

具身智能体域无线通信：现状、挑战及架构设计

王聪聪^{1,2}, 周一青^{1,2,3}, 石晶林^{1,2,3}, 朱慧玲⁴, 王江舟⁵

(1. 中国科学院计算技术研究所处理器芯片全国重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院计算技术研究所无线通信技术研究中心, 北京 100190; 3. 中国科学院大学计算机科学与技术学院, 北京 100049;

4. 英国肯特大学工程与数字设计学院, 坎特伯雷 CT2 7NZ; 5. 东南大学信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为系统梳理具身智能体域无线通信的现状与挑战, 首先阐释具身智能体域无线通信的基本概念, 并分析其在超低时延、超高可靠、超大连接及复杂遮挡环境下的多维需求和关键挑战。随后, 梳理短距无线通信的传输模型、性能边界及最新研究进展。在此基础上, 提出了一种多模融合无线通信系统架构, 利用声波、无线电波、光波等多波段信号载体的互补特性, 为机器人域内海量传感节点与控制单元的实时交互提供了创新技术路径。最后, 进一步探讨了该领域当前面临的开放性问题, 并展望面向未来具身智能体域无线通信技术发展方向。

关键词: 体域无线通信; 具身智能; 多模融合无线通信系统; 短距无线通信

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025229

Wireless body-area communication for embodied intelligence: status, challenges, and architecture design

WANG Congcong^{1,2}, ZHOU Yiqing^{1,2,3}, SHI Jinglin^{1,2,3}, ZHU Huiling⁴, WANG Jiangzhou⁵

1. State Key Lab of Processors, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Wireless Communication Technology Research Center, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3. School of Computer Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4. School of Engineering and Digital Arts, University of Kent, Canterbury CT2 7NZ, U.K.

5. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

Abstract: To survey the advances and challenges in wireless body area communication for embodied intelligence (EI), the concept of wireless body-area communication for EI was first explained, with multi-dimensional requirements and key challenges being identified, such as ultra-low latency, ultra-high reliability, massive connectivity, and main challenges in complex occlusion environments. Then, the transmission models, performance limits, and recent research progress in short distance wireless communication were systematically summarized. After that, a multi-mode integrated wireless communication system architecture was proposed, leveraging the complementary characteristics of multi-band signals, including acoustic, radio, and optical waves, to enable real-time interaction between massive sensor nodes and control units within robot domains. Finally, open issues in this field were discussed, along with future research directions for wireless body-area communication in embodied intelligent systems.

Keywords: wireless body-area communication, embodied intelligence, multi-mode integrated wireless communication system, short distance wireless communication

收稿日期: 2025-09-30; 修回日期: 2025-12-15

通信作者: 王聪聪, wangcongcong@ict.ac.cn

基金项目: 中国科学院计算技术研究所创新基金资助项目(No.E261020)

Foundation Item: Innovation Projects of the Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences (No.E261020)

0 引言

全球具身智能 (EI, embodied intelligence) 行业正蓬勃发展。在政策、市场与技术协同驱动下,我国已高度聚焦具身智能核心技术与产业发展。《中国制造 2025》将机器人作为重点发展领域部署^[1]。2023 年年底工业和信息化部印发《人形机器人创新发展指导意见》^[2], 意见指出, 到 2025 年我国将初步建立人形机器人创新体系。

EI 强调智能体通过其物理身体感知环境、与环境交互并从中学习, 最终实现智能行为。其核心在于将智能体的物理载体 (如机器人、无人机、智能汽车等) 与动态环境交互相结合。本文聚焦于 EI 体域内高效可靠信息交互这一关键需求, 剖析其无线通信技术的挑战与解决方案。

EI 作为软硬件深度集成的复杂实体, 融合人工智能 (AI, artificial intelligence)、控制理论、通信技术等多学科知识。运动控制作为其核心功能, 依赖传感器与控制器单元的精密协同。传统专用电缆互联方式存在显著局限^[3-4], 基于专用电缆的有线通信方式不仅增加了 EI 的体积和重量, 还降低了其灵活性和可拓展性, 不便于快速组装与集成测试^[5]。此外, 由于 EI 体内空间狭小, 且走线结构设计复杂, 需要综合考虑多方面因素, 在确保不会影响 EI 关节的灵活性和运动范围情况下, 需同时严格避免线缆过度弯折而导致的保护层破损或导线断裂^[6]。

无线体域通信 (WBAC, wireless body-area communication) 是以人体为中心, 由分布在体表、衣物、体内及周围 2 m 内的传感器、组网设备和终端构成的短距离通信网络^[7]。面向具身智能的体域无线通信 (EI-WBAC, wireless body-area communication for embodied intelligence) 旨在解决 EI 体域内传统有线连接的弊端, 满足 EI 内部传感数据传输、指令下发及多智能体间紧耦合协作等场景下的“短距离” (通常 1~3 m) 可靠连接, 这天然契合短距无线通信技术的应用范畴。然而, 受限于 EI 体域内环境的极端特殊性, 即空间极其狭小、金属结构部件高度密集、关节运动导致信道动态剧烈以及复杂电磁干扰等, 通用短距无线通信技术在此环境下往往面临严峻挑战, 性能难以满足高可靠、低时延和强抗扰的 EI 控制需求, 亟须深入探究如何在 EI 体域内苛刻的物理约束下实现鲁棒高效的无线连接。

1 EI-WBAC 能力需求及挑战分析

EI 的经典架构遵循感知-控制-执行的闭环控制框架, 主要由传感、控制与执行三大核心模块构成。由于 EI 体内空间有限, 其体内大量的专用通信线缆增加了其结构的体积和重量, 进而增加了其运动时的功耗。此外, 通信线缆可能会由于 EI 运动过程中速度过快、电机发热等而连接松动或脱落, 为系统的可靠运行与维护带来挑战。

1.1 EI 无线通信研究现状

目前, 围绕 EI 无线通信技术的研究可分为多 EI 之间的无线通信^[8-10]和 EI-WBAC^[5,11-18]两类。其中, 多 EI 之间的无线通信技术旨在研究多个 EI 之间协同工作场景下的信息交互, 保障信息和资源的共享, 以实现更高效的任务完成。文献[8]针对多 EI 协同巡检场景, 研究了机器人作为移动中继将现场传感信息传输至远程基站的问题, 提出了一种携中继动态规划算法, 有效优化了经 EI 中继到远程基站的无线链路质量。文献[9]构建了多 EI 系统的通信与验证平台及配套仿真器, 并以协同物体搬运为典型用例进行分析。文献[10]研究了基于无线网络的协作多具身智能体系统, 提出了动态任务分配算法以增强群体协作能力。

在 EI-WBAC 方面, 现有研究主要聚焦于两类场景: 一是汽车、飞机舱等封闭舱体内的无线通信; 二是工业环境及人形机器人领域内的无线通信。

汽车智能体内部属于金属封闭空间, 无线电波在其中经历显著的多径传播, 难以穿透舱体, 但受外部干扰较小。文献[11]针对地铁车厢这一典型“金属盒”场景, 系统地给出了 25~40 GHz 毫米波频段的功率时延谱、路径损耗模型、角扩展等信道参数, 并指出车厢端墙、天花板等金属结构带来的波导效应显著降低了路径损耗指数。随着 AI 及无线感知技术的发展, 基于无线通信的舱内状态感知成为新方向, 文献[12]提出了无线 AI 融合框架, 利用商用无线保真 (Wi-Fi, wireless-fidelity) 设备同时完成驾驶员身份认证、呼吸监测、乘客计数和儿童遗留检测, 并设计基于信道状态信息 (CSI, channel state information) 幅值的呼吸频谱估计及动态规划多迹线跟踪算法。

与汽车智能体舱内相似, 飞机客舱因金属舱壁、座椅阵列、行李架等强反射/遮挡结构, 形成“隧道-腔体”式多径环境。文献[13]旨在对机舱信

道在多个频率下进行初步统计表征,在空客 A321-200 飞机内部进行了 3.5~60 GHz 频率范围内的窄带测量,提供了射频频段的多频实测与统计模型,为毫米波/太赫兹机载网络的链路预算、切换与波束管理提供了实测依据。文献[14]提出了一种基于阅读灯的光保真(LiFi, light fidelity)通信系统,用于实现高通量和无射频干扰的机上宽带连接,分析了工作波长、舱内模型精度和终端移动性对光信道的影响,并评估了直流偏置光学正交频分复用系统在机载 LiFi 信道下的性能。文献[15]面向飞机物联网(IoT, Internet of things)应用,设计了无线功率传输系统,提出了“通信-供能”一体化的可扩展飞机互联网部署方案。

在工业场景下,机械臂在一定距离范围内高速往复运动,形成移动、遮挡和金属散射并存的体域信道,文献[16]使用载波频率为 5.85 GHz 的宽带信道探测仪,在工业机器人执行拾取-放置任务过程中进行了动态信道测量,针对弱散射与强散射 2 种环境评估了信道特性,并给出了时延统计参数。

在人形机器人体域无线通信方面,日本的早稻田大学 Megumi Saito 团队对 EI-WBAC 进行了开创性探索。2020 年,该团队率先针对机器人体域内线缆繁重的问题,提出了基于正交频分多址接入的无线通信方案^[5],旨在满足机器人体域内近百个传感器信息的传输。2022 年,该团队利用机器人结构内部空间作为波导实现无线通信,针对音频和视频传感器提出了一种基于不同无线传感器通信的混合介质接入控制方案^[17],利用高频仿真软件来模拟机器人的真实情况,并找出信号直接通过机器人传播的可能性。2023 年,该团队又研究了一种改进的波导模型来适应机器人腿结构,并通过旋转关节弯曲进行了电磁研究^[18],经过对矩形和圆形波导模型的研究发现,该系统的矩形波导模型是最优的,其工作频率在 2.83~3.76 GHz。

综上, EI-WBAC 在多 EI 协同、封闭舱体环境、工业及人形机器人体域等场景中已形成差异化的研究方向,现有研究正由单点单频段技术向跨频段、跨介质和通感能一体化的新阶段迈进,同时对于 EI 无线通信研究多聚焦于信道特性的分析,这为无线感知、智能组网等领域的研究奠定了基础。

在产业应用方面,虹科基于 IO-Link 协议提出 IO-Link Wireless 通信解决方案,旨在替代传统有线

连接,实现工业设备的无线控制与数据传输。该方案经工业现场验证,单主站最多挂载 40 台从设备,可满足 5 ms 确定性通信周期, 10^{-9} 数据包错误率,其采用自适应跳频技术,支持与 Wi-Fi 等同频段系统共存,能够满足具身智能体域中低速传感器数据线缆替代的需求^[19]。意法半导体研发 ST60 毫米波非接触式连接器,使用毫米波在 2 个设备间建立短距离的低功耗、大带宽的无线连接,配合独特设计的全双工圆极化天线,不受线缆限制,实现 360° 旋转全双工数据传输^[20],能够满足活动关节之间的线缆替代问题。无线替代技术已在航空、航天等高可靠场景落地验证。文献[21]表明,用无线链路部分取代航电有线总线可减重并提升安全性。中国航天科技集团一院万源科技已成功研制“航天星闪”无线通信模组,并完成搭载飞行试验,验证了星闪在火箭系统中实现无缆化组网的可行性,既降低了箭体载荷,也提高了布线灵活度与维护便利性^[22]。

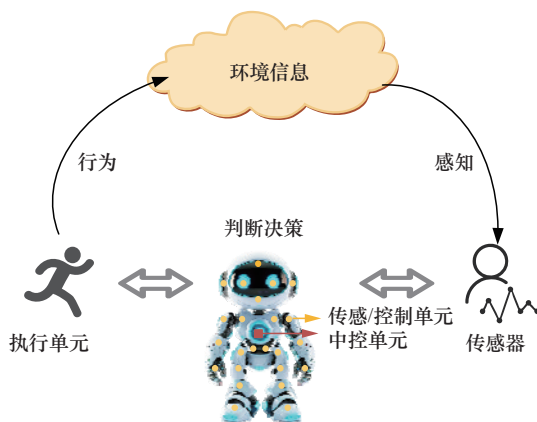
由此可见,在 EI-WBAC 系统中关于无线替代有线的应用场景,现有工作主要针对中低速传感器数据线缆^[19,22]和连接活动关节的线缆^[20]进行替代,这一选择基于当前技术条件与工程实践要求。与此同时,高频/高速数据总线、高实时性控制总线及主功率传输线缆,因对通信实时性、可靠性和确定性要求严苛,当前无线通信技术尚不具备替代能力。例如,伺服驱动器和紧急制动开关所采用的控制器局域网(CAN, controller area network)总线与 EtherCAT 总线^[23],其通信需求便呈现高确定性和高可靠性的刚性特征。运动控制需微秒级确定性时延以保障轨迹精准及近 100% 可靠性^[24],而无线信道技术固有的随机时延与丢包风险,与这类高要求存在本质冲突,当前无线通信技术尚未能满足此类高要求,故暂不考虑其无线化。

1.2 EI 体域通信能力需求

EI-WBAC 的概念设计旨在通过无线通信将 EI 的感知与控制单元连接至控制中心,解决不便于有线连接的狭小空间通信问题。EI 的感知系统由内部传感器和外部传感器模块共同组成,分别用于获取内部和外部环境信息。内部传感器模块用来检测其自身状态,如关节的运动状态等。外部传感器模块用来感知外部世界,检测作业对象与作业环境的状态,如视觉、听觉、触觉等。EI 的控制系统旨在根据其作业指令和从传感器反馈回来的信号,驱动执

行机构完成指定运动和功能，其核心包括控制器、控制算法及关节伺服控制器等。控制器依据作业要求接收编程指令，协调运动控制，并基于环境信息进行运动规划。

将EI域内有线通信系统替换为无线通信方案，对通信性能提出了严峻挑战，特别是在可靠性、吞吐量、时延及可扩展性方面。相较于传统室内短距无线通信场景，智能体域内的信号传输环境极为苛刻，EI域大量传感与控制单元布局高度紧凑，导致无线电信号的多径效应显著增强，信号衰减更为严重。如图1所示，EI通过感知系统收集环境信息，经由控制单元进行数据处理与决策，驱动执行机构完成相应动作，并将结果反馈至感知系统，形成一个自主适应环境与执行任务的闭环流程。在此过程中，EI-WBAC的通信能力需求主要体现在以下4个方面。



1) 高可靠需求

由于EI域环境特有的复杂干扰场景对信号传输的严苛要求，在EI-WBAC的核心能力需求中，高可靠性占据着至关重要的地位。EI域内部往往密集分布着各类金属元器件，这些金属元器件会对无线信号产生强烈的反射、折射与屏蔽作用。当信号穿越金属元器件时，特定频段的电磁波可能被彻底吸收。与此同时，多径反射造成的信号叠加易诱发码间干扰，令接收端难以精准解调数据。此外，EI域环境中通常存在多台无线设备同时工作的场景，这些设备可能工作在相近频段，由此产生的同频干扰和邻道干扰会进一步恶化通信质量。因此，EI-WBAC需具备抵御复杂干扰的高可靠性，以确保在各种极端场景下实现信号的稳定传输。

2) 高吞吐需求

EI域内部往往集成了近百个传感器与控制器节点，这些节点如同智能体的“神经末梢”与“决策单元”，在工作过程中需要实时交互多种类型的数据，如加速度传感器、力传感器产生的高频时序数据、视觉传感器捕捉的动态视频流、中央控制器下发的精密控制指令等。具体而言，在服务场景中，一台具备环境感知功能的服务机器人，其头部的深度摄像头每秒需传输数十帧1080P分辨率的图像，单帧传输数据量可达数兆字节，叠加肢体关节处数十个姿态传感器的实时反馈，单秒数据总量在百兆级别。而在工业场景中，协作机械臂的视觉引导系统与力控模块协同工作时，高清视觉数据与毫秒级力反馈数据的并行传输，更会对通信链路的吞吐能力提出极致要求。然而，在有限带宽与存储资源下，海量数据传输常需借助先进压缩算法减少数据量，但压缩与解压缩运算需分别在收发端执行，会增加数据处理时延，进而影响系统实时响应性能。因此，亟须探索高吞吐量的EI-WBAC技术，实现海量数据的并行高效传输与高频指令的瞬时下发。

3) 低时延需求

EI在执行高速运动、危险操作或与人类进行协作时，需要实时接收控制指令并实时反馈运动状态、传感器数据等信息。图像与视频数据的及时传输，能确保智能体快速识别环境中的障碍物或目标对象，为路径规划与动作决策提供依据。传感器的高频数据反馈可让控制器精准感知肢体姿态变化，实现运动的平稳调控。而控制指令的高效下发，则直接决定了执行器的响应速度与动作精度。然而，域内的无线通信面临着带宽资源与存储容量受限的双重约束。为缓解传输压力，现有方案常采用先进的数据压缩算法减少数据量，但这类算法压缩与解压缩过程往往需要在发送端与接收端进行复杂的运算处理，不可避免地会引入额外的时延。在对实时性要求严苛的场景中，这种时延可能导致“决策滞后”，特别是在工业机械臂高速抓取过程中，压缩算法引入的几十毫秒时延，可能使其错过最佳操作时机，引发抓取偏差。

4) 可扩展需求

随着EI的智能化程度不断提升，域内的传感控制节点数量正以显著速度增长。具备精细操作与环境感知能力的智能体的肢体关节、表面肌理、

内部核心部件等处已集成数百个节点,节点的密集化分布使EI-WBAC系统必须具备灵活的节点接入与拓扑调整能力。当节点接入规模扩大时,传统固定拓扑的通信网络极易出现接入拥堵的问题,新节点的频繁加入可能导致信道资源争抢,部分老旧节点的信号可能被新节点覆盖而失效,进而引发数据传输的时延与丢包。此外,数据维度的持续拓展进一步加剧了对可扩展性的需求,高清图像、三维点云、多模态传感融合数据等复杂信息的传输需求激增,不同类型数据对带宽、时延和可靠性的要求存在显著差异,这就要求通信系统能够动态适配多样化的业务需求,在节点规模扩大与业务类型激增的双重压力下,依然能够保持高效、可靠和稳定的传输性能。

1.3 EI-WBAC面临的挑战

EI体域内通信环境面临复杂性高、节点并发接入需求高、超低时延、超高可靠等严苛性能要求,这些要求相互交织,导致现有通信技术在应对EI体域场景时面临频谱资源分配紧张、信号多径传播干扰显著、多节点并发传输冲突等一系列核心难题,这些挑战成为机器人具身智能体域通信性能提升的关键瓶颈。

1) 频谱拥挤问题

频谱是各种应用的关键资源,目前应用最为广泛的电磁波频段是位于3 kHz~300 GHz的射频频段^[25],广播、移动通信、卫星通信、雷达和导航等无线通信系统都工作在射频频段。近年,随着5G、IoT和卫星通信等技术和服务的井喷式涌现,无线电频谱拥挤的问题日益突出^[26]。作为新兴业务,EI-WBAC同样面临频谱拥挤问题。EI体域内空间极其有限,需支持近百个传感控制节点接入,节点密集布局极易引发同/邻频干扰,降低数据传输可靠性与频谱效率。

2) 信号多径问题

EI体域内广泛分布的金属外壳、关节、电机等元件,会对无线信号产生强烈反射、折射和散射。加之智能体的动态特性,其运动导致收发机位置及传播路径实时变化,加剧了信号衰减与干扰的不可预测性。现有动态信道估计、自适应调制等技术能够实时跟踪信号的多径效应变化,动态调整接收机参数和处理信号,以适应多路径传播环境或通过多径补偿算法,对多径信号进行补偿以减小多径效应

对系统的影响。此外,EI运动引起的信号传播路径变化、反射角度等更加难以预测,传统抵抗多径的关键技术往往失效,亟须开发更有效的方案以保障通信性能与稳定性。

3) 多节点并发冲突问题

EI体域内集成了视觉、温度、压力、位置等近百个异构感知与控制节点。其数据类型、量级、实时性、稳定性及功耗需求各异,这导致机器人具身智能体域内多个节点同时发送数据或请求访问共享资源时可能导致资源竞争和数据碰撞,使接收节点无法正确解析接收数据。由于EI体域空间狭小、节点分布高度密集,同频、邻频干扰和资源申请冲突问题尤为突出。如何在有限带宽约束下,协同优化信号特性、通信协议与网络管理策略,有效规避并发通信中的干扰、碰撞及资源竞争,是确保EI-WBAC网络稳定性与可靠性的关键挑战。

综上所述,EI-WBAC系统对信道稳定性、多频段适配、动态环境适应性等核心能力的需求日益凸显,同时也面临着金属散射干扰、移动遮挡导致的链路波动、多设备协同传输冲突等挑战。这些因素充分凸显了选择与优化短距无线通信技术的重要性。下文将梳理总结现有短距无线通信技术的研究进展。

2 短距无线通信现状

在满足具身智能体域无线通信对高可靠性、高吞吐及可扩展能力需求的探索进程中,现有无线短距通信技术成为关键支撑。当前主流的短距无线通信技术包括Wi-Fi^[27]、蓝牙^[28]、ZigBee、超宽带(UWB, ultra wide band)、星闪^[29]等。

2.1 典型短距无线通信技术

Wi-Fi是当今使用最广泛的一种无线网络传输技术,是物联网时代的重要连接技术之一,旨在持续满足人与人、人与物和物与物的随时随地连接^[27]。Wi-Fi技术在传输速率和覆盖范围上有明显优势,智能手机、平板电脑和笔记本电脑都支持Wi-Fi接入互联网。Wi-Fi技术基于IEEE 802.11标准^[30]。802.11n标准数据传输速率达300 Mbit/s,吞吐量接近100~150 Mbit/s。随着技术的演进,802.11ac标准理论传输速率已经达到7 Gbit/s。为实现速度更快、时延更低、容量更大、更安全和更省电的目标,推出了Wi-Fi 6标准(802.11ax)^[31],Wi-Fi 6进一步提升了传输速率,单流最快传输

速率为 1 201 Mbit/s，理论最大数据吞吐量为 9.6 Gbit/s。Wi-Fi 7 传输速度可高达每秒 30 Gbit/s，除了支持传统的 2.4 GHz 和 5 GHz 这 2 个频段，还将新增支持 6 GHz 频段，并且 3 个频段能同时工作^[32]。

如图 2 所示，Wi-Fi 网络架构的基本组成部分包括无线接入点 (AP, access point)、客户端设备和工作站。基本服务集 (BSS, basic service set) 是 802.11 标准的基本组件，由一组相互通信的工作站构成，在 BSS 中所有的终端关联到一个 AP 上，该 AP 连接其他有线设备，并且控制和主导整个 BSS 中全部数据的传输过程。分布式系统 (DS, distribution system) 用于连接不同的 BSS，在 DS 中，AP 既可以作为站点接入 DS，也可以作为连接点让其他设备加入网络。在构建扩展服务集 (ESS, extended service set) 的过程中，各个 BSS 需相邻部署以实现地理邻近性，并需通过 DS (通常是以太网) 相互连接以确保互联互通性，从而协同提供无缝的无线连接体验。凭借高传输速率与相对较广的覆盖范围，在 EI 体域通信中，Wi-Fi 能够在一定程度上满足高吞吐需求，尤其是在一些配备高清视觉系统的 EI 进行环境测绘数据回传时，Wi-Fi 可保障数据快速传输。然而，Wi-Fi 在面对多节点接入时，受信道资源限制，容易出现信号干扰、传输时延增加等问题，在体域节点数量持续增长的可扩展需求场景下，其性能稳定性面临挑战。

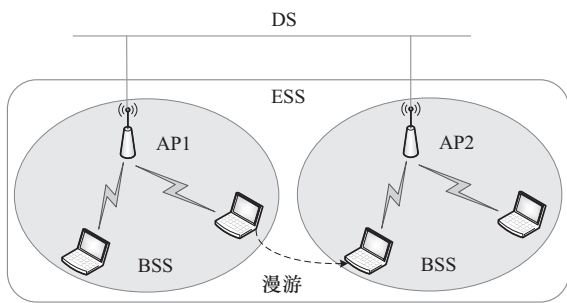


图 2 Wi-Fi 网络架构

蓝牙技术凭借其低功耗与快速配对等优势，在短距离设备互联领域发挥着关键作用。工作于 2.4 GHz ISM 频段，运用频率跳变扩频技术避免干扰，尽管其传输速率相对较低，通常在 1~3 Mbit/s，但在传输语音、控制信号等小规模数据场景中表现出色^[28]。如图 3 所示，一个基本的蓝牙系统由天线、

链路控制、链路管理和软件组成。通过其高效的通信协议和网络拓扑管理，蓝牙技术不仅能够与少量设备形成紧密的小规模网络，还能扩展构建由多个独立的微微网组成的大型分布式网络，从而实现广泛的设备互联和数据交换^[8]。



图 3 蓝牙系统构成

蓝牙 4.0 以后的国际标准包含传统蓝牙模块和低功耗蓝牙设备部分^[33]。传统蓝牙模块以信息互通和设备连接为重点，主要用于音频传输、文件传输等场景；低功耗蓝牙设备不需要占用太多带宽，在设备匹配、数据同步、定位等场景中有较好的应用。2021 年，蓝牙 5.3 版本被推出，其收发电流低至毫安级，旨在解决个人消费电子以及智能家居等场景的低功耗应用问题^[34]。目前，手机及大多数的穿戴如耳机等设备基本使用双模蓝牙芯片，即同时具有传统蓝牙模块和低功耗蓝牙设备功能。在 EI 体域内部分传感器向控制器传输简单状态信息时，蓝牙可凭借低功耗优势，保障传感器长期稳定运行。然而，蓝牙技术的传输速率和并发能力有限，难以满足 EI 对高吞吐数据传输及节点数量增多的可扩展需求。

ZigBee 是一种基于 IEEE 802.15.4 标准的短距离、低功耗和低传输速率的无线网络技术。ZigBee 技术采用自组织网络拓扑，具有较强的网络自愈能力和节点扩展能力，理论上一个 ZigBee 网络可容纳多达 65 000 个节点。如图 4 所示，ZigBee 可形成星形、树形和网状 3 种主要的网络拓扑结构。星形拓扑包含一个中央协调器节点和多个终端节点，每个终端节点只能与中央协调器节点通信，不能直接

与其他终端节点通信;树形拓扑包括一个中央协调器节点和多个路由器节点以及终端节点,中央协调器节点连接一系列的路由器节点和终端节点,路由器节点也可以有自己的子节点;网状拓扑由多个路由器节点构成,它们可以相互连接,形成一个扩展的网络,提高了网络的覆盖范围和通信可靠性。一个 ZigBee 网络可以容纳多个设备并生成自组织网络,可以进行多通道通信,当一个传输路径中断时,可以选择其他路径进行传输。在 EI 体域通信可扩展需求方面, ZigBee 技术在一定程度上能满足新增节点的接入需求。然而,其传输速率最高仅为 250 kbit/s,难以满足 EI 体域内高清视频和三维点云这类大数据量信息实时性传输要求。

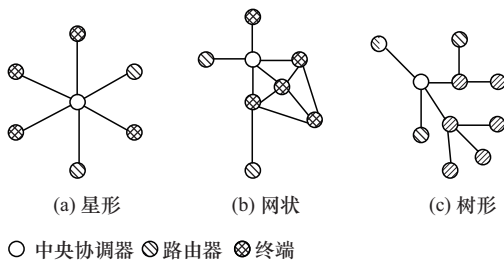


图4 ZigBee网络拓扑结构

UWB 技术以其高带宽特性,显著提升无线信号传输的抗干扰能力。该技术不依赖于传统的信号调制与解调过程,而是通过精确测量接收器中脉冲信号的到达时间来提取信息。在 UWB 技术的应用中,脉冲信号发射器产生一系列周期性脉冲,这些脉冲在与有用信息进行调制后,能够迅速产生极窄的脉冲信号,其宽度甚至可达纳秒级别。随后,这些脉冲信号经过功率放大器的增强,并通过特制天线发射出去,接收器在捕获 UWB 信号后,会对其进行放大和处理,以提取出有用信息。通过与发射器同步的伪随机码对信号进行调制, UWB 技术能够有效地减少对其他信号的干扰。美国联邦通信委员会将 UWB 信号定义为

$$\frac{f_H - f_L}{f_c} = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L} > 20\% \quad (1)$$

或 $f_H - f_L \geq 500 \text{ MHz}$

即相对带宽大于 20% 或绝对带宽不小于 500 MHz, f_H 、 f_L 和 f_c 分别表示功率频谱密度的峰值衰减下降 10 dB 时所对应的最大频率、最小频率及信号中心频率。按照此定义,信号带宽分类如图 5 所示。

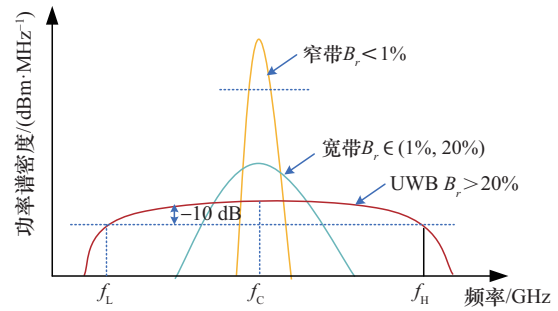


图5 信号带宽分类

目前, UWB 技术在低速和大范围室内区域的精确定位方面展现出了巨大的潜力。在 EI 体域通信中,对于一些需要精准定位与快速数据交互的场景,如多 EI 协作搬运任务中各机器人的精确定位及实时数据共享, UWB 技术可发挥重要作用。但其信号传播距离相对较短且对硬件要求较高,限制了其在更大范围和更多复杂 EI 体域场景中的应用。

“星闪”是中国原生的新一代近距离无线通信技术。作为新一代短距无线通信技术的代表,星闪技术正为 EI 体域无线通信带来新的契机。如图 6 所示,星闪 Release 1.0 系统架构由星闪接入层、基础服务层与基础应用层三部分构成^[29]。星闪接入层提供星闪基础接入 (SLB, sparklink basic) 和星闪低功耗接入 (SLE, sparklink low energy) 2 种通信接口: 1) SLB 主要对标 Wi-Fi 技术,用于承载智能终端、智能汽车、无线投屏、工业机械运动控制等场景。SLB 接口采用超短帧、多点同步、双向认证、快速干扰协调、双向认证加密、跨层调度优化等多项技术,用于支持具有低时延、高可靠、同步精度、高并发和高安全等传输需求的业务场景。2) SLE 主要对标蓝牙技术,用于无线耳机、鼠标、无线电池管理系统 (汽车钥匙系统)、工业数据采集等。SLE 采用 Polar 信道编码提升传输可靠性、减少重传并节省功耗,同时支持最大 4 MHz 传输带宽、最大 8 相移键控调制等,充分考虑节能因素,用于承载具有低功耗和高可靠性诉求的业务场景。SLB 和 SLE 面向不同的业务诉求,提供不同的传输服务,两者相互补充并根据业务需求进行持续、平滑演进。在 EI 体域内,无论是应对节点数量激增的可扩展需求,还是满足高吞吐数据传输需求,如大量传感器数据、高清图像视频的实时传输,以及保障高可靠性通信,星闪技术都展现出一定潜力,有望推动 EI 体域无线通信的实现及应用。

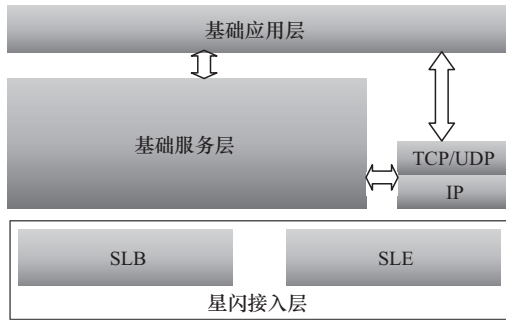


图6 星闪Release 1.0系统架构

2.2 性能对比及未来发展趋势

表1展示了Wi-Fi、蓝牙、ZigBee、UWB、星闪等典型短距无线通信技术在所使用频段、传输速率及功耗方面的对比性能。由此可见，每种技术都有其独特的优势和适用场景，相较而言，Wi-Fi技术提供的传输速率最高，适合需要高带宽和高传输速率的应用场景；蓝牙技术的传输距离较短、传输速率较低、功耗介于Wi-Fi和ZigBee之间、具有低成本的优势，适用于个人穿戴及移动设备间的短距离通信；ZigBee技术具有低功耗、较强的自组网及自愈能力，适用于低功耗和大规模组网的应用；UWB技术则在强抗干扰能力方面展现出优势；尽管星闪技术已展现出诸多优势，其尚未经历大规模商用的充分检验，在实际复杂运行环境中，可能出现通信不稳定、未知故障等情况，尤其在EI体域这种节点密集和干扰复杂的场景下，稳定性挑战更为突出。

尽管各短距无线通信技术各具优势且能够适应部分场景，但在智能汽车、智能家居、智能终端和智能制造等新兴领域的快速发展下，现有短距无线通信技术在时延、可靠性、同步精度和安全性等方面仍难以满足需求。这些技术需要适应不断变化的电磁环境，并在保持通信性能的同时减少能量消

耗，这对电池供电的设备特别重要。在智能化的大背景下，未来短距无线通信技术的发展不仅需要满足高速率的数据传输需求，还要考虑到低功耗、高安全性和高抗干扰性。例如，Wi-Fi 6E通过扩展到6 GHz频段，有效改善了Wi-Fi技术频谱短缺的问题，提供了更多的信道和更大的带宽^[31]。蓝牙5.2提供了更高的吞吐量、增加广播容量，以及改进的信道共存算法，支持长距离与接近需求，这对智能家居和物联网设备的智能控制和监测功能至关重要^[34]。星闪2.0在技术上实现了端到端的协议体系，提供了更加完善的通信底座和更丰富的应用标准，支持原生的音视频、人机交互、定位等应用。

3 多模融合具身体域通信架构设计

为实现高可靠和低时延的无线传输，需立足EI体域信息交互特性，在硬件边界约束下，融合有线通信的可靠性、实时性及安全设计理念，构建适配性通信架构。

3.1 设计目标

为保障机器人身体域通信与现有无线设备通信之间的频谱资源不发生干扰冲突，解决传统无线通信频谱资源有限和复杂的分配问题，充分利用全频段通信资源，本文提出了一种融合声通信、无线光通信和无线电通信的多模融合具身体域通信架构，创新融合声波、光波、无线电波等多媒介，构建多模融合的通信系统以满足EI体域通信需求。区别于现有单一或固定的通信模式，该架构的核心优势在于动态智能地联合调度多种通信模式。

3.2 多模融合具身体域通信架构

针对传统单一载体的通信方式难以应对复杂具身体域环境中的多样化需求的问题，本文提出了多模融合具身体域通信架构。该架构通过深度整合无

表1 典型短距无线通信技术对比

技术	标准	频段/GHz	传输速率	功耗/mA	网络容量	覆盖距离/m	典型拓扑
蓝牙	IEEE 802.15.1	2.4	1~24 Mbit/s	20	7~8个活跃设备	10~100	点对点、星形、广播
Wi-Fi	IEEE 802.11	2.4/5.0/5.8	0.6~9.6 Gbit/s	10~50	数十台设备（如32、64、128等）	10~50	星形
Zig-Bee	IEEE 802.15.4	2.4	250 kbit/s	5	单个网络理论上>6.5万个节点	10~100	Mesh网状、星形、树形
UWB	IEEE 802.15.3	3.1~10.6	500 Mbit/s	10~50	数十到数百个定位标签	10~50	点对点、星形、点对多点
星闪	NearLink	2.4/5.8	12~900 Mbit/s	<2	单网络>4 096台设备	约200	星形、树形和Mesh网状

线电波、光波、声波等多种物理信道特性,构建一套协同通信架构,为机器人领域海量传感节点与控制单元的实时交互提供了创新技术路径。

如图 7 所示,通过在机器人领域布设多种通信模块,形成立体多模融合具身体域通信网络场景。在物理层设计中,架构创新性引入声、光、电磁信号收发与调制,通过组件化封装、功能解耦和虚拟化调度等技术手段,充分发挥不同信号载体在智能体域中的互补优势。该架构的核心优势在于动态适配机制,能够根据实时环境参数和通信需求,智能选择最优通信载体。



图 7 多模融合具身体域通信网络场景

具体而言,光波通信在视距 (LOS, line of sight) 链路环境下可提供高速率和抗电磁干扰的传输^[35],但其本质易受不透明物体阻挡,因此在整体遮蔽严重的全空间内独立承担通信存在局限。然而,在结构相对固定和遮挡可控的局部封闭空间内,可通过腔体内光互联替代部分高速数据线,从而在规避电磁干扰的同时实现高效传输^[36-37]。此外,声波通信

的优势在于其对多数非金属介质的穿透能力。在机械结构复杂、遮挡物为固体材质,如金属外壳、复合结构,且在存在空腔或结构振动的场景中,声波可借助机体结构本身进行传播,从而实现结构声通信^[38]。

从架构设计来看,如图 8 所示,机器人领域信息传输与控制各环节通过模块化设计实现高效协同与衔接。在发送端,核心任务是完成对多维感知信息的全面采集与高效编码,这一过程依托多类型传感器模块与分布式数据处理模块的协同工作。其中,多类型传感器模块涵盖了姿态传感器、环境感知传感器和运行状态监测传感器,能够实时捕捉机器人领域态、环境参数、运行状态等多维度、多模态信息,确保感知数据的全面性与时效性。分布式数据处理模块则基于边缘计算技术,对采集到的原始感知数据进行初步预处理与特征提取,在完成基础感知后,进一步对不同模态信息开展跨模态特征处理与深度融合,并利用混合编码对融合后的特征向量进行编码处理。

在本文所提多模融合具身体域通信架构的传输层设计中,创新性地引入多模传输层模块,通过模块化集成与智能化调度,实现多种通信方式的优势互补。该层集成多模通信选择、声通信、光通信和无线电通信模块。其中,多模通信选择模块内置实时信道质量评估模型,通过持续监测各通信模块的信号强度、信噪比、误码率与时延等关键指标,构建多维度信道质量评价矩阵,并基于强化学习或多属性决策理论,结合数据优先级与应用场景,动态筛选最优通信载体并触发相应模块的激活与参数配置。在物理层,为应对频谱拥挤问题,多模融合具身体域通信架构不仅通过引入可见光、毫米波等新

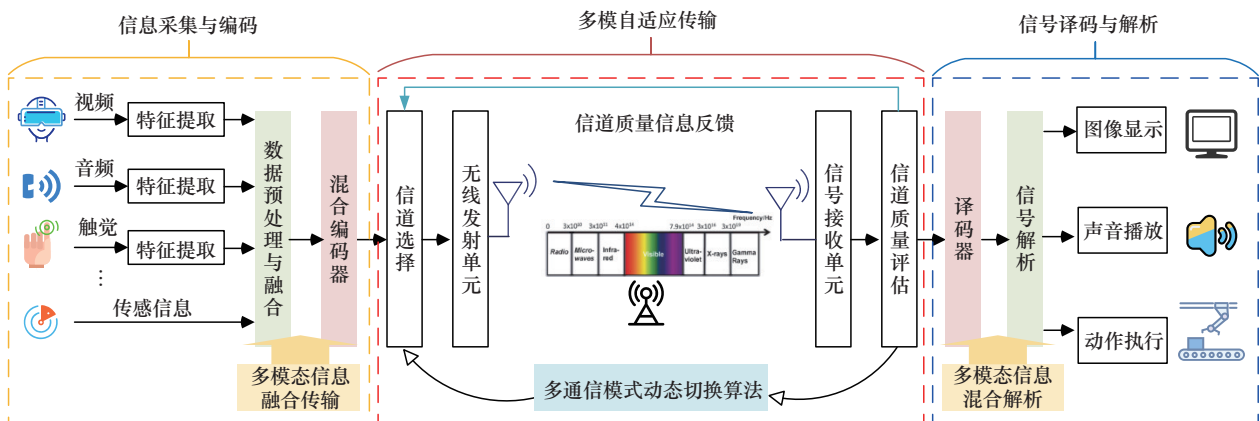


图 8 多模融合具身体域通信网络架构

频谱以拓宽资源池,更利用融合感知与AI预测模型,实现对频谱使用规律的环境认知,从而避免在已拥挤频段内进行低效竞争。其次,针对多径干扰问题,该架构采用基于通信与感知协同的信道质量信息反馈模块,通过融合AI预测模型,高精度环境状态信息将被直接反馈至通信端的波束成形与信道估计算法,使其能够对信道的快速变化进行预测性跟踪与主动补偿,从而将多径效应从传统的干扰源部分转化为潜在的可利用信道资源。此外,对于多节点并发冲突问题,多模融合具身体域通信架构通过节点间的分布式协作与集中式调度相结合的方式实现优化,该架构利用其融合感知能力,不仅能了解自身状态,也能感知相邻节点的通信需求与链路状况。然后,通过智能资源分配算法,实现预测性和协同化的资源调度与接入控制,有效避免传统随机接入的冲突,提升高密度节点场景下的整体网络效率与可靠性。

在接收端,通过中央处理单元与高性能计算模块的协同工作模式,构建高效的数据处理链路。首先,接收端的信号接收模块对多路传输信号进行同步接收,随后将原始接收信号传输至高性能计算模块。高性能计算模块利用其并行计算能力,对多路信号进行同时解析、噪声过滤和特征对齐。处理后的特征向量进一步传输至中央处理单元,中央处理单元结合预设的控制逻辑与决策模型,对特征向量进行综合分析判断,最终形成统一和精准的决策依据,并通过控制接口下发至机器人本体域各执行单元,实现对机器人本体域各执行单元的实时、精准控制,保障机器人整体运行的稳定性与可靠性。

在算法层面,架构核心算法模块包括多模态感知信息融合算法^[39-40]与多通信模式动态切换算法^[41-42]。前者通过整合多源异构感知数据、挖掘模态间互补信息并抑制冗余干扰,为通信决策提供精准环境感知与链路状态评估:先基于证据理论对各模态数据可信度进行加权量化,缓解单模态受噪声干扰问题,再将融合后的高维特征输入轻量级神经网络,完成环境场景与链路状态的联合建模。后者则通过智能分配多种通信模式的带宽资源,结合机器人运动状态与通信需求,将频谱占用率、误码率等作为奖励函数参数,利用强化学习使智能体自主学习最优通信模式切换策略,以应对频谱拥挤瓶颈。

在本文所提多模融合具身体域通信架构中,

声、光、电3种不同模态的通信信道,受传输介质和传播特性不同的影响,其CSI的核心表征参数及表征方法存在本质差异。对声、光、电不同模态的信道进行科学和精准的表征,是保障本文架构高效运行的核心前提,为此,本文将进一步聚焦声、光、电3种典型模态的信道特性,分析各模态信道的传输机理与干扰因素。

3.3 多模无线通信系统

多模无线信道作为EI-WBAC系统中信息传输的核心载体,其特性直接决定了感知数据传输的可靠性、时延与带宽性能,而科学精准的信道表征则是实现多模通信动态调度、编码方案适配及接收端信号优化的前提与核心依据。本节将围绕多模无线信道的差异化表征展开概述。

1) 无线电波信道表示

无线电波作为应用最广泛的传输载体,其信道特性直接影响通信质量。东南大学团队提出的6G普适信道模型,通过分离LOS与非视距(NLOS, non line of sight)分量,精准刻画了不同频段电磁波的传输特性。在该模型中,发射端天线阵元 A_p^T 与接收端天线阵元 A_q^T 之间的信道冲激响应 $h_{qpfc}(t,\tau)$ 可表示为LOS分量 $h_{qpfc}^{LOS}(t,\tau)$ 与NLOS分量 $h_{qpfc}^{NLOS}(t,\tau)$ 之和,具体表示为

$$h_{qpfc}(t,\tau) = \sqrt{\frac{K_R(t)}{K_R(t)+1}} h_{qpfc}^{LOS}(t,\tau) + \sqrt{\frac{1}{K_R(t)+1}} h_{qpfc}^{NLOS}(t,\tau) \quad (2)$$

其中, $K_R(t)$ 为莱斯因子,其量化了视距与非视距分量的功率比,其值越大表明信道中直射路径占比越高,反之则说明多径散射更为显著。该模型为多模系统在无线电波段的频段选择和功率控制提供了理论依据,当莱斯因子较高时,系统可优先启用高频段以提升传输速率;当莱斯因子较低时,则切换至低频段增强抗干扰能力。

2) 光波信道表示

在可见光通信(VLC, visible light communication)等新兴场景中,光波凭借频段资源丰富和抗电磁干扰的优势,成为多模系统的重要补充。典型光波通信系统采用发光二极管(LED, light emitting diode)作为发射器件,光电二极管(PD, photodiode)作为接收器件,其信道特性与LED的辐射模式密切相关。在实际应用中,LED的辐射特性通常

服从朗伯模型, 表达式为

$$R_0(\phi) = \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\phi) \quad (3)$$

其中, $m = \frac{-\text{lb}}{\text{lb}\left(\cos\left(\Phi_{\frac{1}{2}}\right)\right)}$ 表示 LED 的朗伯系数, $\Phi_{\frac{1}{2}}$

表示 LED 的半功率角, ϕ 表示辐射角。在国际单位中, 辐射强度单位为瓦特/球面度 (W/sr)。在室内照明与通信一体化场景中, 通过调整朗伯系数可同时满足照明均匀性与通信覆盖需求。设 LED 至接收机的距离为 d , 则系统的视距链路增益可表示为

$$h_{\text{VLC}}^{\text{LOS}} = \begin{cases} \frac{A_{\text{rx}}}{d^2} R_0(\phi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (4)$$

其中, A_{rx} 表示接收机采集面积, ψ 表示入射角, Ψ_c 表示视场角。其中, 接收机采集面积计算为

$$A_{\text{rx}} = \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_c} A_{\text{PD}} \quad (5)$$

其中, A_{PD} 表示光电探测器的有效接收面积, n 表示聚光器的折射率。其中, 接收机采集面积与聚光器折射率直接相关, 而入射角和视场角的匹配度则影响接收功率, 当入射角超过视场角时, 信号将无法被有效接收。这一特性使光波信道在多模系统中更适用于短距离和无遮挡场景, 与无线电波形成场景互补。

3) 声波信道表示

在水下、地下等电磁波难以穿透的环境中, 声波成为无线通信的核心载体。声波信道的路径损耗主要源于能量在传输过程中的扩散、吸收与散射, 其衰减特性遵从指数变化规律, 振幅随传播距离的变化可表示为

$$h_A^{\text{LOS}} = b(x) \cos(\omega t + \varphi) = b_0 e^{-\alpha x} \cos(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

其中, b_0 为声源处初始振幅, h_A^{LOS} 为距离声源 x 处声压, ω 为角频率, φ 为初始相位角, α 为衰减指数, 可以用 $\alpha = m_s f^2$ 表示。其中 m_s 为介质常数, f 为振动频率。据此可知, 频率越高, 声信号的能量衰减速度越快, 传输距离越短。该模型揭示了声波传输的关键规律: 频率越高, 衰减指数越大, 信号传输距离越短, 这一特性决定了多模系统在声波通信中的频段选择策略。

结合以上表征及分析结果可见, 3 种信道因传

输介质与传播机理的本质不同, 无线电波信道的非视距传输优势与电磁干扰敏感性、光波信道的高带宽特性与视距依赖性、声波信道的电磁兼容优势与长时延短板形成了显著的多模信道的异构性。这将导致多模通信在实际应用中面临以下挑战: 首先, 异构参数体系下缺乏统一的信道质量评估标准, 使多模调度算法难以直接量化对比不同信道的性能优先级, 增加了最优载体选择的决策复杂度; 其次, 各信道对环境干扰的敏感维度存在显著差异, 无线电波信道易受电磁噪声影响、光信道对物理遮挡高度敏感、声信道受温度湿度与机械振动干扰明显, 导致动态场景下信道适配的鲁棒性不足, 易出现切换滞后或误切换问题; 再次, 传输特性的断层式差异, 使多模切换过程中需解决时延差适配、带宽与数据类型匹配及信号同步等协同难题, 否则易引发数据时序错乱或传输中断; 此外, 基于各信道独立的参数-性能映射模型构建的决策体系, 难以适配场景动态变化带来的环境影响权重差异, 导致决策模型的场景泛化性不足, 无法满足机器人跨场景移动的通信需求。

4 结束语

本文提出的多模融合具身体域通信架构, 针对机器人领域内复杂和异构的通信需求, 创新性地整合了声波、光波与无线电波等不同物理载体的互补优势。通过物理层信号融合处理、核心的智能动态适配机制以及清晰的分层协同架构设计, 该架构旨在解决电磁屏蔽区通信盲区、海量数据实时传输瓶颈以及自适应控制信令可靠传输等挑战。基于对多模信道特性的分析, 后续还需深入研究异构信道参数融合、动态环境适配机制、多模切换协同策略及泛化性决策模型等关键方向, 以突破多模通信在实际应用中的瓶颈, 为机器人领域架构中多模传输层的高效运行提供技术支撑。

展望未来, 多模融合具身体域通信架构的研究与应用仍存在广阔的发展空间: 在新型载体融合方面, 需进一步探索将太赫兹通信、量子通信等前沿技术纳入融合体系, 提升通信带宽、安全性与抗干扰能力, 满足未来极端场景下的通信需求; 在智能调度算法优化方面, 需深入研究复杂环境下的信道建模, 开发具备更强环境感知能力、预测能力和自主学习能力的智能调度算法, 实现更精准和更高效

的动态资源分配；在跨层优化与协议设计法方面，需加强感知层、传输层与决策层之间的信息交互与联合优化，设计面向多模融合的高效、低开销通信协议，降低系统整体时延与能耗；在标准化与集成化方面，需推动相关通信模块接口和通信协议的标准化，促进产业链合作，同时探索高集成度和微型化通信模组的设计，降低部署难度与成本，加速在 EI 领域的应用落地。与此同时，具身智能（尤其是 EI-WBAC 系统）是通信、材料、人工智能、控制等多领域前沿交叉融合的产物。其性能跃升并非单一技术进步的结果，而依赖于多学科之间的深度耦合与协同优化。例如，通信频段与模式的选择直接影响天线材料与结构的性能需求；而机器人本体的材料与形态又反过来约束通信模块的布局与能耗。未来的研究需进一步深入剖析这些跨领域要素之间的关联图谱与相互作用机制，如建立材料-通信-结构的协同设计模型，探索在动态应力、温度变化等多物理场耦合下系统性能的演化规律。这将是实现机器人真正自主化、高效能演进的又一关键科学问题之一。

参考文献：

- [1] 国务院. 中国制造 2025[R]. 2015.
General Office of the State Council. Made in China 2025[R]. 2015.
- [2] 工业和信息化部. 人形机器人创新发展指导意见[R]. 2023.
Ministry of Industry and Information Technology. Guiding opinions on innovative development of humanoid robots[R]. 2023.
- [3] KIM M C, KIM E S, PARK J O, et al. Robotic localization based on planar cable robot and hall sensor array applied to magnetic capsule endoscope[J]. *Sensors*, 2020, 20(20): 5728.
- [4] LIU Y W, CHEN J B, LIU J G, et al. Nonlinear mechanics of flexible cables in space robotic arms subject to complex physical environment[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2018, 94(1): 649-667.
- [5] HOSSAIN A, PAN Z N, SAITO M, et al. Multiband massive channel random access in ultra-reliable low-latency communication[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 81492-81505.
- [6] 陈雨, 石亚磊, 胡亚凯, 等. 自行车式缠绕包装机器人运动学建模与仿真[J]. *机械传动*, 2023, 47(7): 149-155.
CHEN Y, SHI Y L, HU Y K, et al. Kinematics modeling and simulation of self-propelled winding and packaging robot[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2023, 47(7): 149-155.
- [7] GOYAL R, MITTAL N, GUPTA L, et al. Routing protocols in wireless body area networks: architecture, challenges, and classification[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2023, 2023(1): 9229297.
- [8] WU Y L, ZHANG B, YI X D, et al. Communication-motion planning for wireless relay-assisted multi-robot system[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(6): 568-571.
- [9] AN X, WU C, LIN Y F, et al. Multi-robot systems and cooperative object transport: communications, platforms, and challenges[J]. *IEEE Open Journal of the Computer Society*, 2023, 4: 23-36.
- [10] CHEN Z Y, CHEN K C, DONG C, et al. 6G mobile communications for multi-robot smart factory[J]. *Journal of ICT Standardization*, 2021, 9(3): 371-404.
- [11] PASCUAL-GARCÍA J, RUBIO L, PEÑARROCHA V M R, et al. Wireless channel analysis between 25 and 40 GHz in an intra-wagon environment for 5G using a ray-tracing tool[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(12): 24621-24635.
- [12] XU Q Y, WANG B B, ZHANG F, et al. Wireless AI in smart car: how smart a car can be?[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 55091-55112.
- [13] MORAITIS N, TSIPI L, VOUYIOUKAS D. Multifrequency channel measurements and characterization for in-cabin environments[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2025, 24(10): 3684-3688.
- [14] YESILKAYA A, HAAS H. Channel modelling and error performance investigation for reading lights based in-flight LiFi[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(5): 4949-4964.
- [15] TAVANA M, OZGER M, BALTACI A, et al. Wireless power transfer for aircraft IoT applications: system design and measurements[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(15): 11834-11846.
- [16] HOLFELD B, WIERUCH D, RASCHKOWSKI L, et al. Radio channel characterization at 5.85 GHz for wireless M2M communication of industrial robots[C]//*Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-7.
- [17] CHEN C, SAITO M, SHIMAMOTO S. Signal propagation through the inside of robot leg for non-wired robot system[C]//*Proceedings of the 2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 517-518.
- [18] KOKURYO M, KONISHI G, SAITO M, et al. Characteristics of wireless signal propagation inside robotic limbs employing rotary waveguide joints[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE 20th Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 664-665.
- [19] DOEBBERT T R, CAMMIN C, SCHOLL G. Safety architecture proposal for low-latency sensor/actuator networks using IO-link wireless[J]. *IEEE Access*, 2021, 10: 3030-3044.
- [20] 意法半导体. 60 GHz 非接触式产品-意法半导体 STMicroelectronics [R]. 2021.
STMicroelectronics. 60 GHz contactless products-STMicroelectronics [R]. 2021.
- [21] 范祥辉, 陈长胜, 史岩, 等. 民用飞机无线航空电子内部通信网络技术综述[J]. *航空工程进展*, 2021, 12(1): 129-135.
FAN X H, CHEN C S, SHI Y, et al. Overview of wireless avionics intra-communication network technology[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2021, 12(1): 129-135.
- [22] 中国航天报. 航天科技一院万源科技公司成功研制新一代近场无线通信技术产品侧记[R]. 2025.
China Space News. Side notes on the successful development of a new generation near-field wireless communication technology product by WanYuan technology company of the first academy of China aerospace science and technology corporation[R]. 2025.
- [23] GAN Y H, ZHANG B, SHAO J W, et al. Embodied intelligence: bionic robot controller integrating environment perception, autonomous planning, and motion control[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(5): 4559-4566.
- [24] AHMED B, MOEYAERT V, MÉGRET P. Latency characterization and performance evaluation of synchronized daisy-chain EtherCAT net-

- works using standard cable pairs and open-source master solutions[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2025, 22(6): 5915-5926.
- [25] NORGDARD J, BEST G L. The electromagnetic spectrum[M]. National Association of Broadcasters Engineering Handbook. Routledge, 2017: 3-10.
- [26] WANG C C, YANG Y, YANG Z H, et al. Joint SIC-based precoding and sub-connected architecture design for MIMO VLC systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(2): 1044-1058.
- [27] BURKE M, YOUNIS M. Humidity estimation using WiFi channel state information[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 48th Conference on Local Computer Networks (LCN). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-4.
- [28] KUMAR K B, SHANMUGANANTHAM T. Blue-tooth shaped SIW antenna for RADAR applications[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Circuits and Systems (ICCS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 93-96.
- [29] GAO M J, WAN L, SHEN R J, et al. SparkLink: a short-range wireless communication protocol with ultra-low latency and ultra-high reliability[J]. *The Innovation*, 2023, 4(2): 100386.
- [30] KAEWKIRIYA T. Performance comparison of Wi-Fi IEEE 802.11ac and Wi-Fi IEEE 802.11n[C]//Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Communication Systems, Computing and IT Applications (CSCITA). Piscataway: IEEE Press, 2017: 235-240.
- [31] ROCHIM A F, HARIJADI B, PURBANUGRAHA Y P, et al. Performance comparison of wireless protocol IEEE 802.11ax vs 802.11ac[C]//Proceedings of the 2020 International Conference on Smart Technology and Applications (ICoSTA). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [32] DENG C L, FANG X M, HAN X, et al. IEEE 802.11be Wi-Fi 7: new challenges and opportunities[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(4): 2136-2166.
- [33] ENSWORTH J F, REYNOLDS M S. BLE-backscatter: ultralow-power IoT nodes compatible with bluetooth 4.0 low energy (BLE) smartphones and tablets[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(9): 3360-3368.
- [34] ANTONIOLI D, TIPPENHAUER N O, RASMUSSEN K, et al. BLURtooth: exploiting cross-transport key derivation in bluetooth classic and bluetooth low energy[C]//Proceedings of the 2022 ACM on Asia Conference on Computer and Communications Security. New York: ACM Press, 2022: 196-207.
- [35] ABDALLAH R, ATEF M, SAEED N. Hybrid POF-VLC systems: recent advances, challenges, opportunities, and future directions[J]. *IEEE Open Journal of the Computer Society*, 2025, 6: 317-335.
- [36] TSONEV D, CHUN H, RAJBHANDARI S, et al. A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(7): 637-640.
- [37] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(1): 100-107.
- [38] 王健, 冯萌馨. 一种结构声场通信方法和系统: CN113098628A[P]. 2021.
WANG J, FENG M X. A structural acoustic field communication method and system: CN113098628A[P]. 2021.
- [39] 刘振东, 宋春林. 一种基于摄像头和毫米波雷达的多模态信息融合算法[J]. *计算机科学与应用*, 2022, 4(12): 2544.
LIU Z D, SONG C L. A multimodal information fusion algorithm based on camera and millimeter-wave radar[J]. *Computer Science and Application*, 2022, 4(12): 2544.
- [40] 秦志金, 赵炎炎, 李凡, 等. 多模态语义通信研究综述[J]. *通信学报*, 2023, 44(5): 28-41.
QIN Z J, ZHAO T T, LI F, et al. A survey on multimodal semantic communication[J]. *Journal on Communications*, 2023, 44(5): 28-41.
- [41] ABOAGYE S, SAEIDI M A, TABASSUM H, et al. Multi-band wireless communication networks: fundamentals, challenges, and resource allocation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2024, 72(7): 4333-4383.
- [42] HASHIMA S, FOUUDA M M, SAKIB S, et al. Energy-aware hybrid RF-VLC multiband selection in D2D communication: a stochastic multi-armed bandit approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(18): 18002-18014.

[作者简介]



王聪聪 (1996-), 女, 山东威海人, 博士, 中国科学院计算技术研究所特别研究助理, 主要研究方向为新一代短距无线通信关键技术、智能无线通信关键技术等。



周一青 (1975-), 女, 浙江杭州人, 博士, 中国科学院计算技术研究所研究员、中国科学院大学教授, 主要研究方向为通信与计算融合、智能资源管理、新型空口等。



石晶林 (1972-), 男, 云南怒江人, 博士, 中国科学院计算技术研究所研究员、中国科学院大学教授, 主要研究方向为无线移动通信和网络技术、基带芯片处理器关键技术等。



朱慧玲 (1975-), 女, 肯特大学教授, 主要研究方向为移动通信。



王江舟 (1961-), 男, 东南大学教授, 英国皇家工程院院士, 中国工程院外籍院士, 主要研究方向为移动通信等。