

面向机器人集群控制的轻量级 Mesh 广播算法研究

邓志吉^{1,2}, 王明慧³, 杜龙¹, 孟金¹, 杨照辉⁴, 刘圣波¹, 吕杨棋¹

(1. 浙江大华技术股份有限公司, 浙江 杭州 310051; 2. 浙江大学工程师学院, 浙江 杭州 310022;
3. 全省视觉物联融合技术重点实验室, 浙江 杭州 310051; 4. 浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310013)

摘要: 随着物联网与机器人技术的深度融合, 构建高效可靠的通信网络成为支持机器人协同作业的关键基础。针对机器人系统在动态复杂环境中对通信网络提出的低时延、高可靠性与轻量化需求, 提出一种基于邻居信息推测的广播优化 (SRB, speculative reception-based broadcasting) 算法。该算法通过引入邻居管理与推测接收机制, 有效解决了传统泛洪算法中“广播风暴”、冗余转发和能耗过高等问题。SRB 利用节点间周期交换的邻居信息, 推测其邻居是否已接收到当前数据包, 从而决策是否转发, 避免不必要的重复传输。通过仿真和机器人原型系统对所提算法进行了性能评估, 实验结果表明, SRB 在数据包可达率、端到端时延、转发率等关键指标上均优于传统泛洪算法。

关键词: 物联网; 机器人; Mesh 网络; 泛洪算法

中图分类号: TN915.08

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.WLW25111

Research on a lightweight Mesh broadcasting algorithm for robot cluster control

Deng Zhiji^{1,2}, Wang Minghui³, Du Long¹, Meng Jin¹, Yang Zhaohui⁴, Liu Shengbo¹, Lyu Yangqi¹

1. Zhejiang Dahua Technology Co., Ltd., Hangzhou 310051, China

2. Polytechnic Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310022, China

3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Harmonized Technology of Vision & Transmission, Hangzhou 310051, China

4. College of Information Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310013, China

Abstract: With the deep integration of the Internet of things (IoT) and robotics, constructing an efficient and reliable communication network has become a critical foundation for supporting collaborative operations of robots. Addressing the demands of low latency, high reliability, and lightweight design for communication networks in the dynamic and complex environments of robot systems, a broadcast optimization algorithm based on neighbor information speculation was proposed, named speculative reception-based broadcasting (SRB). By introducing neighbor management and a speculative reception mechanism, issues inherent in traditional Flooding algorithms, such as “broadcast storms”, redundant forwarding, and excessive energy consumption, were effectively mitigated by the SRB algorithm. Periodically exchanged neighbor information among nodes was leveraged to infer whether their neighbors had already received the current data packet, thereby making intelligent forwarding decisions to avoid unnecessary retransmissions. The performance of the proposed algorithm was evaluated through simulations and a prototype system of robots. Experimental results demonstrate that SRB outperforms traditional Flooding algorithms in key metrics, including packet delivery ratio, end-to-end latency, and forwarding rate.

Key words: IoT, robot, Mesh network, Flooding algorithm

收稿日期: 2025-07-13; 修回日期: 2026-06-01

通信作者: 王明慧, wang_minghui@dahuatech.com

基金项目: 中央引导地方科技发展资金资助项目 (No. 2024Y02002); 浙江省重点研发计划项目 (No. 2025C01065)

Foundation Items: The Central Guidance Fund for Local Science and Technology Development Projects (No. 2024Y02002), The Key Research and Development Program of Zhejiang Province (No. 2025C01065)

0 引言

随着人工智能、边缘计算、5G 通信等技术的不断进步,物联网 (IoT, Internet of things) 正逐步渗透到智能制造、智慧城市、智能交通、医疗健康等多个领域,并推动着社会生产方式和生活方式的深刻变革^[1-2]。在这一过程中,机器人作为智能化终端设备的重要代表,正在成为连接物理世界与信息系统的桥梁,广泛应用于工业巡检、应急救援、环境监测、物流运输等复杂任务场景中^[3-5]。特别是在多机器人协同应用中,如利用毫米波雷达进行协同定位与建图,或通过多机器人协同完成巡检路径规划,高效可靠的通信是实现精确协作与任务成功的根本保障^[6-7]。通过集成感知、通信、决策与执行能力,机器人不仅能够实现自主运行与远程控制,还可通过协同作业提升系统整体效率与任务完成质量^[8]。

然而,在实际应用中,机器人往往部署于动态性强、环境复杂甚至存在通信盲区的区域,传统的中心化或基础设施依赖型通信架构难以满足其对实时性、可靠性与扩展性的综合要求^[9]。因此,构建一种具有自组织、多跳传输、拓扑灵活等特性的通信网络架构,成为保障机器人系统稳定运行的关键。在此背景下,基于 Mesh 网络结构的通信机制因其去中心化、强鲁棒性和良好的可扩展性,被认为是支持机器人系统通信的理想选择^[10-11]。

Mesh 网络允许节点之间建立多路径通信,从而提升系统的覆盖范围与容错能力,尤其适合大规模机器人集群之间的协作通信^[12-13]。然而,针对物联网场景下机器人系统资源受限、任务驱动性强以及拓扑频繁变化等特点,传统 Mesh 组网协议在实际应用中仍面临诸多挑战。特别是在需要快速广播控制指令、状态信息或紧急警报的场景中,如何设计一种高效、轻量、低时延且高可靠性的 Mesh 广播算法,成为当前亟须解决的技术难题。

机器人系统通常由多个具备通信与计算能力的移动节点组成,它们在执行任务过程中需要频繁交换数据,如位置信息、传感器数据、任务分配结果等。在某些关键应用场景中,如灾难现场搜救、军事侦察、工业自动化等,信息传播的时效性直接关系到任务成败^[14]。此时,采用广播机制是一种常见策略,因为其无须预先建立路由表,即可迅速将信

息扩散至整个网络^[15]。然而,传统泛洪 (Flooding) 算法在带来高效广播的同时,也存在如“广播风暴”的问题^[16-17],即无控制的转发导致大量冗余数据包充斥网络,引发严重的信道拥塞、传输冲突和能量浪费,严重影响系统性能与稳定性。

尤其是在机器人系统中,由于节点数量众多、移动性强、能量受限,这些问题尤为突出。例如,冗余转发不仅加剧了信道拥塞和数据包碰撞,导致丢包率上升和时延增加,还显著增加节点的能量消耗,缩短了整个机器人集群的有效工作时间。因此,如何在保证广播效率的前提下,有效控制冗余传输、降低能耗并提升可靠性,是当前 Mesh 广播算法研究的核心难点。

针对上述问题,近年来已有不少研究者尝试对传统泛洪算法进行改进,提出多种优化方案,这些方案大致可分为以下几类。

(1) 基于计数器或定时器的方案^[18-20]: 通过设置随机延迟转发定时器或计数器来抑制广播风暴。节点在收到一个新数据包后,并不立即转发,而是启动一个随机等待计时器。在等待期间如果监听到邻居已经转发了该数据包,则取消自身的转发。计数器方案规定节点只有在收到同一数据包达到一定次数后才停止转发。这类方法能有效减少冲突,但可能导致网络可达率下降,部分节点无法接收到数据包。

(2) 基于概率和邻居信息的方案^[21-23]: 概率泛洪节点以预设的概率 p 决定是否转发,从而减少冗余。更进一步的方案则利用邻居信息动态调整转发概率,例如,当节点的邻居大多已被其他节点覆盖时,降低其转发概率。这类方法简单轻量,但固定概率难以适应动态网络,而且概率转发也会导致网络可达率下降,部分节点可能无法接收到数据包。

(3) 基于拓扑或地理位置的方案^[24-27]: 利用局部或全局的网络拓扑信息来选择性地指定转发节点,构建一个高效的广播树,如多点中继机制。地理位置辅助的广播算法则根据节点的物理位置来限制广播范围,避免向已经完成广播的区域重复发送。这类方法效率高,但通常需要额外的开销来获取和维护拓扑或位置信息,在高速移动的机器人网络中可能不适用。

(4) 基于 AI/ML 的智能广播算法^[28-30]: 近年来,

研究者开始探索利用机器学习或强化学习来优化广播决策。例如,文献[29]提出一种基于强化学习的自适应广播策略,节点可以根据网络状态(如拥塞程度、邻居密度)动态学习最优的转发决策。文献[30]则采用图神经网络来感知局部拓扑特征,从而更智能地选择转发节点。这类方法具有较强的自适应性与泛化能力,但也存在训练成本高、模型部署复杂等问题,尤其在资源受限的机器人平台上难以广泛应用。

综上所述,尽管已有诸多研究试图解决无线自组织网络中的广播问题,但在低时延、高可靠性、轻量化三者之间的平衡仍未得到有效解决。特别是在动态性强、资源有限的大规模机器人集群系统中,如何设计一种既能保证广播效率又能兼顾系统稳定性的Mesh广播算法,仍是当前亟待攻克的技术难题。

针对上述问题,本文围绕机器人集群控制的通信需求,提出一种基于邻居信息推测的广播优化(SRB, speculative reception-based broadcasting)算法。该算法通过动态分析节点邻域拓扑关系,解决传统泛洪算法中盲目转发导致的广播风暴与冗余传输问题。与基于计数器或定时器的方案相比,SRB通过周期性交换邻居信息实现对局部拓扑的动态感知,而非依赖静态的节点度或固定计数;与基于邻居信息的方案相比,SRB利用精确的两跳邻居信息进行推测,实现“按需转发”机制,即只在确认有邻居尚未被覆盖时才转发,从而在机制上确保更高的可靠性和效率。其具体创新包括:设计推测接收计数器,通过分析发送者的邻居列表推测数据包传播覆盖度;结合随机转发时隙与动态阈值决策机制,实现转发行为的精准控制。仿真和实验结果表明,SRB算法在保证高可达率和低时延的同时,能够将网络冗余降低一个数量级。

1 相关基础理论

本文研究基于物联网场景下机器人集群控制系统、Mesh网络及广播通信机制展开。

1.1 机器人集群控制系统

物联网机器人是将传统机器人技术与物联网深度融合的新型智能终端设备,具备感知、通信、决策与执行能力,能够通过无线网络与其他节点进行信息交互,并协同完成复杂任务。其典型应用场景

包括工业巡检、灾害救援、环境监测、物流运输等^[31]。

在机器人集群控制系统中,多个机器人节点通常分布式部署于动态环境中^[32-33],具有以下5个特点。

(1) 资源受限性:多数物联网机器人采用嵌入式处理器和有限电池供电,计算能力、存储空间和能耗受到严格限制。

(2) 移动性强:机器人节点可能根据任务需求自主移动,导致网络拓扑频繁变化。

(3) 任务驱动性:通信行为高度依赖任务类型,如控制指令、状态报告、协作协商等,对实时性和可靠性要求较高。

(4) 异构性:不同类型的机器人节点可能具有不同的通信模块、处理能力和功能角色。

(5) 自组织性:在缺乏基础设施的情况下,机器人需依靠自身能力构建并维护通信网络。

上述特性决定了机器人集群系统对通信协议提出更高的要求:必须具备低时延、高可靠性、轻量化、强适应性的特点,才能满足实际应用中的性能需求。

1.2 Mesh网络

Mesh网络是一种多跳、自组织的分布式无线网络架构,其核心思想是每个节点既可以作为终端使用网络,也可以作为中继节点转发数据,从而形成一个灵活、鲁棒性强的通信拓扑^[13]。该架构特别适用于节点数量较多、部署区域广、环境复杂且难以依赖固定基础设施的机器人集群控制管理系统。

Mesh网络的主要优势包括以下4点。

(1) 去中心化:无须依赖中心节点或基站,节点之间可直接通信。

(2) 多路径传输:支持多条路由选择,提高网络容错能力。

(3) 自组织与自愈能力:节点加入或退出网络时,系统可自动调整拓扑结构。

(4) 良好的扩展性:易于支持大规模节点接入。

在机器人系统中,Mesh网络广泛用于实现节点间的协同通信与数据交换。然而,由于机器人节点资源受限、拓扑动态性强等特点,传统Mesh组网协议(如AODV、OLSR、BATMAN等^[34-36])在实际应用中往往面临效率低、开销大、时延高等问题,需要设计专门针对机器人场景的轻量化通信机制。

1.3 广播通信机制

1.3.1 传统泛洪算法

传统泛洪是一种基础的广播机制，其核心思想是每个接收到新广播消息的节点都立即将其转发给所有邻居节点。这种机制实现简单、传播速度快，理论上能保证消息覆盖整个连通网络。然而，泛洪也存在以下 5 个显著缺陷。

(1) 广播风暴：大量节点同时转发相同消息，造成信道拥塞。

(2) 冗余转发：多个节点重复转发同一消息，浪费带宽资源。

(3) 能耗过高：频繁转发行为加速节点能量消耗。

(4) 冲突加剧：在同一时间内多个节点发送数据，增加碰撞概率。

(5) 丢包率上升：冲突或拥塞导致部分消息无法成功传输。

这些问题在资源受限、动态性强的物联网机器人系统中尤为突出，严重影响系统的通信效率与稳定性。

1.3.2 广播优化策略概述

为了克服传统泛洪算法的不足，研究者提出多种改进方案，这些策略已在引言中详细讨论，其核心思想可归纳为以下 3 点。

(1) 引入延迟：通过设置随机等待时间来错开转发时刻，减少碰撞。

(2) 减少转发节点：通过概率、邻居信息或拓扑结构来选择性地让一部分节点转发。

(3) 利用已有信息：根据数据包的来源路径或节点的地理位置来避免向已覆盖区域转发。

尽管上述方法在一定程度上缓解了泛洪带来的问题，但在物联网机器人系统中仍需进一步优化，特别是在低时延、高可靠性、轻量化等方面，仍存在较大挑战。

2 基于邻居信息推测的广播优化算法

2.1 设计目标与思路

针对物联网机器人系统在动态环境中对通信网络提出的低时延、高可靠性与轻量化需求，本文提出一种高效轻量级 Mesh 泛洪算法。该算法旨在解决传统泛洪算法中广播风暴、冗余转发、可靠性不足等问题，在保证信息快速传播的同时，提升系统

的整体稳定性与能效表现。

传统广播算法的转发决策是盲目的。一个节点转发数据包的根本目的是让尚未收到该包的邻居能够收到。因此，转发决策的核心问题可以转化为：判断自己的邻居是否大概率已经从其他节点处收到该数据包。基于此思路，本文算法利用节点间交换的邻居列表信息进行推测。在理想的无干扰、双向对称、不考虑隐藏节点的通信模型中，当节点 v 收到来自节点 w 的数据包时， v 可以确定知晓 w 的所有邻居（即 v 与 w 的共同邻居）也同时收到了该数据包。然而，在真实的无线环境中，由于信号冲突、隐藏终端、信道衰落等因素，数据包的接收存在不确定性。因此，本文将这一确定性判断放宽为“高概率推测”。通过这种推测， v 可以评估自己转发的必要性，从而避免大量冗余转发。为了应对这种不确定性并提高可靠性，本文算法引入了推测接收计数器和目标阈值机制。

2.2 算法设计

2.2.1 功能模块

SRB 基于分布式 Mesh 网络架构构建，适用于资源受限的机器人节点。系统架构如图 1 所示，主要包括以下 5 个功能模块。

(1) 邻居管理模块：周期性发送自己的邻居状态，实时获取和统计其他节点的邻居信息。

(2) 推测接收模块：根据数据包信息和邻居信息，实时维护每个邻居对于每个包的接收情况。

(3) 决策转发模块：在决策时刻到来时，判断节点是否需要转发该数据包。

(4) 协议处理模块：实现协议栈介质访问控制 (MAC) 层，包括消息格式定义与控制字段解析。

(5) 安全管理模块：实现数据包的鉴权、完整性校验、加密与解密。

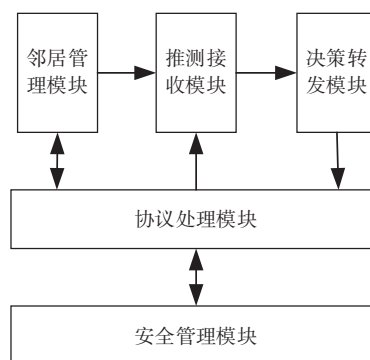


图1 系统架构

2.2.2 算法流程

SRB算法主要包括邻居信息管理流程和推测接收算法流程,具体如下。

(1) 邻居信息管理流程

主要用于管理和更新自己的邻居信息。

①实时接收其他节点发送的邻居通知报文(内容包括该节点的地址以及它的所有邻居)。

②节点将接收到的邻居信息过滤后合并更新自己的邻居列表和邻居的邻居信息。

③开启一个定时器,定时发送自己的邻居通知报文,该报文的生存周期TTL=1。

(2) 推测接收算法流程

节点为每个数据包维护所有邻居的推测接收计数器(SRC, speculative reception counter),用于推测所有邻居已接收到该数据包的次数。例如,节点 v 针对数据包 P 和其邻居 u 的推测接收计数器建立如下数学模型

$$\text{SRC}_v(P, u) \in N^0 \quad (1)$$

其中, N^0 表示正整数。当节点 v 从邻居 w 接收到数据包 P 时,它按式(2)更新所有邻居 $u \in N(v)$ 对应的SRC值。

$$\text{SRC}_v(P, u) = \begin{cases} \text{SRC}_v(P, u) + 1, & u \in N(v) \cap N(w) \\ \text{SRC}_{\text{target}}, & u = w \\ \text{SRC}_v(P, u), & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $N(\cdot)$ 表示节点的邻居集合。此模型形式化地描述了“推测”行为:若 u 是 v 和发送者 w 的共同邻居,则 v 推测 u 也收到来自 w 的广播,故将计数器增1;若 u 就是发送者 w (因为 w 也在 v 的邻居列表中),则将计数器增加 $\text{SRC}_{\text{target}}$,意味着该邻居一定接收到了 P 。

节点 v 在定时器到期时,对数据包 P 的转发决策 $D_v(P)$ 是一个布尔函数。

$$D_v(P) = \begin{cases} 1, & \exists u \in N(v) \text{ s.t. } \text{SRC}_v(P, u) < \text{SRC}_{\text{target}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\text{SRC}_{\text{target}}$ 表示目标接收阈值,是一个关键的可配置参数,用于权衡网络的可靠性与效率。 $\text{SRC}_{\text{target}}$ 的取值策略依据用户需求而定。

①若追求更高的可靠性,可将 $\text{SRC}_{\text{target}}$ 设为较高值(如2或3)。这意味着一个节点必须推测其邻

居从多个不同的源接收了同一个数据包后,才认为该邻居已“可靠接收”,这能有效对抗无线信道的随机丢包。

②若追求更低的时延和更少的冗余转发,可将 $\text{SRC}_{\text{target}}$ 设为较低值(最低为1)。这会使节点更快地停止转发,从而降低网络负载。

推测接收参数说明见表1,推测接收算法步骤见表2。下面通过流程图(表2)和伪代码详细描述当节点 v 收到来自节点 w 的数据包 P 时的处理流程。其中SRB数据包处理算法如算法1所示,算法1流程如图2所示。SRB转发时隙处理算法如算法2所示,算法2流程如图3所示。

表1 推测接收参数说明

变量	定义	说明
cache	数据包缓存	存储已接收但未处理的数据包序列号
cache_timer	数据包缓存超时定时器	用于在缓存数据包超时后删除数据包
need_forward	转发标志	其值为1,则转发收到的数据包
$N(\text{self})$	自身邻居集合	节点自身的1跳邻居列表
$N(w)$	发送者邻居集合	数据包发送节点 w 的1跳邻居列表
P_{seq}	数据包序号	用于标识每一个唯一的数据包
$\text{SRC}_{\text{target}}$	目标接收阈值	判定邻居是否已接收数据包的阈值,通常取1~3。低于该值,推测该邻居未接收到数据包
t_{forward}	转发时隙	节点决定转发数据包的时刻值。该值是在该数据包的首次接收时间戳加上一个随机时延得到
TTL	生存周期	用于描述一个数据包的生存周期, TTL=0时不会再转发该数据包

表2 推测接收算法步骤

步骤	操作
1	节点 v 从邻居 w 处接收到数据包 P
2	检查 P 是否为“已发送”数据包,若是,则进入步骤9。若否,则检查数据包是否是第一次接收。若是,则缓存 P 并生成一个随机转发时隙 t_{forward} ;若不是,则直接进入步骤4
3	获取发送节点 w 的邻居列表 $N(w)$
4	对于 v/w 的共同邻居 $u \in N(v) \cap N(w)$,更新 $\text{SRC}_v(P, u)$
5	等待随机时隙 t_{forward} 到达
6	在 t_{forward} 时刻,检查 v 的所有邻居。如果存在至少一个邻居 u ,其 $\text{SRC}_v(P, u) < \text{SRC}_{\text{target}}$,进入步骤7,否则进入步骤8
7	立即转发数据包 P ,并将 P 标记为“已发送”
8	取消转发,销毁数据包 P ,并记录该包“已发送”
9	数据包处理结束

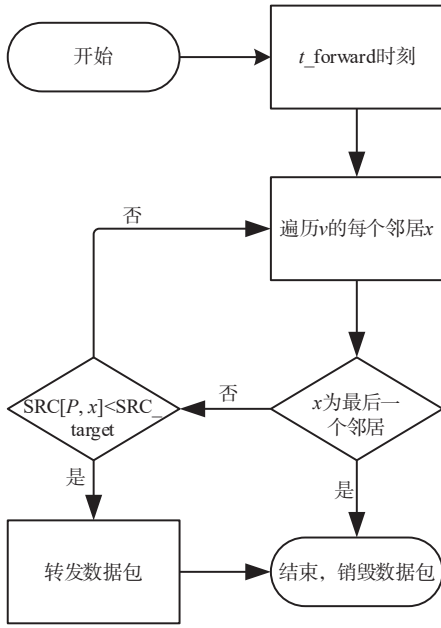


图3 算法2流程

2.3.2 定理证明

采用归纳法。

(1) 归纳假设: Mesh网络中的所有节点, 已收到数据包 P 。

①归纳目标: 证明该网络中新增加一个节点 v 可以收到 P 。

②基础场景: 只有一个节点的Mesh网络, 源节点 s 发送一个包, 整个网络都收到了。满足可达性证明。

③归纳步骤: 对于包含 n 个节点的网络, 针对某个数据包 P , 新增加一个节点 v , 因为新节点 v 满足连通性, 所以 v 至少有一个邻居 u 。此时 v 有2种情形。1) v 只有一个邻居 u , 其 $\text{SRC}_v(P, u) = 0$ 。该值小于 $\text{SRC}_{\text{target}}$, u 会转发 P , 导致 v 接收到 P 。2) v 有多个邻居分别为 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 此时有2种情况: (a) 没有邻居转发 P , 那么这些邻居的 $\text{SRC}(P, v)$ 都为0, 此时转发时隙最小的邻居 u_i 会转发 P , 导致 v 接收到 P ; (b) 至少有一个邻居 u_i 已转发 P , 因为 u_i 是 v 的邻居, 所以 v 可以接收到 P 。

④归纳终止: 最终, 对于任意规模的Mesh网络, 可以得出该网络的所有节点都可以收到 P , 证明完毕。

(2) 时延分析: 网关中的单跳时延取决于网络中的邻居密度, 以及转发时隙的选择。对于一个 $\text{SRC}_{\text{target}} = 1$ 的网络, 假设平均每个节点拥有的邻居数为 n , 转发时隙的窗口为 T , 即在 $[0, T]$ 的窗口内

独立随机选择一个值, 选择到最小值的邻居拥有优先转发权, 其他邻居收到该数据包后不再转发。因此, 节点单跳时延可以等价为该集合内最小值分布问题。

问题定义: 设第 i 个节点选择的时间为 X_i , X_i 是在 $[0, T]$ 上均匀分布的随机变量, 所有 X_i 是独立分布的, 需要求解 $Y = \min(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的期望 $E[Y]$ 。

最小值分布: 对于独立同分布的随机变量 X_i , $Y = \min(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的期望可以通过顺序统计量的性质直接得到。由于 X_i 是在 $[0, T]$ 上均匀分布, 第 k 个顺序统计变量的期望为 $E[X_{(k)}] = kT/(n+1)$ 。特别地, 最小值 $Y = X_{(1)}$, 所以 $E[Y] = T/(n+1)$ 。证明如下。

设随机变量 X_i 表示第 i 个节点选择的转发时隙, 且 $X_i \sim U(0, T)$, 其中 U 为均匀分布。所有 X_i 独立同分布, 则第一个转发节点出现的时隙为

$$Y = \min(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4)$$

Y 的累积分布函数为

$$F_Y(y) = P(Y \leq y) = 1 - P(Y > y) = 1 - \prod_{i=1}^n P(X_i > y) = 1 - \left(1 - \frac{y}{T}\right)^n, \quad 0 \leq y \leq T \quad (5)$$

对其求导得到概率密度函数

$$f_Y(y) = \frac{d}{dy} F_Y(y) = \frac{n}{T} \left(1 - \frac{y}{T}\right)^{n-1}, \quad 0 \leq y \leq T \quad (6)$$

则 Y 的期望为

$$E[Y] = \int_0^T y \cdot f_Y(y) dy = \int_0^T y \cdot \frac{n}{T} \left(1 - \frac{y}{T}\right)^{n-1} dy \quad (7)$$

令 $t = 1 - \frac{y}{T}$, 则 $y = T(1 - t)$, $dy = -Tdt$, 积分限变为 $t = 1$ 到 $t = 0$, 可得

$$\begin{aligned} E[Y] &= \int_1^0 T(1 - t) \cdot \frac{n}{T} t^{n-1} \cdot (-T) dt = nT \int_0^1 (1 - t) t^{n-1} dt \\ &= nT \left(\int_0^1 t^{n-1} dt - \int_0^1 t^n dt \right) = nT \left(\left[\frac{t^n}{n} \right]_0^1 - \left[\frac{t^{n+1}}{n+1} \right]_0^1 \right) \\ &= nT \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) = \frac{T}{n+1} \end{aligned} \quad (8)$$

该结果表明, 网络密度 n 越大, 平均等待时延 $E[Y]$ 越低。

2.4 复杂度与开销分析

为了全面评估SRB算法的“轻量级”特性,

从计算复杂度、存储开销和部署与额外开销3个维度进行定量分析。

(1) 计算复杂度: 算法的核心操作在于推测接收时的邻居交集计算和SRC更新。在推测接收模块, 其计算复杂度为 $O(n)$, 其中 n 为节点的邻居数量。邻居管理模块在合并邻居信息时, 复杂度也主要与邻居数相关。重要的是, 算法复杂度与整个网络的总节点数 N 无关, 这使得SRB具备良好的可扩展性。在实践中, 邻居个数 n 可以通过调整节点的发射功率来控制在一个合理范围内(如10~30)。算法的其他功能, 如定时器管理, 计算复杂度为 $O(1)$ 。

(2) 存储开销: 算法的存储开销主要来自两个模块。

①邻居管理模块: 需要存储自身每个邻居的邻居列表(即两跳邻居信息)。其存储开销为 $O(n^2)$ 。以一个平均拥有20个邻居($n=20$)的网络为例, 若节点地址长度为2 B, 则每个节点需要 $20 \times 20 \times 2 = 800$ B的存储空间。

②推测接收模块: 需要为正在网络中传播的数据包缓存其SRC计数器。其存储开销为 $O(m \times n)$, 其中 m 为网络中并发数据包的数量。假设节点平均缓存50个包, 平均拥有20个邻居, 每个计数器使用1 B, 则需要 $50 \times 20 = 1\,000$ B。

这些开销对于现代嵌入式系统(通常拥有数十至数百KB的RAM)是完全可控的。

(3) 部署与额外开销

①部署成本: 在资源受限的ESP32平台上对包含SRB算法的完整协议栈进行了实测。结果表明, 运行该协议栈所需的RAM小于20 KB, Flash小于30 KB, 证明其在低成本、资源受限的机器人节点上部署的可行性。

②时延开销: 邻居管理模块和推测接收模块的计算在后台进行, 不直接增加数据包的单跳传输时延。决策转发模块引入的随机时延是抑制广播风暴的核心机制, 是算法设计的必要组成部分, 其大小由网络密度动态决定。

③通信开销: 周期性发送邻居状态报文会带来额外的通信开销。但此开销是可控的。首先, 该报文TTL=1, 仅在一跳范围内传播, 不会造成网络风暴; 其次, 可以通过智能策略(如检测到邻居稳定时降低更新频率, 或在拓扑变化时触发式更新)来

进一步减少。

④功耗开销: 本文算法面向机器人等需要长期持续通信的系统, 其射频模块通常处于常开状态。因此, 算法本身引入的微小计算功耗远小于射频通信的功耗, 不适用于超低功耗、长期待机的应用场景。

3 仿真测试

3.1 仿真环境与评估指标

为了验证所提算法的有效性与可行性, 本文采用Python搭建Mesh通信网络环境, Mesh网络拓扑结构如图4所示。为了全面评估SRB的性能优势, 将其实现结果与传统泛洪(Flooding)算法、概率泛洪(PFlooding)算法进行了对比。仿真详细参数设置见表3。

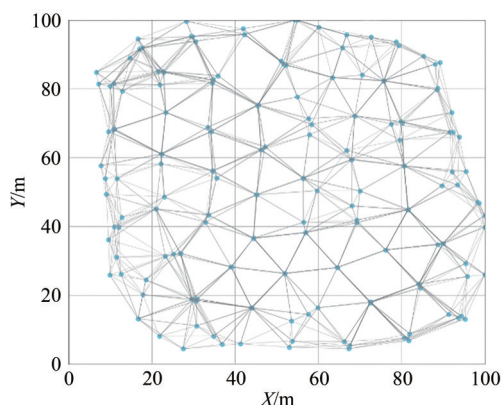


图4 Mesh网络拓扑结构

表3 仿真详细参数设置

参数	参数设置
终端个数/平均邻居数量	100/10
	200/15
	500/20
地图大小/m	100×100
节点位置	随机位置
数据包冲突率	0
算法类型	SRB
	Flooding
	PFlooding(概率为0.8)

性能评估参数为转发率、可达率和传输时延。转发率用于评价不同算法对于洪泛的抑制能力, 定义为参与转发某个数据包节点数量占总节点数量的比值。可达率用于评价不同算法对于数据包传输的

可靠性, 定义为Mesh网络中接收到该数据包的节点数量与总节点数量的比值。传输时延用于评价不同算法下路由建立到完成传输的总时长。

3.2 网络规模适应性测试

为了评价SRB算法在不同网络规模下的性能, 本文进行了仿真, 不同节点数量时对应的转发率和可达率如图5和图6所示。

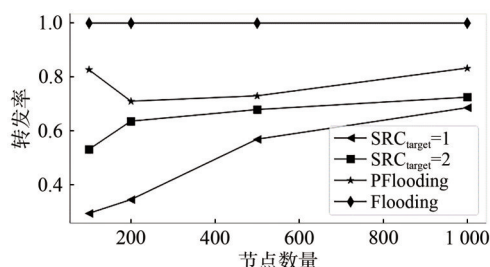


图5 不同节点数量时对应的转发率

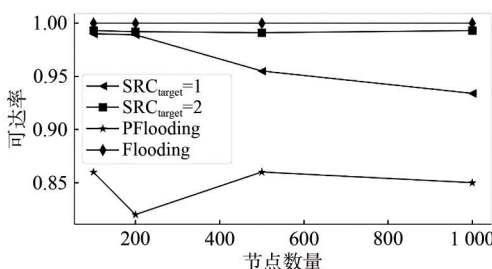


图6 不同节点数量时对应的可达率

从图5可以看出, Flooding算法在不同网络规模下, 转发率都为100%, SRB算法的转发率比Flooding和PFlooding都要低, 这表明SRB算法可以有效地抑制冗余数据包的传输, 从而避免广播风暴问题。

从图6可以看出, 在不同网络规模下, Flooding和SRB (SRC_{target} = 2) 算法在Mesh网络上的可达率为100%。随着网络规模的增大, SRB (SRC_{target} = 1) 算法的可达率略有下降, 但也明显高于PFlooding算法。

3.3 网络拓扑结构适应性测试

为了评价SRB算法对不同网络拓扑结构的适应性, 本文设计了如下的仿真实验。设置200个节点的Mesh网络, 仿真区域为100 m×100 m, 通过调整射频的覆盖距离来模拟不同节点密度。不同邻居数量时对应的转发率和可达率如图7和图8所示。

由图7可以看出, 在不同邻居数量（平均邻居数量越多表示网络密度越大）下, Flooding算法的

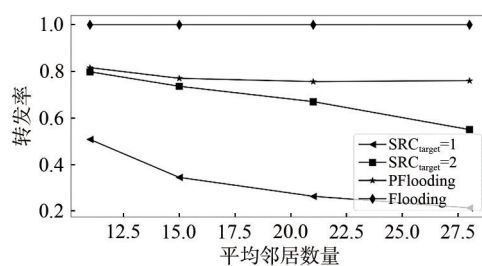


图7 不同邻居数量时对应的转发率

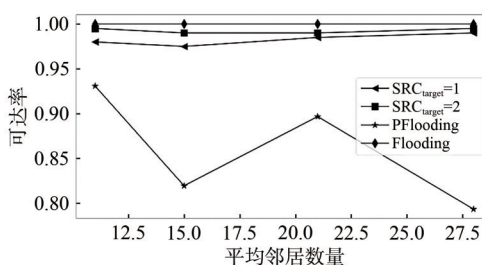


图8 不同邻居数量时对应的可达率

转发率都是100%, 而PFlooding和SRB算法的转发率随着网络密度增大而下降。SRB算法的转发率在不同网络密度下都是最低的, 显示出其较强的网络泛洪抑制能力。图8表示不同网络密度下Flooding、PFlooding和SRB算法的可达率性能。通过仿真结果可知, SRB算法在不同网络密度下都保持着最高的可达率, 保证了数据包传输的可靠性。

3.4 传输时延性能测试

时延是评价Mesh网络非常重要的指标, 包括首次路由建立时间和单跳传输时间。首次路由建立时间是指Mesh网络中某个节点从没有路由到建立至网络出口路由的时间。单跳传输时间是指在已有路由的情况下, 数据包平均传输一跳的时间; 考虑节点在移动, 路由会快速失效。总传输时间是指节点建立一条路由, 加上传输20个数据包的时间（假定平均以10跳计, 20条数据后, 路由失效）。

对比算法包括OLSR和AODV算法。OLSR是典型的主动式路由算法, 在组网后为每个节点生成路由。AODV是典型的按需路由算法, 在节点需要通信时动态创建路由。SRB组网后无须创建路由, 可以直接发起通信。

不同算法的时延性能对比见表4, 可以看出, 在单跳时延方面, 3种算法的性能相差不大; 但SRB算法可以取得总传输时间最短, 并且显著优于OLSR和AODV算法, 这主要是因为SRB算法节省了创建路由的时间。

表 4 不同算法的时延性能对比

参数	首次路由建立 时间/ms	单跳传输 时间/ms	总传输 时间/ms
OLSR	1 481	9	3 281
AODV	820	15	3 820
SRB	无	11	2 200

4 原型实现与应用测试

为了验证所提算法在实际物联网机器人系统中的可用性与有效性, 本文基于嵌入式开发平台构建了一个支持 Mesh 组网的工业仓储机器人原型系统, 并在其上实现了 SRB 算法的完整功能模块。该系统包括多个具备通信、计算和移动能力的机器人节点, 能够模拟典型任务场景中的广播通信需求。

在高动态工业环境中部署仓储机器人集群进行实测, 实验聚焦控制领域核心需求—低时延与高可靠性, 在真实作业场景中采集移动机器人实时数据, 并从以下 3 方面与传统 Wi-Fi 自组网调度技术进行对比分析。

(1) 通信时延动态特性。验证动态环境中的 Mesh 通信稳定性, 考量平均时延、时延抖动、接收信号强度。

(2) 网络抗毁能力。验证网络韧性与自愈能力, 考量自愈恢复时间、丢包率波动范围。

(3) 高负载扩展性。验证网络容量与可扩展性, 考量时延随节点数量变化趋势、最大稳定节点容量。

4.1 实验环境

本文采用乐鑫 ESP32 Wi-Fi 模组构建 Mesh 自组网, 整体系统包括两种网络形态。

(1) 终端节点: 机器人集成 ESP32 模组, 运行 Mesh 协议栈; 机器人间组成多跳自组织通信, 动态建立节点间低时延链路。

(2) Mesh 网关: 支持双协议共存, 即同时运

行 Mesh 自组网协议栈以及标准 Wi-Fi 网络, 其中, Wi-Fi 启用 802.11n@2.4 GHz, 信道带宽为 20 MHz, 用于平台侧与机器人间控制的信令透传。

系统组网架构如图 9 所示, 实验环境及设备如图 10 所示。

本文开发了 6 个具有 Mesh 组网协议的节点, 在实验测试环境中部署了 6 台仓储机器人及 Mesh 网关, 网关通过 Wi-Fi 网络连接至平台, 形成一个本地化的远程控制系统, 该测试环境特征包括以下 4 点。

(1) 仓储机器人高速移动 (速度为 2 m/s)、6 台机器人协同作业。

(2) 环境存在金属机柜遮挡、Wi-Fi 干扰。

(3) 对照组使用传统 IEEE 802.11ac Wi-Fi 终端, 芯片型号为 Wi-Fi 6 RTL8852BU, 主控采用相同硬件平台。

(4) Mesh 网关部署 2 台, 部署高度为 3 m, 间距 ≤ 20 m。

4.2 测试分析

本文实验通过改进后的 Ping 包工具 (精度范围 ± 10 ms), 持续发送 10^6 个传输控制协议 (TCP) 数据包统计平均时延及丢包率。鲁棒性测试则主动触发关闭一台 Mesh 网关设备, 记录业务恢复时间及网络丢包情况。

Wi-Fi 对照组测试: 采用两台 Wi-Fi 6 路由器通过有线回程 (wired backhaul) 构建 EasyMesh 网络, 并进行信道规划。机器人连接至该 Wi-Fi 网络后, 由 PC 端 ping 机器人 IP 地址, 同时控制机器人在两个路由器覆盖范围间往返移动, 记录时延与丢包数据。

原型系统测试结果见表 5。实验数据表明, 本文提出的 SRB Mesh 方案在动态、多跳场景下表现出显著优势。在高速移动场景下, SRB 方案的平均时延仅为 10 ms, 远低于传统 Wi-Fi 组网方案的 110 ms, 且可达率高出一倍以上, 这得益于其快速的链路自

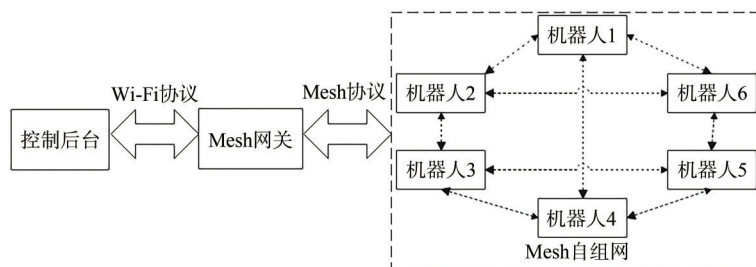


图9 系统组网架构

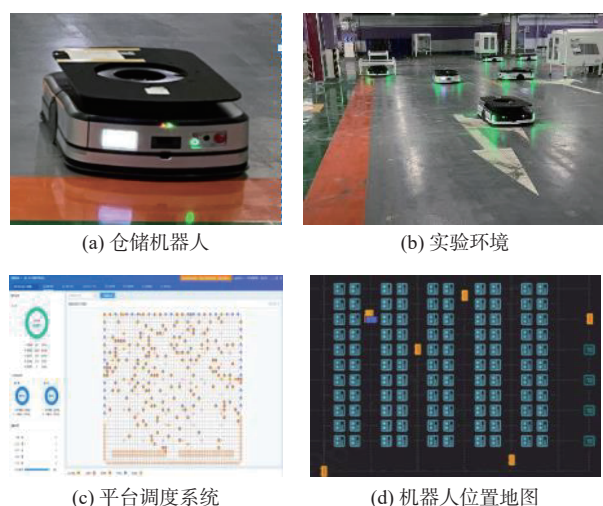


图10 实验环境及设备

表5 原型系统测试结果

场景	测试项	Mesh组网方案	Wi-Fi组网方案
高速移动下	平均时延	10 ms	110 ms
	可达率	90%	40%
多跳通信时延	1 hop	10 ms	110 ms
	2 hop	22 ms	251 ms
	3 hop	35 ms	524 ms

愈能力。在多跳通信方面，SRB的时延随跳数增加呈线性缓增，而Wi-Fi组网方案跨无线接入点（AP）漫游切换导致时延急剧恶化。

5 结束语

本文针对机器人集群系统中传统泛洪算法存在的广播风暴、冗余转发和可靠性问题，提出一种基于邻居信息推测的广播优化算法。该算法通过周期性交换邻居信息构建局部拓扑视图，利用推测接收计数器动态评估数据包传播覆盖度，并结合随机转发时隙与动态阈值机制，实现转发行为的精准控制。仿真与原型系统测试结果表明，SRB算法在保证高可达率和低时延的同时，能将网络冗余降低一个数量级，有效提升了系统能效和稳定性。本文研究为动态拓扑下的轻量化通信提供了新思路，其模块化设计可灵活适配资源受限场景，为物联网机器人系统的高效协同通信提供实用化解决方案。

未来将进一步探索SRB算法在异构网络与大规模部署中的适应性，并结合智能预测优化邻居信息交互机制。为实现这一目标，需从核心模块层面深入探索：在邻居管理模块方面，当前周期性邻居信息更新机制在节点高速移动场景下可能引入冗余通信开销，

未来可研究基于移动预测的自适应更新策略，通过分析节点运动轨迹动态调整信息交换频率；在推测接收计数器设计上， SRC_{target} 阈值的设定依赖经验参数，缺乏理论支撑，亟须建立网络密度与动态性关联的数学模型，实现阈值的动态自适应调整；在决策转发机制中，随机转发时隙可能导致广播时延波动，可结合链路质量预测构建优先级时隙分配算法，同时针对密集网络场景，需简化邻居交集计算复杂度。此外，如何在保障推测准确性的前提下降低安全模块的计算开销，也是算法轻量化部署的关键挑战。

参考文献：

- [1] 王新奕, 费泽松, 周一青, 等. 面向物联网的通感算智融合: 关键技术与未来展望[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(4): 888-908.
Wang X Y, Fei Z S, Zhou Y Q, et al. Integrated sensing, communication, computation, and intelligence towards IoT: key technologies and future directions[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2025, 47(4): 888-908.
- [2] Al-Fuqaha A, Guizani M, Mohammadi M, et al. Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2347-2376.
- [3] 刘怡沛, 江龙韬, 秦岭, 等. 基于嵌入式的可移动环境监测机器人系统设计与研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(2): 62-68.
Liu Y P, Jiang L T, Qin L, et al. Design and research of an embedded mobile environmental monitoring robot system[J]. Computer Measurement & Control, 2023, 31(2): 62-68.
- [4] 方崇全. 煤矿带式输送机巡检机器人关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 263-270.
Fang C Q. Research on key technology of inspection robot for coal mine belt conveyor[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 263-270.
- [5] Yan Z, Zhang P, Vasilakos A V. A survey on trust management for Internet of things[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 42: 120-134.
- [6] 王巍, 王胜鹏, 张瑞杰, 等. 毫米波雷达辅助的多机协同定位与建图研究[J]. 物联网学报, 2024, 8(3): 66-75.
Wang W, Wang S P, Zhang R J, et al. Research on millimeter-wave radar-assisted multi-agent collaborative localization and mapping[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2024, 8(3): 66-75.
- [7] 刘修康, 李龙. 基于多无人机协同的巡检路径规划研究[J]. 航空计算技术, 2025, 55(2): 65-70.
Liu X K, Li L. Study on the inspection path planning based on multi-UAV cooperation[J]. Aeronautical Computing Technique, 2025, 55(2): 65-70.
- [8] Vlachos I, Pascuzzi R M, Ntosis M, et al. Smart and flexible manufacturing systems using autonomous guided vehicles (AGVs) and the Internet of things (IoT)[J]. International Journal of Production

- Research, 2024, 62(15): 5574-5595.
- [9] 胡志明. 军事指挥系统中无线组网通信技术[J]. 通讯世界, 2016, 23(13): 78-79.
- Hu Z M. Wireless networking communication technology in military command systems[J]. Telecom World, 2016, 23(13): 78-79.
- [10] 张伟仁, 黄旭兴. 基于 Mesh 网络多源异构混合信息一体融合技术研究[J]. 指挥控制与仿真, 2025, 47(2): 50-53.
- Zhang W R, Huang X X. Research on integrated fusion technology of multi-source heterogeneous hybrid information based on Mesh network[J]. Command Control & Simulation, 2025, 47(2): 50-53.
- [11] Akyildiz I F, Wang X D, Wang W L. Wireless mesh networks: a survey[J]. Computer Networks, 2005, 47(4): 445-487.
- [12] 黄海丰, 刘培森, 李擎, 等. 协作机器人智能控制与人机交互研究综述[J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 780-791.
- Huang H F, Liu P S, Li Q, et al. Review: intelligent control and human-robot interaction for collaborative robots[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(4): 780-791.
- [13] 昶旭阳, 邓彦松. 基于 ZigBee 技术的多机器人通信技术[J]. 兵工自动化, 2014, 33(12): 72-74.
- Chang X Y, Deng Y S. Multi-robot communication technology based on ZigBee technology[J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(12): 72-74.
- [14] Sankhe K, Jaisinghani D, Chowdhury K. ReLy: machine learning for ultra-reliable, low-latency messaging in industrial robots[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(4): 75-81.
- [15] Nurlan Z, Zhukabayeva T, Othman M, et al. Wireless sensor network as a mesh: vision and challenges[J]. IEEE Access, 2022, 10: 46-67.
- [16] 韩江萍, 汪浩东, 杨佳宇, 等. NDN-Ad Hoc 网络中基于多属性决策的可靠转发策略[J]. 通信学报, 2024, 45(5): 151-164.
- Han J P, Wang H D, Yang J Y, et al. Reliable forwarding strategy based on multiple attribute decision-making in NDN-Ad Hoc networks[J]. Journal on Communications, 2024, 45(5): 151-164.
- [17] Heidari A, Ali J J M, Navimipour N J. Fuzzy logic multicriteria decision-making for broadcast storm resolution in vehicular Ad Hoc networks[J]. International Journal of Communication Systems, 2025, 38(5): e6034.
- [18] 徐哲鑫, 彭杏云, 林潇, 等. 基于概率及退避等待的车辆安全消息广播机制[J]. 计算机系统应用, 2016, 25(8): 211-219.
- Xu Z X, Peng X Y, Lin X, et al. Vehicular safety message broadcast mechanism based on probability and backoff[J]. Computer Systems & Applications, 2016, 25(8): 211-219.
- [19] 叶雪梅, 李雪松, 蔡艳宁, 等. 一种基于可靠最远转发的车载网广播协议[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(5): 1219-1226.
- Ye X M, Li X S, Cai Y N, et al. A reliable most forward within radius scheme based broadcast protocol for vehicular Ad Hoc networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(5): 1219-1226.
- [20] Williams B, Camp T. Comparison of broadcasting techniques for mobile Ad Hoc networks[C]//Proceedings of the 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. New York: ACM Press, 2002: 194-205.
- [21] Li P, Zeng Y N, Li C, et al. A probabilistic broadcasting scheme for emergent message dissemination in urban Internet of vehicles[J]. IEEE Access, 2021, 9: 113187-113198.
- [22] 谢洪, 刘振超, 王大溪. 一种改进的井下无线传感器网络广播算法[J]. 工矿自动化, 2016, 42(12): 42-45.
- Xie H, Liu Z C, Wang D X. An improved broadcasting algorithm for underground wireless sensor network[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(12): 42-45.
- [23] 裘莹, 李士宁, 徐相森, 等. 传感器网络邻居发现协议综述[J]. 计算机学报, 2016, 39(5): 973-992.
- Qiu Y, Li S N, Xu X S, et al. Survey on neighbor discovery protocol for sensor networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(5): 973-992.
- [24] 刘萌, 崔学荣, 钮铭坤, 等. 基于位置信息的车辆协同碰撞预警协议[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(1): 124-128.
- Liu M, Cui X R, Niu M K, et al. Vehicle collaborative collision warning protocol based on location information[J]. Computer and Digital Engineering, 2022, 50(1): 124-128.
- [25] 文凯, 郭伟, 黄广杰. 无线 Ad Hoc 网络中基于拓扑的功率感知路由协议[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 3013-3017.
- Wen K, Guo W, Huang G J. Topology-based power-aware routing protocol in the wireless Ad Hoc networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(12): 3013-3017.
- [26] 余晟, 尚德重, 周猛, 等. 基于可调节局部洪泛更新的移动 WSN 路由协议[J]. 中国科学院大学学报, 2015, 32(2): 273-280.
- Yu S, Shang D Z, Zhou M, et al. An adjustable local-flooding-based routing protocol for wireless sensor networks with mobile sink[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015, 32(2): 273-280.
- [27] Yu D X, Zou Y F, Yu J G, et al. Distributed broadcasting in dynamic networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2021, 29(5): 2142-2155.
- [28] Mchergui A, Moulahi T. A novel deep reinforcement learning based relay selection for broadcasting in vehicular Ad Hoc networks[J]. IEEE Access, 2022, 10: 112-121.
- [29] 阙振然, 王少尉. 强化学习框架下移动自组织网络分步路由算法[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(4).
- Kuai Z R, Wang S W. Stepwise routing algorithm in mobile Ad Hoc network under reinforcement learning framework[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(4).
- [30] 李硕朋, 齐思宇, 林绍福, 等. 图神经网络及其在通信网络领域应用综述[J]. 北京工业大学学报, 2021(8): 971-981.
- Li S P, Qi S Y, Lin S F, et al. Survey of graph neural network and its applications in communication networks[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(8): 971-981.
- [31] Grieco L A, Rizzo A, Colucci S, et al. IoT-aided robotics applications: technological implications, target domains and open issues[J]. Computer Communications, 2014, 54: 32-47.
- [32] Zhou X K, Liang W, Wang K I, et al. Decentralized P2P federated

learning for privacy-preserving and resilient mobile robotic systems[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(2): 82-89.

- [33] 肖凡, 杨庆凯, 周勃, 等. 面向平均区域覆盖的多机器人分布式控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(3): 441-449.

Xiao F, Yang Q K, Zhou B, et al. Distributed even coverage control of multi-robot systems[J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(3): 441-449.

- [34] 赵志豪, 陈娅冰, 张戡. 基于BATMAN-adv的多跳无线网络[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(3): 433-437.

Zhao Z H, Chen Y B, Zhang J. Multi-hop wireless network research based on BATMAN-adv[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(3): 433-437.

- [35] 刘颖, 唐艺玮, 邵小桃, 等. 基于无线多跳自组网的混合路由研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(1): 184-189.

Liu Y, Tang Y W, Shao X T, et al. Hybrid routing protocol for wireless multi-hop Ad Hoc networks[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(1): 184-189.

- [36] Kulla E, Ikeda M, Barolli L, et al. Impact of source and destination movement on MANET performance considering BATMAN and AODV protocols[C]//Proceedings of the 2010 International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2010: 94-101.

[作者简介]



邓志吉(1985-), 男, 浙江大学工程师学院博士生, 主要研究方向为无线通信与系统、物联网操作系统、可靠低时延网络协议、工业确定性媒体传输技术与智能化应用。



王明慧(1987-), 男, 全省视觉物联融合技术重点实验室高级工程师, 主要研究方向为无线大规模组网、无线媒体传输优化、无线通感一体化、IOT组网技术、低功耗蓝牙通信、无线音频传输、无线安全。



杜龙(1988-), 男, 浙江大华技术股份有限公司嵌入式软件工程师, 主要研究方向为无线IoT大规模组网传输技术、Mesh网络算法、低功耗网络传输技术。



孟金(1987-), 男, 浙江大华技术股份有限公司嵌入式软件工程师, 主要研究方向为无线中远距离稳定传输、低功耗传输优化及其在Wi-Fi监控网络中的应用。



杨照辉(1992-), 男, 浙江大学信息与电子工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为智能通信计算融合系统、无线大型边缘学习、全息通信。



刘圣波(1992-), 男, 浙江大华技术股份有限公司嵌入式软件工程师, 主要研究方向为无线网络MAC层协议设计、网络资源优化、无线监控网络。



吕杨棋(1999-), 男, 浙江大华技术股份有限公司嵌入式软件工程师, 主要研究方向为无线IoT大规模组网传输技术、Mesh网络算法、低功耗网络传输技术。