新产业,大力发展以人工智能和机器人技术为支撑的未来产业;自主创新,始终坚持独立、自主、安全、可用的创新原则。“质”主要体现在质量有大的提升,表现为经济社会发展的数字化、信息化、智能化、实时化、绿色化。

时空智能(STI)是万物互联与数字孪生时代测绘遥感地理信息学的数字化、信息化、网络化、智能化与实时化。时空智能自动和实时地感知、认知自然活动和人类活动,提供空天信息实时智能大众化服务,是人工智能的重要组成部分。随着时空信息、定位导航服务、人工智能技术等重要新型基础设施的深度融合,时空智能将成为新质生产力发展的重要助推,提升中国科技,特别是定位导航服务与时空信息领域发展的独立性、自主性与安全性。需要抓紧实现北斗为中心的、无处不在的定位、导航与授时(positioning, navigation, timing, PNT)服务,推进从PNT到定位、导航、授时、遥感与通信(positioning, navigation, timing, remote sensing, communication, PNTRC)服务的创新,建立通导遥一体化的空天信息实时智能服务系统,建

武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室,武汉 430079

收稿日期:2024-12-23;修回日期:2025-06-04

作者简介:李德仁,教授,中国科学院院士、中国工程院院士,研究方向为摄影测量与遥感,电子信箱:drli@whu.edu.cn;郭昊南(通信作者),博士研究生,研究方向为遥感智能解译,电子信箱:haonan.guo@whu.edu.cn

引用格式:李德仁,郭昊南.时空智能助推新质生产力发展[J].科技导报,2025,43(24):27-34;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.12.01817

设中国空天信息全球实时监测网,支持各类用户在任何地方、任何时间的信息获取、高精度定位授时与多媒体通信服务,推动中国和全球可持续发展。在此基础上,人工智能引导下的 PNTRC 将提供空天信息实时智能大众化服务,助推新质生产力发展,提升中国科技发展的独立性、自主性与安全性。

1 时空智能:无所不在的 PNT 与 PNTRC

以北斗为中心 PNT 系统是新质生产力的重要组成部分。为充分发挥其潜力,应积极推进“北斗+”与“+北斗”融合应用,加速构建无处不在的 PNT 服务体系^[3],推进从 PNT 到 PNTRC 服务的创新升级。建立通导遥一体化的空天信息实时智能服务系统,建设中国空天信息全球实时监测网,支持各类用户在任何地方、任何时间的信息获取、高精度定位授时与多媒体通信服务,为中国和全球可持续发展服务^[4]。

1.1 PNT 服务

当今的 PNT 服务主要以中国北斗卫星导航系统等全球卫星定位系统(GNSS)及其增强系统为核心,通过与多种辅助定位导航技术的协同工作,提升系统的抗干扰能力和可用性。同时,借助互联网、移动互联网等网络通信手段,PNT 系统能够为用户提供精准的位置、方向、速度和时间信息,以及高精度的时间同步服务^[5-6]。

当前导航定位正从“单一传感器”向“多源泛在的智能感知+认知”导航定位发展,实现导航定位技术体制创新^[7]。例如,GNSS 系统在面对室内、地下、隧道或高架桥下等信号盲区时,常因信号接收受阻而无法有效地定位和导航。为解决该挑战,陈锐志团队研发了声、光、电、场融合的高精度室内定位技术^[8-9]。通过高精基准控制的多源信息融合技术,结合手机内置传感器、卫星定位数据及射频信号进行室内定位,实现室内外一体化高精度位置服务。具体地,音频定位系统涵盖了从信号发射基站到用户终端的全链条硬件方案,以及跨系统、跨平台的软件解决方案(图1)。与超宽带(UWB)技术相比,该技术能够更好地兼容智能手机,具有用户容量无限制、同步精度要求低、建维成本低、与射频信号互不干扰的优势,其综合性能在国际上领先。基于这一技术,该团队开发了

音视频一体化摄像头,实现了视频监控与高精度室内定位的集成,仅需1次安装即可同时获得视频监控与北斗定位2大功能,已成功应用于智慧公安、智慧物流、网约车服务等多个领域,为国家平安工程2.0建设提供了有力支持。此外,还开发了商用5G(第5代移动通信)多波束智能定位新方法,利用现有商用5G网络,无须改变5G信号体制,为5G室内定位提供了有效的解决方案,测距精度达到0.3 m,测角精度达到3°,单基站定位精度1~2 m。利用中国的“北斗+5G+音频定位”技术的集成,可以独立自主地实现在多种终端,为智能手机的米级(亚米级)室内外一体化高精度PNT服务。目前,水下PNT技术还需进一步研发。

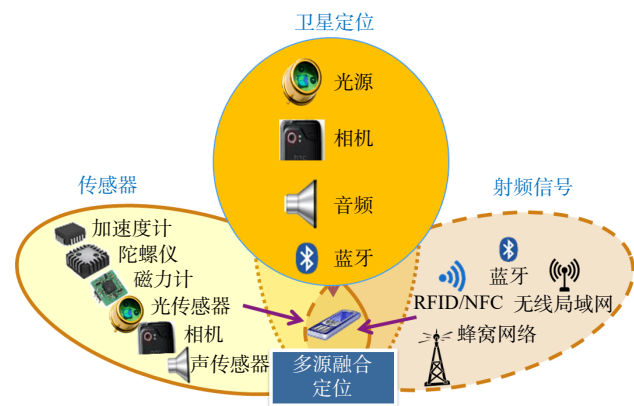


图1 手机多源融合室内定位

北斗三号系统标志着中国卫星导航技术的重大突破,实现了从无到有的飞跃。为了进一步提升导航定位的精度,可以通过构建低轨卫星导航增强系统,打造全球领先的高精度定位服务^[10]。地基增强定位主要服务中国陆地地区,通过低轨信号增强可以将服务范围扩展至更广的区域;星基增强服务能够覆盖亚太区域,低轨信号增强技术有助于缩短定位收敛时间。通过提供全球无缝高精度定位服务,北斗系统的国际竞争力将得到显著提升。

为了在不让做和不能做地基增强的地区实现北斗高精度PNT服务,武汉大学设计并实施了国内首套低轨导航增强载荷方案,研制了低成本、低功耗、紧凑型、高性能载荷,其技术指标领先^[11]。珞珈一号卫星搭载的导航增强载荷具备多项核心功能,包括为整星提供实时轨道和授时服务、存储并下传星上GNSS观测数据、维持星上时空基准的自主运行,以及生成双频测距增强信号。

在珞珈一号基础上,珞珈二号 01 星于 2023 年 5 月 23 日发射,并进行了天基导航分系统的在轨测试。测试结果与珞珈一号的导航增强试验结果相比,载波相位测量精度维持在 7 mm, H1 和 H2(珞珈一号、珞珈二号 01 星采用的双频导航增强信号的 2 个不同频点信号)载噪比的一致性得到有效解决,伪距测量精度从 1.7 m 提升至 0.16 m,证明了技术的显著进步(表 1)。

表 1 北斗导航定位增强效果对比

服务类型	覆盖范围	收敛时间	精度
标准服务	全球	瞬时	米级
地基增强	区域	瞬时	厘米级
地球静止轨道星基增强	区域/全球	30 min	厘米级
低轨星基增强	全球	<1 min	厘米级

将北斗与惯性测量(光纤陀螺和激光陀螺)技术集成的定位定向系统(position and orientation system, POS),可实现移动目标实时高精度 PNT 服务,连续提供位置、姿态和速度 9 参数服务。利用光学传感器和激光雷达的主被动即时定位与地图构建方法(simultaneous localization and mapping, SLAM),可在无北斗、无全球定位系统(GPS)的区域,包括月球、火星上实现 PNT 服务,有效支持玉兔号、祝融号的自动航行^[12-13]。

1.2 从 PNT 到 PNTRC

当前通信、导航、遥感卫星系统各成体系,导致系统孤立、信息分离、服务滞后等问题。亟需构建一个通信、导航、遥感的天基信息实时服务系统,以实现系统的互联互通、时空融合和服务畅通,推动天基信息由专业服务走向大众应用,产业发展由依赖国家扶持走向市场化、国际化^[14-16]。

因此,在抓紧实现无处不在的 PNT 服务的同时,武汉大学在全球首先提出,推进从 PNT 到 PNTRC 服务的创新^[17],建立通导遥一体化的空天信息实时智能服务系统,并构建中国的空天信息全球实时监测网络。这将支持各类用户在任何地点、任何时间的信息获取、高精度定位授时及通信服务,实现全球范围内的遥感数据从获取到应用终端的分钟级遥感信息快速、准确、灵活的服务(图 2)。

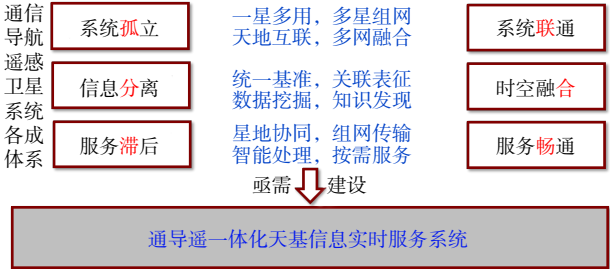


图 2 通导遥一体化天基信息实时服务系统

为了验证 PNTRC 服务的可行性,武汉大学牵头发射了珞珈三号 01 星、珞珈三号 02 星(武汉一号)试验卫星。其中,珞珈三号 01 星搭载了多种成像模式,包括凝视视频成像、推扫成像和面阵推帧成像等,它在基本载荷模块上集成了云检测、场景分类、目标追踪等智能处理算法模块,实现了卫星在轨智能处理,成功验证了实现全球范围内遥感数据从获取到应用终端的分钟级高效服务能力(图 3)^[18-19]。2023 年 10 月,珞珈三号 01 星数据成功助力联合国对阿富汗地震灾害的评估工作。

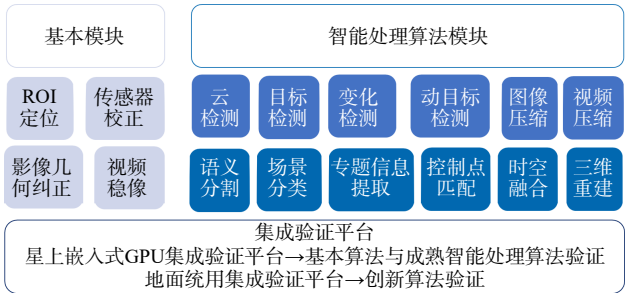


图 3 珞珈三号 01 星卫星在轨智能处理模块

继此之后,珞珈三号 02 星于 2024 年 5 月 21 日成功发射。该卫星具备 0.5 m 分辨率的全色成像、10 m 分辨率的高光谱成像、高精度立体测绘和夜光成像等多种任务模式,以及在轨智能图像处理功能。其目标是通过高性价比小卫星解决无控制点高精度定位的核心技术问题,推动遥感技术学科发展和武汉市空间信息产业的进步。

珞珈二号 01 星是国际首颗 Ka 频段高分辨率合成孔径雷达(SAR)卫星与国际首颗试验多角度成像模式的毫米波雷达卫星,成功获取了全球首幅 0.5 m 分辨率的星载 Ka 波段 SAR 影像,并建立了业务化的“云+端”遥感应用系统,实现了通过移动设备操控高分辨率 SAR 卫星的“天+端”服务。此外,珞珈二号 01 星在技术上实现了多个首次,包括首次开展低轨

卫星信号增强和信息增强联合实验,首次实现 Ka 频段相控阵 SAR 成像与数传天线一体化,首次利用毫米波 SAR 卫星开展视频成像试验验证等^[20]。珞珈二号 01 星还是国际首颗集遥感成像、气象降水探测和水利应用于一体化的卫星,实现了气象水文一体化,能够进行高精度的降雨量及流速测量^[21-22],已成功应用于京津冀地区的堤防决口预警和洞庭湖的遥感防汛工作。

2022 年起,武汉大学与山东省烟台市共同建设东方慧眼遥感卫星星座,旨在建立一个全球实时智能监测的空天信息网络,计划在 2030 年前发射 252 颗遥感卫星,目标是让全球用户在任何地点都能在 5 min 内享受到目标看得快、看得清、看得准、看得全、看得懂、送到位服务^[23]。东方慧眼星座将包含 144 颗高分辨率卫星、100 颗雷达卫星、4 颗高光谱卫星和 4 颗热红外卫星,共同构成一个软件定义的、通导遥一体化的、智能多模卫星网格。其中,高光谱卫星将每 5 天覆盖地球 2 次,热红外卫星每天扫描地球 4 次,高分辨率遥感卫星执行多角度摄影测量与遥感任务,SAR 卫星则负责摄影测量、干涉、差分干涉和层析雷达任务。

2024 年 2 月 3 日,东方慧眼星座首颗 OSE-HR01 高分卫星成功发射,具有 3 大特点^[24]。一是通过北斗三代全球导航系统实现应急测控和数据下传的北斗短报文功能;二是配备卫星通信终端,实现前向 5 Mbps、反向 10 Mbps 的双向中继通信能力;三是搭载全国产化的智能处理单元,用于在轨数据处理(图 4)。

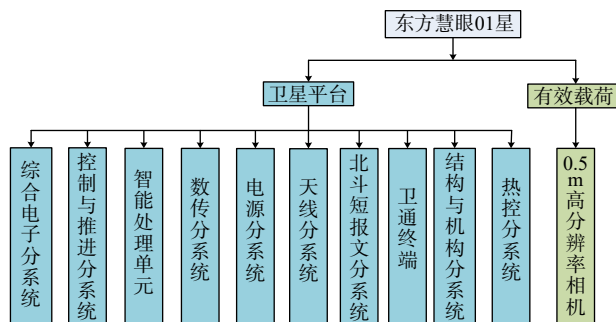


图 4 东方慧眼高分 01 星卫星平台及有效载荷介绍

此外,东方慧眼高几何高光谱小卫星 OSE-01/02 星对标了 Sentinel-2、LandSat-9、LandSat Next 等国际一流光谱型遥感卫星,具有 4 大特点。(1) 轨道相似性,双星 5 天全球重访一次,轨道设计相似;(2) 光谱兼容性,谱段兼容便于数据处理;(3) 指标先进性,

拥有更多谱段、更高分辨率、更大幅宽、更轻重量;(4) 应用广泛性,即支持白天高光谱+夜光,支持可见光+短波红外,支持海洋成像。武汉大学肖雄武副教授团队利用珞珈三号 01 星和东方慧眼高分 01 星数据监测了加沙地带战争损毁情况^[25]。通过时序变化检测,分析了加沙地带导弹弹坑及建筑物损毁情况,并实现了建筑损毁等级和农田损毁的自动评估。实现 PNTRC 和人工智能上卫星的东方慧眼星座计划在 2030 年建成,将为全球提供快、准、灵的空天智能服务,创造 1:10 的新质生产力。

2 时空智能助推新质生产力

在万物互联与数字孪生时代,时空智能将能够自动和实时地感知和理解自然及人类活动,为大众提供实时、智能化的空天信息服务,助推新质生产力的发展。时空智能将有望创造空天信息、低空经济、公共安全与大健康、自动驾驶、智慧电网、智慧工厂、自然资源、应急管理等多个万亿级产业(图 5)。

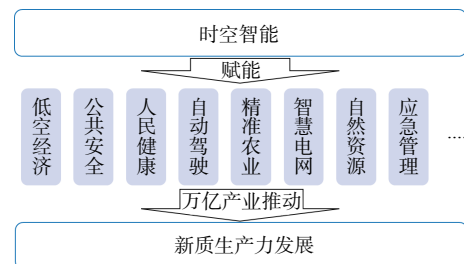


图 5 时空智能助推新质生产力

2.1 低空经济

“低空经济”正迎来快速发展的新阶段。2024 年 3 月 5 日,《政府工作报告》中提出了“大力推进现代化产业体系建设,加快发展新质生产力,积极培育新兴产业和未来产业,积极打造生物制造、商业航天、低空经济等新增长引擎”。2024 年 4 月,工业和信息化部、科学技术部、财政部、中国民用航空局联合发布了《通用航空装备创新应用实施方案(2024—2030 年)》,明确了到 2030 年推动低空经济形成万亿级市场规模的目标。

尽管“低空经济”与无人机、通航产业发展密切相关,但与美国等国家相比,中国的通用航空产业仍存在一定差距。目前,中国通用航空活动使用低空空域的比例不足 30%,且尚未形成网络化和规模化。国内

通航机场数量有限,且地区分布不均,大部分机场功能较单一,难以满足多元化服务需求^[26]。低空经济的应用场景广泛,包括交通监控、边境监控、商业运输、电力线监测、警务巡逻、搜索营救等,未来需要大力发展雷达自动目标识别技术,以实现低空空域活动的“看得见、呼得着、管得住”^[27-28]。

因此,中国低空经济发展应抓好3件事:首先,研制高性能的有人和无人低空飞行器;其次,建立智能而安全的低空管控系统;最后,开拓多样化的应用场景,有可能催生多个万亿级新兴产业。

2.2 公共安全与大健康

实践证明,时空智能技术在提升公共安全和大健康领域的效率和效果方面具有重要作用^[29]。“北斗+

高精度室内定位”技术能够实现亚米级定位精度,“北斗+5G”的结合显著提升了公共安全资源调配的精准度,而时空位置大数据为构建平安中国和健康中国提供了坚实的技术支撑^[30]。以武汉交警数据大脑“北斗+交通”智慧应急应用系统为例,该系统依托全息感知、时空分析和数据挖掘技术,集成了应急资源接入、动态展示、视频核查、实时调度导航、重大活动安保和综合研判分析等多项功能(图6)。基于该系统,武汉市全国拥堵排名实现从2017年1月的23位下降至2018年3月的53位,交通拥堵延时指数从2.34下降至1.67,降幅达30%,显著缓解了交通拥堵状况。自2017年3月以来,武汉市还实现了拥堵事故快速处理新模式,将闭环处置时间从7 min缩短至90 s。



图6 数据大脑“北斗+交通”智慧应急应用示意

此外,借鉴人脑思维链技术开发的智能手机上下文思维引擎,能够自动理解老年人的日常独立活动,并进行心理学、生理学和行为学的分析,成为老年人的专属生活助理。可以预期,“北斗+公共安全与大健康”产业可创造万亿产值。

2.3 自动驾驶与机器人

智能汽车在面对城市中的复杂使用场景,如建筑物遮挡、隧道、地下车库等,迫切需要依赖时空智能技术来实现高精度、高可靠性的导航,以解决“最后一公里”的导航难题。智能驾驶和自动驾驶的关键是实现车路协同的智能化^[31-33]。

为此,应将智能传感器尽可能部署在道路上,以便所有车辆共享。传感器至少应包括:确保车辆高精度、高完好率连续导航的增强系统;不仅能识别交通标志,并将其转换为车辆可接收的信号,而且能实时监测并记录道路上的行人、车辆及其他物体的状态,如视频监控、测速雷达等。同时,车辆上搭载的智能

感知、定位定姿传感器和智能驾驶系统也应追求高性价比。

因此,需要积极推动人、车、路、网、云的基础设施升级,实现路端感知、云端决策、车端控制的一体化。基于此,武汉大学与立得公司联合设计的通导遥一体化移动测量系统,在2019年国庆阅兵式中被誉为“测绘神器”;立得公司与东风汽车公司合作研发的物流机器人,能够根据路径规划和作业要求,精确执行任务并停靠到指定地点,完成一系列作业功能,同时具备安全保护和多种移栽功能。通过集成感知、高精定位、决策等技术,智能汽车的高性能定位测姿光器件可以重点解决高精度定位问题,并提升多源数据融合的性能,从而实现智能汽车在复杂城市环境中的安全可靠运行。

2.4 智慧电网与智慧工厂

武汉大学杨必胜团队开发了用于电力走廊多要素的精准定位、识别与建模,以及3D空间关系计算

模型一体化的软硬件系统^[34-39]。该系统包括 LiDAR 诊断子系统、倾斜摄影诊断、热红外成像诊断等多个子系统,有效解决了电力走廊安全风险的定位和预警问题。此外,设计的电力巡检机器人能够实现对变电、输电、配电设备进行全天时、全方位、全自主的智能巡检和安全防护,包括自动巡逻、智能读表、图像识别、红外测温、实时视频回传等功能,利用先进的人工智能技术代替传统人工巡检,降低了人员安全风险,保障了电网安全运行,并提升了电网智能化巡检技术水平。

基于这些技术,杨必胜团队还开发了电力走廊无人机巡检与智能监测系统,这是国内外首次大规模应用的大型无人机电力巡检技术。目前,该系统已在 15 个省市及地区投入使用,巡检线路总长约为 2 万 km,累计巡检里程超过 10 万 km,创造了超过 2 亿元人民币的经济效益。在未来,无人机系统将从智慧电网推广到石油化工、智慧采矿、智慧物流多个行业,形成万亿级产业。

2.5 林草监测与国家公园智能管理

时空智能的应用推动了“天空地”一体化林草感知监测体系的建立^[40-41]。武汉大学珪海刚团队和立得公司通过构建实景三维高精地图底座、天空地传感网/物联网实时感知立体检测网、智慧林草运营与管理平台,实现了国家公园智慧林草一体化感知监测,达到了世界先进的林草治理水平,打造国家公园智慧林草的“中国名片”(图 7)。

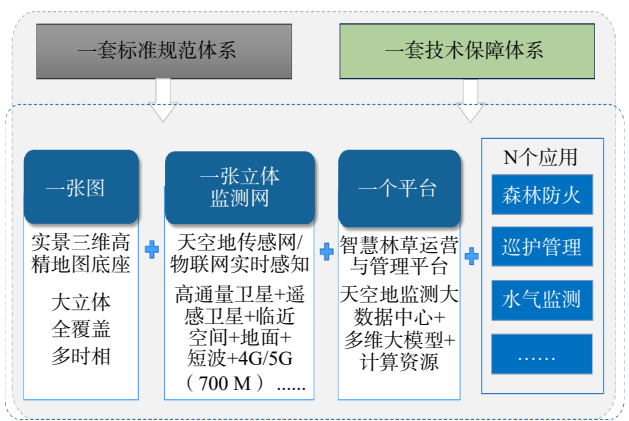


图 7 “天空地”一体化林草感知监测

在地基监测方面,珪海刚团队和立得公司设计了多功能移动方舱和集装箱式监测站,采用积木式搭配设计,快速组成具有特定功能的移动式方舱,有效适

应国家公园等恶劣环境。便携式监测设备能够在不干扰和不伤害旗舰动物的情况下进行近距离监测,获得监控视频、位置信息等数据。

在天基方面,通过集成卫星通信实现了远距离传输。高通量卫星通信系统相较于传统卫星通信,具有通信容量大、速率高、抗干扰的特点,能够支撑更广阔地理区域下快速的通信。在西藏格拉丹东区域部署的超远距离高清动物监测仪和高通量卫星等设备,实现了对旗舰动物、冰川及水源的实时感知监测。

结合“天空地”立体监测网,构建了智慧林草数字孪生平台,通过数字空间编码对各类林草监测设备进行精细网格管理,并建立唯一性标识。将监测设备与“3DGIS”模型叠加,构建数字孪生国家公园的“身体和神经网络”。平台提供超远距离视频监控、“天空地”一体化多源数据融合分析、动植物及生态环境智能分析、可视化大屏展示等功能,实现国家公园全时空、全方位的感知监测和管理,显著提升了智能化管理水平。

此外,武汉大学梁欣廉团队开发了全球首套全自动林冠下激光雷达森林调查系统^[42-45]。该系统无需依赖卫星信号,仅通过实时计算和自主避障技术,就能获取森林的三维数据并反演关键森林参数,例如胸径、树高和冠幅等,开辟了森林调查和精准碳汇计算的全自动新路径。

2.6 应急管理

高效的应急响应对于处理突发事件至关重要。通过在卫星上直接对获取的视频和图像进行智能处理,实现从传感器到行动者的分钟级甚至秒级响应,是提高应急响应效率的关键技术之一^[46-47]。武汉大学牵头的“区域协同遥感监测与应急服务技术体系”国家重点研发计划项目与长光卫星技术股份有限公司合作,共同开发了星载在轨处理应急响应技术体系^[48],并在吉林一号光谱 01/02 星上进行了在轨测试,成功展示了自动检测森林火点、海面船舶等目标的能力。通过北斗短报文通信技术,实现了秒级的“从传感器到用户”的信息传递,显著提高了应急响应的速度。星上处理结果可以通过中国自主导航系统发送至地面终端,极大提升了应急信息获取速度,为快速响应和处理突发事件提供了强有力的技术支持。

3 结论

时空智能作为数字时代万物互联与数字孪生技术的核心,不仅集成了测绘遥感地理信息学的数字化、信息化、网络化、智能化与实时化,也是人工智能领域的重要分支。它通过自动和实时地感知与认知自然和人类活动,为人工智能开拓了广阔的应用前景。在万物互联的时代背景下,时空智能已经成为推动新质生产力发展的关键力量,特别是在低空经济、精准农业、公共安全、自动驾驶、智慧电网、智慧工厂、自然资源监测、应急管理等领域发挥重要作用。时空智能将增强中国在全球科技竞争中的独立性、自主性与安全性,为中国在全球科技舞台上赢得更多的话语权和影响力。

参考文献 (References)

- [1] 习近平在黑龙江考察时强调:牢牢把握在国家发展大局中的战略定位 奋力开创黑龙江高质量发展新局面[EB/OL]. [2024-12-23]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202309/content_6903032.htm.
- [2] 习近平.发展新质生产力是推动高质量发展的内在要求和重要着力点[EB/OL]. [2025-06-04]. https://www.qstheory.cn/dukan/qs/2024-05/31/c_1130154174.htm.
- [3] 刘经南,罗亚荣,郭迟,等. PNT智能与智能PNT[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 811-828.
- [4] 刘经南,赵建虎,马金叶. 通导遥一体化深远海PNT基准及服务网络构想[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1523-1534.
- [5] 谢军,杨长风,王慧林,等. 北斗全球卫星导航系统工程技术与创新[J]. 工程管理科技前沿, 2024, 43(1): 1-9.
- [6] 杨长风. 进入全球服务新时代的北斗系统[J]. 卫星应用, 2022(4): 8-9.
- [7] 陈锐志,郭光毅,陈亮,等. 室内高精度定位技术研究应用现状与发展趋势[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1591-1600.
- [8] 陈锐志,钱隆,牛晓光,等. 基于数据与模型双驱动的音频/惯性传感器耦合定位方法[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1160-1171.
- [9] 陈锐志,郭光毅,叶锋,等. 智能手机音频信号与MEMS传感器的紧耦合室内定位方法[J]. 测绘学报, 2021, 50(2): 143-152.
- [10] 王磊,李德仁,陈锐志,等. 低轨卫星导航增强技术: 机遇与挑战[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 144-152.
- [11] 王磊,陈锐志,李德仁,等. 珞珈一号低轨卫星导航增强系统信号质量评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2191-2196.
- [12] 陈建新,邢琰,李志平,等. 祝融号火星车自主环境感知与避障技术[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(8): 1186-1197.
- [13] 吴伟仁,周建亮,王保丰,等. 嫦娥三号“玉兔号”巡视器遥控操作中的关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(4): 425-440.
- [14] 王瑜婷. 北斗赋能万物互联 助推新质生产力发展: 李德仁院士谈“从PNT到PNTRC”[J]. 中国测绘, 2024(7): 28-31.
- [15] 李德仁,沈欣. 我国天基信息实时智能服务系统发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 138-143.
- [16] 江昊,李德仁,沈欣,等. 天基信息实时智能服务系统仿真评估研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 153-160.
- [17] 李德仁,沈欣,李迪龙,等. 论军民融合的卫星通信、遥感、导航一体天基信息实时服务系统[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(11): 1501-1505.
- [18] 王密,郭贝贝,皮英冬,等. 珞珈三号01星在轨处理技术及验证[J]. 测绘学报, 2024, 53(4): 599-609.
- [19] 王密,杨芳,李德仁,等. 双清一号(珞珈三号01星)多模式成像样例数据集[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(6): 2299-2310.
- [20] 李德仁,夏军,张庆君,等. 珞珈二号01星高分辨率Ka频段SAR卫星遥感测绘关键技术及应用[J]. 卫星应用, 2024(10): 6-12.
- [21] 李珊琦,张艳军,景茂强,等. 珞珈二号01星的Ka频段合成孔径雷达水体识别KWEnet方法[J]. 武汉大学学报(工学版): 1-15.
- [22] 杨家辉,张艳军,景茂强,等. 面向珞珈二号01星的高分辨率星载Ka SAR顺轨干涉流速测量方法[J]. 武汉大学学报(工学版): 1-13.
- [23] 李德仁. 从珞珈系列卫星到东方慧眼星座[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1557-1565.
- [24] 李思辉,关琳. “东方慧眼”星座首颗高分辨率卫星发射成功[N]. 中国科学报, 2024-02-06(1).
- [25] Holail S, Saleh T, Xiao X W, et al. Time-series satellite remote sensing reveals gradually increasing war damage in the Gaza Strip[J]. *National Science Review*, 2024, 11(9): nwae304.
- [26] Gong J K, Yan J, Kong D Y, et al. Enhancing airport airspace safety: A small radar system for mitigating bird, drone, and wake Vortex hazards[C]//Proceedings of AIAA DATC/IEEE 43rd Digital Avionics Systems Conference (DASC). Piscataway NJ: IEEE, 2024: 10.
- [27] Gong J, Li D, Yan J, et al. Comparison of two typical drone detection radar systems with different radar dwell time[C]//Proceedings of 2022 International Conference on Autonomous Unmanned Systems (ICAUS 2022). Berlin: Springer, 2023: 2897-2910.
- [28] Gong J K, Yan J, Li D R, et al. Detection of micro-Doppler signals of drones using radar systems with different radar dwell times[J]. *Drones*, 2022, 6(9): 262.
- [29] 杜巍巍,邹亚琴,杨岑. 医学遥感卫星升空为健康赋能[N].

- 健康报, 2024-11-06(6).
- [30] 高柯夫, 孙宏彬, 王楠, 等. “互联网+”智能交通发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(4): 101-105.
- [31] 李必军, 郭圆, 周剑, 等. 智能驾驶高精地图发展与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(4): 491-505.
- [32] 张毅, 姚丹亚, 李力, 等. 智能车路协同系统关键技术与应用[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 40-51.
- [33] 陈超, 吕植勇, 付姗姗, 等. 国内外车路协同系统发展现状综述[J]. 交通信息与安全, 2011, 29(1): 102-105, 109.
- [34] 麦晓明, 陈驰, 彭向阳, 等. 输电线路走廊三维可视化技术和系统设计[J]. 中国电力, 2015, 48(2): 98-103.
- [35] 彭向阳, 陈驰, 饶章权, 等. 基于无人机多传感器数据采集的电力线路安全巡检及智能诊断[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 159-166.
- [36] 陈驰, 彭向阳, 宋爽, 等. 大型无人机电力巡检LiDAR点云安全距离诊断方法[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2723-2730.
- [37] Fu J, Shao G W, Wang Z Y, et al. Energy consumption-driven UAV dock deployment planning for power inspection[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2024, 48: 191-196.
- [38] Sun S Z, Chen C, Yang B S, et al. ID-det: Insulator burst defect detection from UAV inspection imagery of power transmission facilities[J]. Drones, 2024, 8(7): 299.
- [39] Wu J Y, Chen C, Yan Z F, et al. UPKD: Unsupervised pylon keypoint detection from 3D LiDAR data for autonomous UAV power inspection[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2024, 133: 104106.
- [40] 李德仁, 眭海刚, 张过, 等. 空天遥感洪涝灾害应急监测的探索与实践[J]. 中国减灾, 2024(19): 6-9.
- [41] 眭海刚, 周宁, 魏天怡. 遥感大数据的地理环境构建及目标保障技术综述[J]. 无线电工程, 2024, 54(11): 2505-2519.
- [42] Liang X L, Kankare V, Hyyppä J, et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 115: 63-77.
- [43] Wang Y S, Lehtomäki M, Liang X L, et al. Is field-measured tree height as reliable as believed—A comparison study of tree height estimates from field measurement, airborne laser scanning and terrestrial laser scanning in a boreal forest[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 147: 132-145.
- [44] Liang X L, Hyyppä J, Kukko A, et al. The use of a mobile laser scanning system for mapping large forest plots[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 11(9): 1504-1508.
- [45] Liang X L, Yao H Y, Qi H W, et al. Forest *in situ* observations through a fully automated under-canopy unmanned aerial vehicle[J]. Geo-spatial Information Science, 2024, 27(4): 983-999.
- [46] 王密, 杨芳. 智能遥感卫星与遥感影像实时服务[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1586-1594.
- [47] 王密, 仵倩玉. 面向星群的遥感影像智能服务关键问题[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 1008-1016.
- [48] 贺小军, 李竺强, 秦小宝, 等. 吉林一号光谱卫星技术创新与应用成果[J]. 卫星应用, 2020(3): 18-26.

Spatio-temporal intelligence boosts the development of new quality productive forces

LI Deren, GUO Haonan*

State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract The definition of spatio-temporal Intelligence (STI) is presented, and its characteristics of digitalization, informatization, networking, intelligence, and real-time performance in geomatics, remote sensing, and geographic information science are revealed, as well as its significant position in the field of artificial intelligence. The innovative evolution of STI from positioning, navigation, and timing (PNT) services to positioning, navigation, timing, remote sensing, and communication (PNTRC) services is reviewed and discussed. Furthermore, the application cases of STI in various fields, including the low-altitude economy, public safety and health, autonomous driving and robotics, smart grids and smart factories, forest and grassland monitoring, intelligent management of national parks, and emergency management, are explored. The important role of STI in promoting the development of new quality productive forces is demonstrated.

Keywords spatio-temporal intelligence; positioning, navigation, timing, remote sensing, and communication (PNTRC); oriental smart eye; artificial intelligence ●



(责任编辑 王丽娜)