DOI:10.20270/j.cnki.1674-117X.2026.5002

北斗赋能跨域无人系统自主协同关键技术与发展趋势

梁嘉诚[1,2]，张辉[1,2]，钟杭[1,2]，王耀南[1,2]

（1. 湖南大学 人工智能与机器人学院，湖南 长沙 410082；
2. 湖南大学 机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心，湖南 长沙 410082）

摘要：跨域无人系统正由单平台运行向多平台、多域自主协同演进，不同物理域在运动机理、感知方式、通信条件和环境特征等方面的差异，对统一时空基准、连续自主导航、跨域信息交互及协同决策控制等提出了更高要求。北斗卫星导航系统具备高精度定位、精密授时和短报文通信等能力，为跨域无人系统提供了重要时空信息支撑。本文围绕北斗赋能跨域无人系统自主协同，系统综述相关研究进展，重点梳理北斗定位导航与统一时空基准、跨域协同感知与信息交互、跨域任务规划与自主决策、异构协同控制与自主作业等关键技术，并总结多域融合的典型应用模式。在此基础上，从连续可靠统一时空基准、通导一体化、时空智能、群体自主协同及高可信自主运行等方面分析其未来发展趋势，为北斗与跨域无人系统深度融合及相关理论研究与工程应用提供参考。

关键词：北斗卫星导航系统；跨域无人系统；异构无人系统；自主协同；统一时空基准；群体智能
中图分类号：F426；TP18　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1674-117X(2026)05-0009-12

随着机器人、人工智能、先进传感器和卫星导航等技术的快速发展，无人系统正由面向单一平台、单一环境和单一任务的自主运行模式，逐步向多平台协同、多域融合和群体智能方向发展。不同类型无人平台在机动能力、作业范围、环境适应性和任务载荷等方面具有显著互补优势，通过空、地、海等不同物理域之间的协同，可突破单一平台在感知范围、持续作业和环境适应能力等方面的局限，其在灾害应急救援、海洋探测、基础设施检测维护以及复杂环境作业等领域具有显著应用价值[1-3]。

与单域无人系统相比，跨域无人系统涉及不同平台、不同环境和不同任务之间的深度协同，其自主运行面临更加突出的时空一致性、信息互通性和作业协同性问题。一方面，不同无人平台在坐标参考、导航方式和时间基准等方面存在差异，难以实现状态信息的统一表达与准确关联；另一方面，山区、地下、远海和水下等复杂环境会造成卫星导航信号遮挡、衰减甚至失效，使传统依赖单一导航源的自主系统难以保持连续可靠的状态估计。此外，跨域无人系统还需要解决异构信息交互、任务分配、时空协同规划以及协同控制等问题。因此，建立覆盖不同物理域的统一时空基准，并进一步实现跨域感知、信息共享

收稿日期：2026-07-28
基金项目：教育部基础学科和交叉学科突破计划“智能宇航装备学科先导项目”（JYB2025XDXM215）；湖南省自然科学基金重点项目“大模型驱动的智能医药双臂机器人自主操作与精准控制关键技术”（2025JJ30024）；国家自然科学基金重点项目“复杂受限环境下机器人多模态三维感知与自主灵巧作业研究”（62133005）
作者简介：梁嘉诚，男，江西抚州人，湖南大学博士后，博士，研究方向为空中作业机器人。

和自主协同，是跨域无人系统由多平台组合向系统级自主协同发展的基础。

北斗卫星导航系统具有定位、导航、授时和短报文通信等综合服务能力，为跨域无人系统自主协同提供了重要的基础支撑。北斗高精度定位和精密授时，可为不同物理域无人平台建立统一位置和时间基准 [4-5]；通过与惯性导航系统（Inertial Navigation System，INS）、视觉、LiDAR、雷达和声呐等多源信息融合，可提高复杂环境下的连续导航与状态估计能力 [6-7]；依托北斗短报文及其与卫星通信、蜂窝通信和自组网等技术的融合，可增强远距离和弱通信环境下的信息交互能力 [8-9]。在此基础上，北斗提供的统一时空信息还可进一步融入任务规划、自主决策和协同控制，推动其由传统的定位导航工具逐渐向支撑跨域无人系统自主协同的时空信息基础设施演进。

近年来，北斗与无人系统融合研究不断深入，但现有研究多聚焦于单一无人平台的导航应用，或分别围绕组合导航、卫星通信和无人集群等特定技术展开，对北斗支撑空－地－海等多物理域无人系统自主协同的系统性梳理仍相对不足 [10]。尤其是从跨域无人系统自身需求出发，建立自主导航与统一时空基准、协同感知与信息交互、任务规划与自主决策、协同控制与自主作业的完整技术链条，并进一步分析典型融合应用及未来发展趋势，仍具有较大的研究价值。

综上所述，本文以北斗赋能跨域无人系统自主协同为主线，对相关研究进行系统综述。首先，从跨域无人系统的平台异构性、环境复杂性和任务协同性出发，分析其对统一时空基准、连续自主导航、协同感知、广域信息交互、任务规划及异构协同控制等方面的需求；其次，系统梳理北斗赋能跨域无人系统自主协同的关键技术及研究进展，并总结北斗与典型跨域无人系统的融合应用；最后，从统一时空基准、通导一体化、时空智能、群体自主协同和高可信自主运行等方面分析其未来发展趋势，为北斗与跨域无人系统融合发展的相关研究和工程应用提供参考。

一、跨域无人系统及其发展需求

（一）跨域无人系统基本概念与典型特征

跨域无人系统是由空中、地面、水面、水下乃至空间等不同物理域的无人平台组成的，通过信息共享、任务协同和自主决策共同完成复杂任务的综合无人系统。与单域无人系统相比，跨域无人系统具有更加显著的平台异构、环境复杂、任务动态和信息分散等特点，其核心特征并非不同无人平台的简单组合，而是通过异构平台之间的能力互补和任务协同形成系统级自主能力 [11]。

不同域无人平台在运动方式、动力学特性、感知手段、通信能力、能源水平及任务载荷等方面存在显著差异，这使得传统面向单一平台或同构多机器人系统的自主导航和控制方法难以直接满足跨域协同需求 [12-13]。同时，跨域任务通常具有明显的动态性和链式特征，例如灾害救援任务可以形成“空中搜索—地面接近—水面跟踪—水下探测”的任务链，不同平台需要根据任务进程完成信息接力、任务交接和角色切换 [13-14]。

因此，跨域无人系统的核心能力正由单平台自主向多平台统一时空认知、跨域信息交互和自主协同作业演进，这也对支撑多域无人平台协同运行的基础时空信息体系提出了更高要求。

（二）跨域无人系统发展需求与北斗赋能

1. 多域统一时空基准需求

时空基准不统一是制约跨域无人系统实现深度协同的基础性问题。对于单一无人平台而言，自主导航主要解决平台自身的位置、速度和姿态估计问题；而对于跨域无人系统而言，更重要的是确定不同平台在统一空间坐标和统一时间尺度下的状态关系 [15]。只有将异构无人系统状态映射至统一的空间参考和时间基准，才能实现不同平台位置、运动状态及信息的一致表达 [15-16]。因此，跨域无人系统首先需要建立覆盖不同物理域的统一空间参考和高精度时间基准，实现多平台位置、速度、姿态和任务状态的统一

时空表达。而北斗具有全球定位与授时能力，可提供具有统一参考意义的绝对位置和时间信息，为不同物理域无人平台建立共同的时空基准[17]。

2. 连续可靠自主导航需求

跨域无人系统通常需要穿越具有明显差异的物理环境，其导航条件具有较强的不连续性。例如，无人机可能从开阔空域进入山区峡谷，无人车可能进入隧道或地下空间，无人船可能进入近岸复杂环境，而水下航行器无法直接接收卫星导航信号。因此，跨域无人系统对导航能力的需求已经由简单的高精度定位转向连续、可靠、可恢复的自主导航发展。在北斗信号良好条件下，需要获得高精度绝对位置；而在北斗信号退化或拒止条件下，则需要依靠惯性导航、视觉、LiDAR、雷达及声学导航等多源信息维持状态估计，并在北斗重新可用时实现全局位置校准。

3. 跨域多源协同感知需求

不同平台具有不同的空间视角和传感器优势，可以形成明显的跨域感知互补。无人机适合大范围搜索，无人车适合地面近距离精细感知，无人船适合水面监测，水下航行器则能够获取水下环境信息。通过异构平台的信息共享，可以突破单一平台感知范围和环境适应能力的限制。然而，不同平台获取的信息具有明显的异构性，其坐标系、时间戳、数据格式、感知尺度和精度等方面存在差异。若缺乏统一的时空参考，不同平台的观测信息难以实现有效关联[18]。因此，跨域无人系统需要实现多源异构信息统一表达、跨平台感知信息关联以及目标状态协同估计。北斗可通过提供统一的位置和时间参考，为视觉、LiDAR、雷达和声呐等多源观测提供时空配准基础，使不同平台的感知信息能够映射至统一坐标体系，为跨域目标关联和协同跟踪提供基础[19]。

4. 广域协同通信与可靠信息交互需求

跨域无人系统的运行范围通常较大，而不同物理域具有明显不同的通信条件。传统无线通信、自组网和专用数据链在远海、山区、灾害区域等场景可能存在覆盖不足的问题，水下环境还面临常规无线电通信难以直接传播的问题[20]。因此，跨域无人系统需要建立具有广域覆盖、动态组网、多链路冗余和低基础设施依赖特征的信息交互体系。北斗短报文可作为弱通信环境下的补充信息通道，为无人平台提供位置、状态、任务指令和应急信息等低带宽信息传输能力。其优势并非替代5G/6G、卫星互联网或自组网，而是与上述通信方式形成互补，提高跨域无人系统在通信链路受限情况下的通信生存能力。

5. 跨域时空任务规划与自主决策需求

随着跨域无人系统由单平台自主导航向多平台自主协同发展，系统面临的问题由如何到达目标位置，扩展为多个平台如何在合适时间、合适位置并以合适方式共同完成任务。因此，跨域任务规划具有明显的时空耦合特征，与传统路径规划相比，其规划变量不仅包括空间路径，还包括任务分配、执行顺序、时间窗口和平台角色等[21]。这使跨域无人系统对时空一致的任务规划和动态自主决策提出了更高要求。不同平台需要在统一时间基准下进行任务调度，并依据实时位置和状态完成任务接力。北斗提供的统一位置和时间信息能够为任务分配、任务时序安排以及动态重规划提供基础时空约束，使任务规划由单平台路径规划向跨平台时空协同规划发展。

6. 异构协同控制与自主作业需求

跨域无人系统的最终目标并非实现简单的多平台同步运动，而是通过异构平台协同完成复杂任务。由于无人机、无人车、无人船和水下航行器在动力学模型、运动自由度、控制输入和环境约束等方面存在显著差异，传统同构多机器人一致性控制方法难以直接适用[22]。此外，跨域协同控制还受到通信时延、数据丢包、定位误差和环境扰动等因素影响[23]。因此，跨域无人系统需要建立以统一时空状态为基础的异构协同控制机制，实现不同平台在位置、速度、任务时序和目标状态上的协调，并进一步从协同导航、协同运动向协同跟踪、协同作业和任务接力发展。由此，北斗的作用也进一步从提供定位信息延伸至为

多平台状态协调、轨迹同步和任务接力提供统一时空参考。

综上，跨域无人系统对北斗的需求呈现明显的层次递进关系：首先，需要利用北斗建立多域统一时空基准；然后，以北斗为全局约束，结合多源导航信息实现复杂环境下的连续自主导航；在此基础上，利用统一时空基准支撑跨域协同感知和广域信息交互；其后，进一步将时空信息引入任务分配、时序规划和动态决策，并最终服务于异构平台协同控制与自主作业。由此形成“统一时空基准—连续自主导航—协同感知与信息交互—时空任务规划—异构协同控制”的需求链条。针对上述需求，下文从技术实现角度，系统梳理北斗赋能跨域无人系统自主协同的关键技术及研究进展。

二、北斗赋能跨域无人系统关键技术及研究进展

在跨域无人系统对统一时空基准、连续自主导航、协同感知、信息交互、任务规划和协同控制等需求的牵引下，北斗与无人系统的融合逐渐由单一定位服务向多源导航、时空信息共享和自主协同支撑拓展。现有研究主要围绕统一时空基准、跨域协同感知与信息交互、跨域任务规划与自主决策以及协同控制与自主作业等方面展开，并逐步形成由底层时空信息获取向上层自主协同延伸的技术体系（见图 1）。

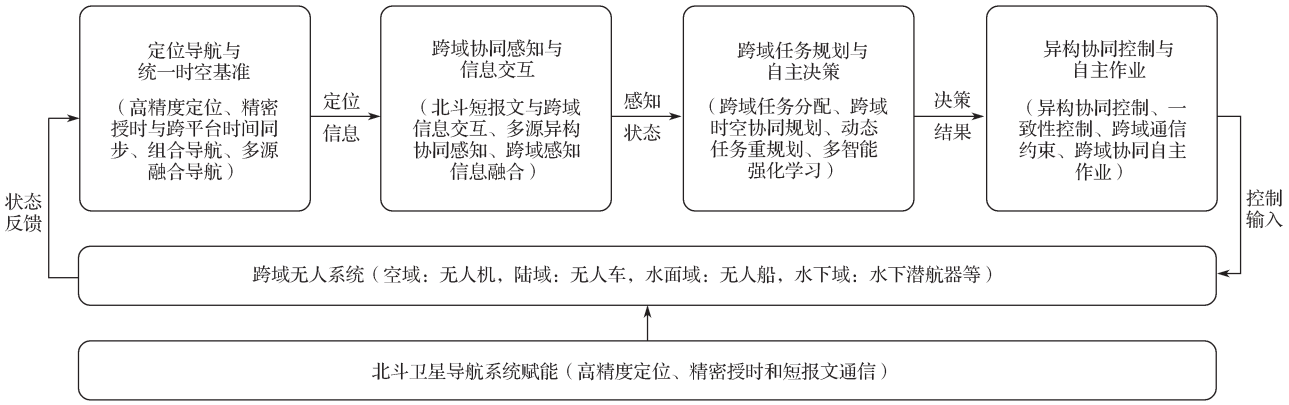

图 1　北斗赋能跨域无人系统关键技术体系

（一）定位导航与统一时空基准技术

统一时空基准是北斗赋能跨域无人系统自主协同的基础，其基本流程如图 2 所示。针对无人机、无人车、无人船和自主水下航行器等不同平台在坐标系、时间基准和状态表达方面存在的差异，北斗高精度定位和精密授时能够为异构平台建立统一的全球空间参考和时间基准，实现不同平台位置、速度、姿态及任务状态的统一表达。在此基础上，通过坐标转换、时间同步和状态映射，可建立跨平台时空关联，为多平台协同定位、目标跟踪、任务接力和协同控制提供一致的状态基础。

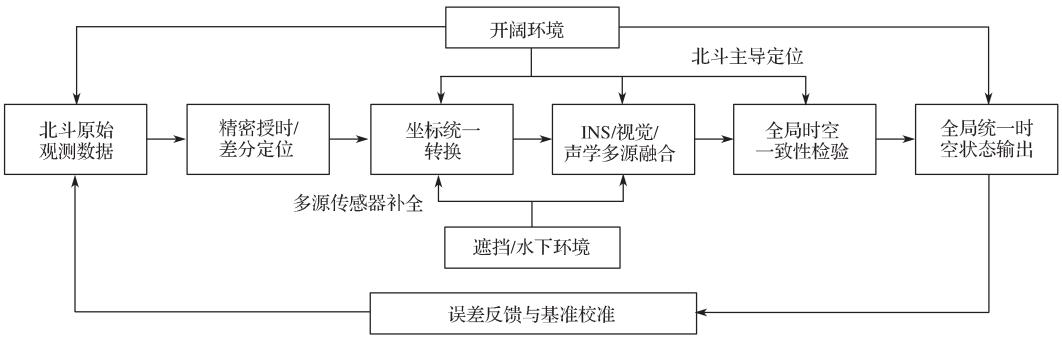

图 2　北斗多源融合统一时空基准流程图

在高精度定位方面，差分北斗、实时动态定位以及精密单点定位等技术能够有效提高无人平台的绝对定位精度，为异构无人平台的高精度自主导航、路径跟踪和协同作业提供基础。已有研究表明，三频北斗信号能够支持长基线实时动态定位，高精度北斗定位技术已被广泛应用于车辆导航、农业机械、海洋测量及基础设施监测等场景[24-28]。与此同时，北斗全球系统提供的授时能力也为多平台时间同步提供了统一参考，使不同平台的状态信息、传感器数据和任务指令能够按照统一时间尺度进行组织和处理[15]。

然而，单一北斗定位难以适应复杂环境下的连续导航需求。峡谷、森林、建筑物内部以及地下空间等场景容易产生卫星信号遮挡、多路径效应和干扰；水下平台则无法直接接收北斗卫星导航信号。因此，北斗 /INS 组合导航以及北斗与视觉、LiDAR、雷达等多源融合成为提高导航连续性和鲁棒性的主要技术路径[29-33]。其中，INS 能够利用高频短时稳定特性弥补北斗更新频率和信号连续性的不足，维持北斗中断期间的异构无人平台状态估计[29-31]；在此基础上，进一步结合视觉、LiDAR、雷达等环境感知信息，则能够利用局部环境特征对全局导航状态进行约束，从而提高复杂环境下的定位与导航性能[32-33]。

对跨域无人系统而言，导航问题进一步体现为不同物理域之间的导航衔接。例如，空中平台可以直接获得北斗绝对位置，而水下航行器通常依靠惯性导航、声学定位或地形匹配等方式获得自身状态。因此，现有研究逐渐形成以北斗提供全局位置基准，以 INS 及视觉、LiDAR、声学导航等提供局部连续状态估计的多源融合模式。总体而言，相关研究已经由单一北斗定位向北斗 /INS 组合导航，再向北斗与视觉、LiDAR 等多源信息融合导航发展，为跨域无人系统建立统一且连续的时空状态基础提供了技术支撑。

（二）跨域协同感知与信息交互技术

在统一时空基准基础上，跨域无人系统需要进一步实现环境信息、目标状态和任务信息的跨平台共享，由此形成跨域协同感知与信息交互技术。与单平台感知相比，跨域协同感知能够充分利用不同平台在空间位置、传感器类型和任务载荷方面的互补优势。通过多平台感知信息融合，扩大系统整体感知范围，提高复杂环境下目标发现、识别和跟踪能力[18]。

北斗在跨域协同感知中的核心作用是统一时空参考和广域信息交互。利用北斗提供的位置与时间信息，可以对来自不同平台的视觉、雷达、LiDAR 和声呐等异构观测数据进行时空配准[32-33]，使不同平台获取的目标状态能够映射到统一坐标系中，实现跨域目标关联与协同跟踪。结合多目标跟踪、状态估计和多模态数据融合技术，进一步形成跨平台、跨区域的协同感知网络，使无人系统由独立感知逐渐发展为面向任务的协同感知[10,18]。

在信息交互方面，北斗短报文为复杂环境下的低带宽、广域信息传输提供了重要补充[34]。针对远海、山区、灾害区域等地面通信基础设施不足的场景，相关研究开始探索北斗短报文与蜂窝通信、卫星通信和自组网等多种通信方式的融合，形成了多链路互补的信息交互模式，并将其应用于海洋定位、渔船监测以及偏远区域信息传输等场景[35-37]。与高速无线通信相比，北斗短报文的通信容量有限，但其广域覆盖和对地面通信基础设施依赖程度较低，因此适合承担复杂环境下的低速率状态与应急信息传输任务。

总体来看，现有研究已经形成了北斗统一时空参考、多源感知融合与异构通信网络的跨域信息支撑模式。北斗主要承担全局位置与时间基准以及广域信息交互功能，而视觉、LiDAR、雷达和声呐等传感器负责局部环境信息获取，多种通信链路共同完成跨平台信息传输。

（三）跨域任务规划与自主决策技术

随着跨域无人系统规模扩大和任务复杂程度提高，仅依靠平台状态和环境信息共享已经难以满足复杂任务需求，需要进一步实现异构平台任务分配、路径规划和动态决策。与传统单平台路径规划不同，跨域任务规划需要同时考虑不同平台的运动能力、任务载荷、能源状态、通信条件以及环境约束，并在统一时空框架下确定任务分工、执行顺序和行动路径[11]。

既有研究首先围绕跨域任务分配展开，通过优化不同无人平台的任务角色和资源配置，提高系统整

体任务完成效率[12]。在跨域场景中，可根据无人机快速机动、无人车持续作业、无人船水面巡航以及水下航行器隐蔽探测等能力差异，将复杂任务分解为搜索、跟踪、运输、探测和作业等子任务，并按照平台能力进行动态分配。在任务分配基础上，既有研究进一步将空间路径和时间约束纳入统一规划框架，形成跨域时空协同规划。对于需要任务接力的跨域任务，不同平台不仅需要在空间位置上实现衔接，还需要满足任务执行时间窗口的需求。因此，北斗提供的统一位置和时间信息能够为任务分配、路径规划和任务时序安排提供基础时空约束。相关研究已经将北斗高精度定位引入无人机－无人船协同路径规划、能源补给和复杂环境路径规划等任务中[38-40]。

针对实际任务中平台故障、环境变化和通信状态波动等不确定因素，动态任务重规划成为跨域自主决策的重要研究方向。当某一平台失效或者目标状态发生变化时，系统需要根据实时状态重新进行任务分配和路径规划，以提高跨域任务的适应能力。近年来，多智能体强化学习、分布式优化和博弈论等方法逐渐应用于多无人平台协同搜索、任务分配和动态路径规划，通过多智能体之间的信息交互和策略学习提高复杂任务环境中的自主决策能力[41-44]。

从现有研究来看，北斗在任务规划与自主决策中主要承担全局位置约束、统一时间基准和平台状态信息支撑作用，而任务分配、路径规划和决策策略则主要由优化算法、多智能体协同方法和强化学习方法实现。相关研究已经实现了北斗信息与无人平台路径规划、协同任务和自主决策的结合，但北斗时空信息在复杂任务约束和多智能体决策中的作用仍主要表现为基础状态信息和规划约束。

（四）异构协同控制与自主作业技术

协同控制是实现跨域无人系统任务闭环的关键环节，其目标是将任务规划和自主决策结果转化为不同无人平台的实际运动和作业行为。由于无人机、无人车、无人船和水下航行器在动力学模型、运动自由度、控制输入和环境约束等方面存在显著差异，传统面向同构多机器人系统的一致性控制和编队控制方法难以直接应用于跨域异构系统。因此，现有研究主要围绕异构平台协同控制、多平台一致性控制以及通信约束下的鲁棒协同控制展开[22]。

在异构平台协同控制方面，通常采用分层控制思想，在系统层定义统一协同目标，在平台层根据各自动力学特性设计局部控制器，从而实现不同平台之间的位置、速度和任务状态协调。多平台一致性控制、编队控制和协同跟踪等方法能够实现无人平台之间的状态协调，并进一步支持目标围捕、区域搜索和任务接力等典型任务[45-46]。经典多智能体一致性理论为多平台状态协调提供了理论基础，异构多智能体协同控制研究则进一步考虑了不同平台动力学和控制约束差异。北斗提供的统一位置和时间信息能够减少不同平台之间的时空基准差异，为协同控制器提供一致的全局状态参考。对于需要保持相对位置关系的多平台协同任务，北斗高精度定位能够提供平台绝对位置约束，而局部感知和相对测量则可以进一步提供平台间相对状态信息，由此形成全局与局部信息相结合的协同控制框架。

跨域协同控制高度依赖通信网络，通信时延、数据丢包、带宽限制和网络拓扑变化均会影响系统稳定与控制性能[47]。网络化控制系统研究分析了通信约束对多智能体控制稳定性和性能的影响，事件触发控制、预测控制、分布式控制和鲁棒控制等方法可用于降低通信不确定性对系统协同性能的影响[48-49]。此外，在传统通信链路受限时，北斗短报文可以作为传统通信链路的补充，为复杂环境下的关键状态和应急信息传输提供支持。

从任务执行层面来看，现有跨域无人系统协同控制已由传统的协同定位、协同导航和编队运动逐渐扩展至协同搜索、协同跟踪和任务接力，不同平台按照任务规划结果完成运动状态和任务角色协调。总体而言，现有研究已经初步建立了由统一时空信息、协同决策到多平台控制执行的跨域无人系统任务闭环。

（五）北斗与典型跨域无人系统融合应用

北斗与跨域无人系统的融合应用已从单平台定位服务向多平台协同拓展，并在空－地、空－海、空－潜以及多域协同等典型场景中形成了丰富的应用形态[1-3]，具体如图 3 所示。总体来看，北斗主要通过提

供统一时空基准、连续导航约束和广域信息交互，将不同物理域无人平台纳入统一时空信息体系，并进一步支撑跨域目标感知、任务接力和协同作业[10-11]。

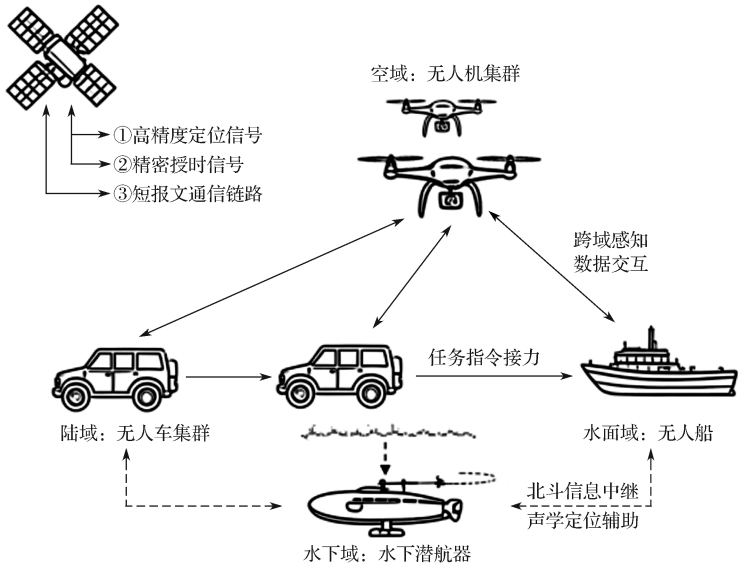

图 3　北斗赋能多域无人系统协同作业拓扑结构图

空－地跨域协同是目前应用较为成熟的典型形态之一。无人机具有机动性强、覆盖范围广和观测视角广等优势，可承担大范围巡检、目标搜索和环境监测任务；无人车则具有较强的持续作业能力和地面载荷能力，适用于目标接近、物资运输和精细化作业[13, 21]。依托北斗提供的统一位置和时间信息，可实现目标信息从无人机向无人车传递，形成“空中发现—地面接近—近场作业”的任务接力模式[5, 13]。在电力巡检、交通监测、灾害救援和城市应急等场景中，这类空－地协同系统能够充分发挥空中平台的大范围快速感知优势和地面平台的持续作业优势。相关空地协同研究已经涉及目标搜索、协同导航、路径规划和复杂环境作业等任务[25-27]。

空－海跨域协同主要面向海洋环境监测、海上搜救、海洋资源探测和海上设施巡检等任务。无人机能够快速覆盖大范围海域并完成目标搜索，无人船则能够在水面长时间航行，承担目标跟踪、环境监测和近距离作业任务。在此类任务中，北斗可为这两类平台提供统一的全球位置与时间参考，并结合短报文等通信能力实现远距离状态与任务信息交互[8-10]。已有研究进一步将北斗高精度导航引入无人机－无人船协同路径规划，表明北斗已由基础导航信息逐渐进入跨域任务规划环节[43]。当无人机发现海面目标后，可根据北斗提供的目标位置及自身状态信息，与无人船实现快速任务交接，无人船进一步完成持续跟踪和精细探测[43]，由此形成“空中快速搜索—水面持续跟踪—近场自主作业”的典型跨域任务模式。

空－潜跨域协同则进一步体现了北斗在跨域时空基准和信息中继方面的作用。由于卫星导航信号无法直接覆盖水下环境，水下航行器通常需要依靠惯性导航、声学定位、地形匹配等方式进行导航[14,19,29]。因此，可以水面平台或空中平台作为时空信息和通信中继，将北斗提供的全局位置基准间接传递至水下平台，实现空中、水面与水下无人平台之间的时空关联[9,14]。在海洋环境探测、目标搜寻和水下基础设施巡检等任务中，可由无人机完成大范围搜索和目标区域定位，再由水面平台进行区域引导，最终由水下航行器实施精细探测，形成“空中搜索—水面中继—水下探测”的跨域协同模式[2, 9, 14]。

空－地－海－潜多域协同是跨域无人系统综合应用形态的集中体现。多域无人平台可以根据自身运动能力和任务特性形成层次化任务分工，例如由无人机负责大范围环境感知和目标搜索，无人车开展陆域接近与作业，无人船完成水面巡航与区域监测，水下航行器执行水下目标探测[11]。在此类多域系统中，北斗的作用不再局限于单个平台的独立定位导航，而是为不同物理域无人平台提供统一时空参考，并支

撑平台状态共享、任务接力和跨域协同 [10]。

总体而言，现有典型应用已经形成了“空中快速感知—地面 / 水面持续跟踪—水下精细探测”等跨域任务模式，北斗在其中主要发挥统一时空基准、导航约束和广域信息交互作用。但目前相关应用仍以特定平台组合和特定任务场景为主，多域异构平台之间的深度自主协同仍处于研究和示范阶段。

三、北斗赋能跨域无人系统发展趋势及展望

综合现有研究，未来北斗赋能跨域无人系统将呈现由单一定位服务向统一时空基础设施、由导航支撑向通导一体化、由状态共享向时空智能决策、由多平台协同向群体自主作业、由可用向可信安全运行的发展趋势，具体如表 1 所示。

表 1　北斗赋能跨域无人系统未来发展趋势核心要素

发展方向	核心目标	需融合配套技术	现阶段待突破关键难题
连续可靠统一时空基准	实现峡谷 / 地下 / 水下全场景不间断全局时空统一	INS、视觉、声学、地形匹配多源融合导航	北斗基准水下远距离传递、长时间无信号误差抑制
导航通信一体化	北斗定位与短报文、5G、自组网动态链路协同调度	空天地海一体化异构通信网络	多链路自适应切换、高低速数据分流机制
时空智能	将时空数据转化为任务决策语义知识	多模态感知大模型、时空语义融合算法	时空信息与智能决策深度耦合的轻量化模型
群体自主协同作业	大规模异构集群自主任务分配、动态重构	分布式多智能体强化学习	海量平台低时延协同调度、去中心化控制
高可信自主运行	抗干扰、抗欺骗、故障容错安全运行	导航完好性监测、链路冗余备份、故障重规划	北斗欺骗干扰识别、极端环境系统容错机制
大规模多域系统落地	从小规模示范走向工程规模化应用	一体化硬件集成、标准化协同协议	多厂商无人平台兼容、全域系统集成成本高

（1）从高精度定位向连续可靠统一时空基准演进。未来跨域无人系统的时空基准将不再局限于北斗信号可用条件下的绝对定位，而是更加关注其在复杂环境中的连续性、完整性、可靠性和可信性。针对峡谷、室内、地下、水下以及电磁干扰等场景，需要进一步融合北斗、INS、视觉、LiDAR、雷达、声学导航和地形匹配等多源导航信息，形成能够跨越不同物理域的连续时空基准体系。尤其对于多域复杂无人系统，需要解决不同导航源之间的状态传递和基准保持问题，使北斗提供的全球绝对时空参考能够通过平台协同和多源融合延拓至卫星信号不可直接覆盖的区域。由此，北斗将由提供位置逐渐转变为维持整个跨域无人系统全局时空一致性的基础设施。

（2）从导航通信分立向通导一体化演进。当前北斗定位导航与短报文通信在跨域无人系统中已经形成一定程度的融合，但二者在系统层面仍相对独立。随着卫星互联网、5G/6G、低轨卫星通信和自组网技术的发展，未来将形成多层次、异构化的空天地海一体化通信网络。在这一体系中，北斗可以与卫星通信、蜂窝网络和无人平台自组网形成互补：高速链路负责大规模感知数据传输，北斗短报文等低速链路承担广域状态信息和应急信息传输，多链路根据任务需求和网络状态进行动态选择与切换。由此，北斗的作用将从单纯的导航信息源进一步扩展为跨域无人系统时空信息与网络连接的重要基础支撑。

（3）从时空信息支撑向时空智能演进。现有北斗应用主要向无人平台提供位置、速度和时间等基础状态信息，而未来跨域无人系统需要进一步将这些信息转化为任务规划和自主决策中的有效知识。北斗时空信息可以与视觉、LiDAR、雷达、声呐等多模态感知信息以及地图、任务和环境语义信息进行融合，形成面向任务的时空环境表征。在此基础上，多智能体强化学习、群体智能和大模型等人工智能方法可以利用统一时空信息进行任务分配、协同搜索、动态规划和自主决策，使无人系统从“知道自己在哪里”

进一步发展为“理解不同平台在什么时间、什么位置、承担什么任务”。因此，时空信息与人工智能深度融合形成时空智能将成为北斗赋能无人系统的重要演进方向。

（4）从多平台协同向跨域群体自主协同作业演进。现有跨域无人系统研究较多关注协同定位、编队运动和协同导航，而复杂实际任务更关注多平台能否自主完成完整任务链。因此，未来研究需要进一步突破从平台协同到任务协同的技术壁垒。在统一时空基准支撑下，不同平台可以根据自身能力、任务状态和环境变化自主完成角色选择、任务分配和动态重构，并通过跨域信息交互实现“搜索—发现—跟踪—接近—作业—反馈”的闭环任务执行。北斗在其中不仅提供位置和时间信息，还能够参与任务状态同步和跨域任务接力，使无人系统由多平台同步运动向多平台自主协同作业转变。

（5）从功能可用向复杂环境下可信自主运行演进。随着跨域无人系统进入灾害救援、远海作业、复杂基础设施巡检等高风险场景，系统可靠性和安全性的重要性进一步提升。北斗信号遮挡、欺骗与干扰，通信中断，平台故障以及环境突变等因素都可能导致跨域协同失效。因此，未来需要建立覆盖时空基准、通信链路、感知信息、任务决策和控制执行的系统级可信机制，包括导航完整性监测、异常信息检测、多链路冗余、平台故障容错和任务安全重构等。特别是在北斗信号不可用或部分平台失效情况下，系统仍应保持基本的时空关联和任务协同能力，从而提高跨域无人系统在极端环境下的自主生存能力。

（6）从典型场景验证向多域大规模系统应用演进。目前北斗与跨域无人系统的融合应用仍主要集中于空－地、空－海等典型平台组合，空－地－海－潜等多域异构无人系统的大规模协同应用仍面临系统集成、通信网络、时空基准、任务规划和安全控制等多方面挑战。随着无人平台数量增加和任务复杂程度提高，未来跨域无人系统将由小规模、强中心化的协同模式逐步向大规模、分布式、自组织的群体协同模式发展。北斗统一时空信息能够为大规模异构无人平台提供共同的时空参考，并与分布式决策和群体智能方法结合，支撑跨区域、多任务、多平台的自主协同运行。

本文围绕“跨域无人系统需求、北斗赋能关键技术、典型融合应用、发展趋势及展望”的逻辑主线，系统综述了北斗赋能跨域无人系统自主协同的研究进展，分析了跨域无人系统对统一时空基准、连续自主导航、协同感知、广域信息交互、任务规划与异构协同控制等方面的需求，梳理了北斗定位导航、协同感知与信息交互、任务规划与自主决策及协同控制等关键技术，并总结了空－地、空－海、空－潜及多域融合的典型应用模式。现有研究表明，北斗正由传统定位增强向时空信息支撑与自主协同赋能演进，但在复杂环境连续导航、跨域时空基准传递、多源信息深度融合以及时空信息与任务决策控制闭环等方面仍存在不足。未来应推动北斗与卫星互联网、5G/6G、多模态感知和人工智能等技术深度融合，构建高精度、连续、可信的统一时空基准与时空智能体系，促进跨域无人系统由多平台协同运行向多平台自主协同作业演进，为灾害救援、海洋探测、基础设施巡检和复杂环境作业等提供更加广域、智能和可靠的技术支撑。

参考文献：

[1] Zhang H，Hu B，Liu B，et al. Aerial-marine cross-domain uncrewed systems: An overview of cyberphysical coordination frameworks for marine applications[J]. IEEE Control Systems，2025，45(4)：28−45.

[2] Zhou J，Guo S，Zhang Z，et al. Cross-domain heterogeneous unmanned system: Development status and key technologies[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering，2026，18：100733.

[3] 江碧涛，温广辉，周佳玲，等 . 智能无人集群系统跨域协同技术研究现状与展望 [J]. 中国工程科学，2024，26(1)：117−126.

[4] 宋伟伟，林巍，楼益栋，等 . 北斗 +5G 时空基准的 TDOA 定位方法研究 [J]. 武汉大学学报（信息科学版），2023，48(7)：1170−1179.

[5] Hu B，Zhang H，Liu B，et al. Coordinated navigation control of cross-domain unmanned systems via guiding vector fields[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology，2024，32(2)：550−563.

[6] Cao Y，Lian W，Yang J，et al. Design of high-precision displacement safety monitoring and three-dimensional spatial alarm system for BeiDou based on intelligent algorithms[J]. Measurement: Sensors，2024，33：101099.

[7] Jin W，Nashir I M. Application of BeiDou navigation signal enhancement technology in agricultural machinery operation under a complex farmland environment[J]. Natural & Engineering Sciences，2025，10(3)：421−435.

[8] Li G，Guo S，Lv J，et al. Introduction to global short message communication service of BeiDou-3 navigation satellite system[J]. Advances in Space Research，2021，67(5)：1701−1708.

[9] He K，Weng D，Ji S，et al. Ocean real-time precise point positioning with the BeiDou short-message service[J]. Remote Sensing， 2020，12(24)：4167.

[10] Yang Y，Mao Y，Sun B. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system[J]. Satellite navigation，2020，1(1)：1.

[11] Rizk Y，Awad M，Tunstel E W. Cooperative heterogeneous multi-robot systems: A survey[J]. ACM Computing Surveys (CSUR)，2019，52(2)：1−31.

[12] Korsah G A，Stentz A，Dias M B. A comprehensive taxonomy for multi-robot task allocation[J]. The International Journal of Robotics Research，2013，32(12)：1495−1512.

[13] Zhou Y，Zhao J，Sun N，et al. Heterogeneous agents, unified missions: A survey and taxonomy on air-ground cooperative systems[J]. Robotics and Autonomous Systems，2026，203：105514.

[14] Zhou Z，Liu J，Yu J. A survey of underwater multi-robot systems[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica，2021，9(1)：1−18.

[15] Van Tran Q，Ahn H S. Multi-agent localization of a common reference coordinate frame: An extrinsic approach[J]. IFAC-PapersOnLine，2019，52(20)：67−72.

[16] Lajoie P Y，Ramtoula B，Wu F，et al. Towards collaborative simultaneous localization and mapping: A survey of the current research landscape[J]. Field Robotics，2022，2：971−1000.

[17] Lu J，Guo X，Su C. Global capabilities of BeiDou navigation satellite system[J]. Satellite Navigation，2020，1(1)：27.

[18] Boralessa K，Adama D，Lotfi A，et al. Cooperative perception for multi-robot systems in natural outdoor applications: A survey[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems，2026，112(77)：1−41.

[19] Boguspayev N，Akhmedov D，Raskaliyev A，et al. A comprehensive review of GNSS/INS integration techniques for land and air vehicle applications[J]. Applied Sciences，2023，13(8)：4819.

[20] Bekmezci I，Sahingoz O K，Temel Ş. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey[J]. Ad Hoc Networks，2013，11(3)：1254−1270.

[21] Chung S J，Paranjape A A，Dames P，et al. A survey on aerial swarm robotics[J]. IEEE Transactions on Robotics，2018，34(4)： 837−855.

[22] 郭兴，李擎，姚其家，等 . 异构无人系统协同控制研究进展 [J]. 工程科学学报，2025，47(1)：66−78.

[23] Ismail Z H，Sariff N，Hurtado E G. A survey and analysis of cooperative multi-agent robot systems: Challenges and directions[J]. Applications of Mobile Robots，2018，5：8−14.

[24] An X，Meng X，Jiang W. Multi-constellation GNSS precise point positioning with multi-frequency raw observations and dual-frequency observations of ionospheric-free linear combination[J]. Satellite Navigation，2020，1(1)：7.

[25] Li B，Feng Y，Gao W，et al. Real-time kinematic positioning over long baselines using triple-frequency BeiDou signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems，2015，51(4)：3254−3269.

[26] Chen X，Yang Y，Zhou C，et al. Study on fast positioning algorithm for BeiDou post-mission network RTK[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering，2020，780(3)：032051.

[27] Lin Y，Song L，Shen J，et al. Performance assessment of BeiDou-3 PPP-B2b real time pre-cise point positioning[J]. Scientific Reports，2025，15(1)：17325.

[28] Liu T，Chen H，Jiang W，et al. Impact of Beidou-3 upgrades and maintenance on code/phase biases estimation and PPP ambiguity resolution[J]. GPS Solutions，2026，30(1)：9.

[29] He Y，Li J，Liu J. Research on GNSS INS & GNSS/INS integrated navigation method for autonomous vehicles: A survey[J]. IEEE Access，2023，11：79033−79055.

[30] Xie F，Sun R，Kang G，et al. A jamming tolerant BeiDou combined B1/B2 vector tracking algorithm for ultra-tightly coupled GNSS/INS systems[J]. Aerospace Science and Technology，2017，70：265−276.

[31] Zang Z，Wang P，Zhang Y，et al. A multi feature fusion aided positioning for INS/Beidou with combination of BP neural Network and differential evolution kalman filter[C]//2022 International Conference on Wireless Communications, Electrical Engineering and Automation (WCEEA). IEEE，2022：231−236.

[32] Yang Y，Yu Z. A collaborative navigation model based on multi-sensor fusion of BeiDou and binocular vision for complex environments[J]. Applied Sciences，2025，15(14)：7912.

[33] Wang J，Zhang L，He Y. Multimodal fusion of BeiDou navigation signal in urban navigation services[C]//2024 IEEE 6th International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS). IEEE，2024：299−304.

[34] Li G，Guo S，Lv J，et al. Introduction to global short message communication service of BeiDou-3 navigation satellite system[J]. Advances in Space Research，2021，67(5)：1701−1708.

[35] Jing T，Qiu H，Wang W，et al. Fishing boat monitoring system based on BeiDou short message and 5G Network[J]. Procedia Computer Science，2025，259：1711−1718.

[36] 李罡，吕晶，程剑 . 卫星通信对北斗短报文发展启示 [J]. 航天技术与工程学报，2026，3(3)：50−56.

[37] 王军， 陈媛玲， 夏正霞， 等 . 基于 LoRa 组网与北斗短报文的偏远地区健康监测系统设计 [J]. 电子制作，2026，34(11)： 25−30.

[38] Liu L，Ru L，Wang W，et al. UAV path planning in threat environment: A*-APF algorithm for spatio-temporal grid optimization[J]. Drones，2025，9(9)：661.

[39] Pang C，Li Z，Ru L，et al. UAV multi-aircraft collaborative inspection track planning in complex dynamic environments[J]. Aerospace，2026，13(6)：548.

[40] Zhu F，Liu Y，Li F，et al. A switching localization and coverage path planning method based on BDS and visual-inertial odometry for farmland information collection[C]//2025 International Conference on Intelligent Robotics and Automatic Control (IRAC). IEEE，2025：59−64.

[41] Qin Y，Zhang C，Chen C，et al. Control policy learning design for vehicle urban positioning via BeiDou navigation[J]. Journal of Systems Science and Complexity，2024，37(1)：114−135.

[42] Chen Q，Li D，Song Y. An inverse reinforcement learning approach for truck route choice analysis with BeiDou navigation satellite system data in urban network[J]. Expert Systems with Applications，2026，304：130748.

[43] Yang J，Zhao L，Peng B. Joint path planning and energy replenishment optimization for maritime USV-UAV collaboration under BeiDou high-precision navigation[J]. Drones，2025，9(11)：746.

[44] Leng S，Lin T，Lin X. Research on complex parking model with multiple obstacles for automated driving[C]//2025 7th International Conference on Internet of Things, Automation and Artificial Intelligence (IoTAAI). IEEE，2025：328−332.

[45] Bao G，Ma L，Yi X. Recent advances on cooperative control of heterogeneous multi-agent systems subject to constraints: A survey[J]. Systems Science & Control Engineering，2022，10(1)：539−551.

[46] Yan B，Shi P，Chambers J. Cooperative control for heterogeneous multi-agent systems: Progress, applications, and challenges[J]. Science China Information Sciences，2024，67(5)：156201.

[47] Olfati-Saber R，Fax J A，Murray R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE，2007，95(1)：215−233.

[48] Hespanha J P，Naghshtabrizi P，Xu Y. A survey of recent results in networked control systems[J]. Proceedings of the IEEE，2007，95(1)：138−162.

[49] Tabuada P. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control，2007，52(9)：1680−1685.

Key Technologies and Development Trends of BeiDou-Enabled Autonomous Collaboration in Cross-Domain Unmanned Systems

LIANG Jiacheng[1,2]，ZHANG Hui[1,2]，ZHONG Hang[1,2]，WANG Yaonan[1,2]

（1. School of Artificial Intelligence and Robotics, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. National Engineering Research Center of RVC, Hunan University, Changsha 410082, China）

Abstract：Cross-domain unmanned systems are currently undergoing a transition from single-platform operation to multi-platform, multi-domain autonomous collaboration. The discrepancies across different physical domains in terms of motion mechanisms, perceptual modalities, communication conditions, and environmental characteristics pose heightened requirements for unified spatiotemporal reference, continuous autonomous navigation, cross-domain information exchange, and collaborative decision-making and control. The BeiDou Navigation Satellite System, featuring high-precision positioning, precise time dissemination, and short-message communication capabilities, serves as a critical spatiotemporal information infrastructure for cross-domain unmanned systems. Centering on BeiDou-enabled autonomous collaboration of cross-domain unmanned systems, this paper presents a systematic survey of pertinent research advancements, with particular emphasis on key technologies such as BeiDou-based positioning, navigation and unified spatiotemporal reference, cross-domain collaborative perception and information interaction, cross-domain mission planning and autonomous decision-making, as well as heterogeneous collaborative control and autonomous operation. Typical application paradigms of multi-domain integration are also distilled. Furthermore, future trajectories are discussed in terms of continuously reliable unified spatiotemporal reference, integrated navigation and communication, spatiotemporal intelligence, swarm autonomous coordination, and highly trusted autonomous operation, thereby offering a reference for the deep integration of BeiDou with cross-domain unmanned systems and for corresponding theoretical explorations and engineering practices.

Keywords：BeiDou Navigation Satellite System; cross-domain unmanned systems; heterogeneous unmanned systems; autonomous collaboration; unified spatiotemporal reference; swarm intelligence

责任编辑：徐海燕