

## 定向无线自组网中的邻居发现算法综述

李想, 朱小军, 冯斯梦, 董超, 张磊

### 引用本文

李想, 朱小军, 冯斯梦, 董超, 张磊. 定向无线自组网中的邻居发现算法综述[J]. 计算机科学, 2025, 52(3): 306-317.

LI Xiang, ZHU Xiaojun, FENG Simeng, DONG Chao, ZHANG Lei. [Overview of Neighbor Discovery Algorithms in Directional Wireless Ad Hoc Networks](#) [J]. Computer Science, 2025, 52(3): 306-317.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

### Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### [基于分层注意力网络和积分梯度的细粒度漏洞检测方法](#)

Fine-grained Vulnerability Detection Based on Hierarchical Attention Networks and Integral Gradients  
计算机科学, 2024, 51(12): 326-333. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.231000174>

#### [基于多智能体协同的无人机编队控制研究](#)

Study on Unmanned Aircraft Formation Control Based on Multi-agent Collaboration  
计算机科学, 2024, 51(11A): 240100105-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240100105>

#### [无人机辅助的高能效边缘联邦学习综述](#)

Survey of UAV-assisted Energy-Efficient Edge Federated Learning  
计算机科学, 2024, 51(4): 270-279. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.231100084>

#### [基于流线距离聚类的海洋数据向量场可视化](#)

Visualization of Ocean Data Vector Field Based on Streamline Distance Clustering  
计算机科学, 2023, 50(6A): 220300284-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220300284>

#### [复杂网络社团发现综述](#)

Survey of Community Detection in Complex Network  
计算机科学, 2022, 49(11A): 210800144-11. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210800144>

# 定向无线自组网中的邻居发现算法综述

李想<sup>1</sup> 朱小军<sup>2</sup> 冯斯梦<sup>1</sup> 董超<sup>1</sup> 张磊<sup>1</sup>

1 南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 211106

2 南京航空航天大学计算机科学与技术学院 南京 211106

(lx717@nuaa.edu.cn)

**摘要** 对当前无线定向自组网领域中的定向邻居发现算法的相关研究成果进行了系统性总结。首先,从定向自组网在无线通信中的重要性出发,介绍了相关背景知识和基本概念,指出其在无线通信领域的研究前景。然后,依据不同的技术标准,对定向邻居发现算法进行了多个维度的分类和比较,分别深入探讨了各种算法在不同应用场景下的适用性和局限性,具体分类包括基于扫描序列设计的确定性和随机性算法、同步和异步算法、纯定向和全向辅助发现算法、全盲和半盲算法,以及直接和间接邻居发现算法。接着,结合提出的分类方法以及算法的实际应用情况,详细阐述了部分重要定向邻居发现算法的设计原理及其收敛过程,包括确定及随机性邻居发现算法、异步邻居发现算法,以及利用机器学习技术的优化算法。最后,探讨了定向邻居发现算法的未来研究方向及应用趋势。

**关键词** 邻居发现;定向天线;定向自组网;无线网络;扫描序列;异步算法

**中图分类号** TN827+.4;TN929.52

## Overview of Neighbor Discovery Algorithms in Directional Wireless Ad Hoc Networks

LI Xiang<sup>1</sup>, ZHU Xiaojun<sup>2</sup>, FENG Simeng<sup>1</sup>, DONG Chao<sup>1</sup> and ZHANG Lei<sup>1</sup>

1 College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

2 College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

**Abstract** A systematic summary is provided for the research achievements in directional neighbor discovery algorithms within the current domain of wireless directional ad hoc networks. Initially, stemming from the crucial significance of directional ad hoc networks in wireless communication, relevant background knowledge and fundamental concepts are introduced, delineating its research prospects in the realm of wireless communication. Subsequently, based on distinct technical standards, directional neighbor discovery algorithms are categorized and compared across multiple dimensions, delving into various applicable scenarios and associated limitations. Specific classifications include deterministic and random algorithms based on scanning sequence design, synchronous and asynchronous algorithms, purely directional and omnidirectional-assisted discovery algorithms, blind and semi-blind algorithms, as well as direct and indirect neighbor discovery algorithms. Moreover, by integrating the proposed classification methodology with the practical application scenarios of algorithms, the design principles and convergence processes of significant directional neighbor discovery algorithms are elaborately elucidated, including deterministic and random neighbor discovery algorithms, asynchronous neighbor discovery algorithms, and optimization algorithms utilizing machine learning techniques. Lastly, the future research directions and application trends of directional neighbor discovery algorithms are deliberated upon.

**Keywords** Neighbor discovery, Directional antenna, Directional ad hoc network, Wireless network, Scanning sequence, Asynchronous algorithm

## 1 引言

近年来,无线自组网(Ad Hoc Network)通信技术得到了显著的发展,其在成本效益、安全性、操作便捷性、灵活性、部署简易性以及传输速度等方面相较于传统通信技术具有明显

优势。这些特性使得无线自组网技术在灾害监测<sup>[1]</sup>、国防军事<sup>[2]</sup>、智能交通<sup>[3]</sup>、农业发展<sup>[4]</sup>等多个领域得到了广泛的应用。根据中国无线经济发展研究报告,截至2022年末,我国无线经济规模已达到6.6万亿元,占GDP的5.4%,表明无线自组网技术对经济增长具有重要贡献。

到稿日期:2024-06-17 返修日期:2024-09-17

基金项目:国家自然科学基金重点项目(61931011);国家自然科学基金面上项目(62372230)

This work was supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China(61931011) and Surface Project of the National Natural Science Foundation of China(62372230).

通信作者:董超(dch@nuaa.edu.cn)

在无线自组网中,设备的相互识别和连接建立是一个关键过程,这一过程被称为邻居发现(Neighbor Discovery, ND)。邻居发现是无线自组网中的基本功能,它为上层介质访问控制(Media Access Control, MAC)和路由拓扑的构建提供了基础。邻居发现的性能直接影响到网络和通信的效率,尤其是在确保整体网络效率方面,邻居发现的收敛速度是一个关键因素。传统的无线自组网<sup>[5]</sup>通常使用全向天线进行信号的接收和发送,并通过广播的方式完成邻居发现过程。在这种背景下,传统无线自组网邻居发现的研究重点主要集中在降低信号碰撞概率<sup>[6]</sup>、最小化邻居发现延迟<sup>[7]</sup>以及最小化能耗<sup>[8]</sup>等方面。目前,无线自组网领域在解决邻居发现问题上已经积累了丰富的研究成果。

近年来,定向通信技术<sup>[9]</sup>在无线自组网领域引起了广泛关注。与传统全向天线相比,定向天线在相同的发射功率下显著增加了信号的传输距离并提升了接收效率,从而扩展了网络覆盖范围。这一进步对于资源受限的无线自组网来说具有重大的实际意义,特别是在提升网络性能和降低能耗方面。此外,定向通信通过限定通信方向,实现了空间复用,有效增加了网络容量,降低了节点间的碰撞概率,减少了网络中的跳数,进而增强了网络的连通性<sup>[10]</sup>和效率<sup>[11]</sup>。

在保密性方面,定向通信技术因传输的定向性而大幅提升了通信安全,降低了信号被截获的风险,这在军事通讯领域尤为重要。例如,美国国防先进研究计划局(DARPA)的“毫米波数字阵列”(MIDAS)项目就采用了多波束定向天线技术,通过形成狭窄的波束来增强通信的安全性,促进了更安全、高效的军事通信技术的发展。此外,定向天线的使用提高了能量效率,有助于减轻电磁污染和频谱资源的紧张问题<sup>[12]</sup>。美国航空航天局(NASA)也在探索定向光通信技术,以克服射频通信的局限性,并在军事应用中拓展了可见光无线通信(Li-Fi)、星间光链路、自由空间光通信和大气层光通信,以及水下高速数据通信等多个领域<sup>[13]</sup>。

综上所述,定向通信技术在传统无线通信、军事通讯和太空探索等多个领域均有着不可或缺的作用。因此,深入研究定向通信技术不仅具有学术价值,而且对于未来的技术发展具有重要的实践意义和应用前景。

然而,相较于使用全向天线的网络,引入定向天线为无线自组网的邻居发现过程带来了新的挑战。在节点可以自由移动的无线自组网中,节点之间往往缺乏预知的地理位置信息。如果两个节点在任何给定时刻的天线方向不重叠,那么它们之间的通信将难以实现。因此,在采用定向天线的无线自组网中,邻居发现过程不仅需要考虑到节点的存在性,还要同时考虑到天线对准的方向,这无疑增加了设计的复杂性。传统的为全向天线设计的邻居发现算法往往不能直接应用于定向自组网。尽管如此,全向天线仍可以被视为一种特殊的定向天线,其扇区数目为1,主瓣宽度为 $360^\circ$ 。因此,定向自组网下的邻居发现算法在一定程度上适用于传统的全向自组网。

近年来,针对定向自组网的邻居发现算法已经得到了广泛的研究和应用,这些算法各自适用于不同的场景,并各具优缺点。深入理解这些算法,对于推动定向自组网的研究具有重要意义。因此,本文将重点总结和介绍定向自

组网中的邻居发现算法。

值得一提的是,虽然 IPv6 和 IPv4 协议中同样包含了与邻居发现协议<sup>[14]</sup>相关的概念,但这些协议主要关注邻居发现对网络拓扑构建的影响<sup>[15]</sup>,通常将底层的实际邻居发现算法抽象化处理。因此,这些协议与本文所讨论的底层邻居发现算法在本质上是有所区别的。本文所聚焦的邻居发现算法位于更底层的技术层面,而在这个层面之上,可以运行 IPv6 和 IPv4 的邻居发现协议。

## 2 邻居发现的基本模型

如图 1 所示,当前定向天线技术主要分为 3 种类型:固定定向天线、波束转换天线和智能波束天线。

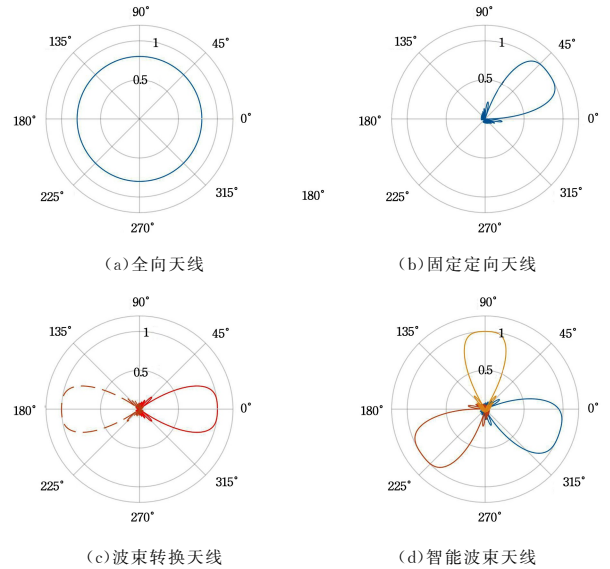


图 1 天线分类示意图

Fig. 1 Schematic of antenna classification

固定定向天线具有固定的主瓣方向,无法改变其指向,因此在邻居发现和网络构建过程中,其性能受到一定限制。波束转换天线利用机械结构,允许操作者手动调整主瓣方向,使其成为定向自组网中应用较为普遍的选项。智能波束天线则具备根据信号来源自动调整主瓣方向的能力,但其由于结构复杂,在目前趋向设备小型化、分散化的无线网络环境中,尚未实现大规模的实际部署。

本文总结的邻居发现算法,通常采用的是波束转换天线。这种天线能够在一定程度上适应网络拓扑的变化,提高邻居发现的效率和可靠性。在深入探讨邻居发现过程之前,有必要对其中涉及的一些专业术语进行详细解释。

1) 时隙(Slot):邻居发现过程中的基本时间单元。它定义了节点在进行扇区扫描和收发状态切换时,每个状态持续的时间长度。时隙的长度,对邻居发现的效率和网络性能有着直接影响。

2) 扇区(Sector):为了设计和实施扇区扫描序列,研究人员将定向天线的可转动范围和波束宽度作为参考,将节点周围的空域离散地划分为若干个扇区。配备了定向天线的节点在特定时隙内会对准一个特定的扇区,以便进行信号的发射或接收。

3) 扇区扫描序列: 由节点上定向天线在每个时隙中对准的扇区序号所构成的一串序列。扇区扫描序列的设计直接影响到邻居发现的性能, 因为它决定了节点在不同方向上搜索邻居的顺序。

4) 收发状态序列: 由节点上定向天线在每个时隙中的发送或接收状态组成的一串序列。收发状态序列与扇区扫描序列相结合, 决定了节点在特定方向上是在发送信号、接收信号, 还是处于静默状态。

定向天线邻居发现的基本模型如图 2 所示, 其中节点 A 和节点 B 均配备了定向天线。考虑到定向天线的波束宽度, 假设每个节点的周围环境被划分为 8 个扇区。只有在某一时刻内, 当节点 A 的天线指向第  $i$  扇区, 节点 B 的天线同时指向第  $j$  扇区, 并且节点 A 和 B 的天线处于不同的收发状态 (一个发送而另一个接收), 没有其他节点的信号干扰时, 节点 A 和节点 B 之间才能成功完成一次邻居发现过程。

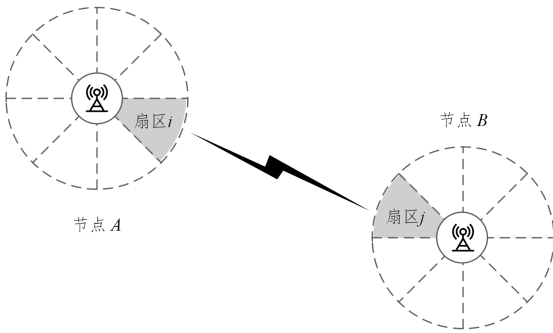


图 2 邻居发现模型示意图

Fig. 2 Schematic of neighbor discovery model

通过分析邻居发现的基本模型, 可以确定邻居发现问题的关键在于如何设计节点的天线扇区扫描序列和收发状态序列。这样设计的目的是确保在有限的时间内, 定向自组网中的所有节点能够相互发现对方。在此过程中, 网络中所有节点完成邻居发现所需的最大时间间隔被称为最大发现时间 (Maximum Time-to-Discovery, MTTD), 而网络中所有节点的平均发现时间 (Average Time-to-Discovery, ATTD) 是指所有节点的最大发现时间的平均值。这些性能指标是评估邻居发现算法效率的关键标准, 它们直接关系到网络的整体性能和稳定性。

### 3 定向邻居发现算法的分类

目前, 国内外学者已经提出多种可行的邻居发现算法, 它们可以按照不同的分类方法进行分类。

1) 基于邻居发现过程中扇区扫描序列的设计方法, 可将算法分为确定性邻居发现算法和随机邻居发现算法 (Complete Random Algorithm, CRA)。确定性邻居发现算法, 也称为基于扫描的算法 (Scan Based Algorithm, SBA), 于文献 [16] 中被首次提出。这类算法的主要特点是在邻居发现过程启动之前, 节点的扇区扫描序列已经被预先确定, 从而使得理论上可以计算出最大发现时间。SBA 算法根据收发状态序列是否预先确定, 可以进一步细分为 SBA-D 算法和 SBA-R 算法。在 SBA-D 算法中, 节点的收发状态序列是预先确定的; 而在 SBA-R 算法中, 节点在每个时隙是否发送的决定是

基于一定概率随机做出的。随机邻居发现算法则是将节点的扇区扫描序列和节点的收发状态序列都完全随机化<sup>[17]</sup>。根据文献 [18] 的分析, CRA 算法虽然在大多数情况下表现良好且设计简单, 但在最大发现时间上表现出长尾效应, 即存在不确定的最大发现时间上限, 只有理论上的平均发现时间。因此, 在一些对实时性和可靠性要求较高的关键应用场景, 如军事通信领域, 使用 CRA 算法时需要特别谨慎。

2) 基于邻居发现过程中节点的时间同步情况, 可将算法分为同步发现算法和异步发现算法。同步发现算法要求网络中的每个节点保持相同的时钟, 确保时隙的划分和对准始终保持一致。这种算法依赖于精确的时间同步, 以便节点能够协调它们的通信和扫描活动。相比之下, 异步发现算法适用于存在时钟漂移或时隙无法对准的网络环境。在这些情况下, 邻居发现算法必须精心设计, 以适应节点间的时间差异。近年来, 基于 Quorum 的算法因其有效性和灵活性而受到广泛关注。Quorum 算法最初在文献 [19] 中被提出, 并在文献 [20] 和文献 [21] 中被应用于无线自组网的节能协议设计过程。最终, 在文献 [22] 中, Quorum 被用于移动自组网中的邻居发现算法设计。该算法将时隙序列划分为多个组矩阵, 每个矩阵包含连续的时隙。通过选择不同的行或列, 不同的节点在不同的时隙相交, 从而实现彼此的发现。另一种解决异步时间问题的算法是基于共质数的邻居发现算法, 该算法能够在时钟异步且节点天线扇区数目不同的情况下完成邻居发现。为了解决异步时间下的全向邻居发现问题, CRA 算法中的生日协议 (Birthday Protocol) 算法<sup>[23]</sup> (也称为 baseline Aloha-like 算法<sup>[24]</sup>) 被提出。该算法通过确定性轮询调度算法的概率模拟, 因此不需要时隙的严格对准, 在实现异步发现的同时, 也节省了节点的能量开销。文献 [25] 进一步详细介绍了生日协议算法的实现, 并研究了该算法在邻居发现上的灵活性和低延迟性。

3) 基于邻居发现过程中全向天线的参与情况, 可将算法分为纯定向发现算法<sup>[26]</sup> 和全向天线辅助发现算法。全向天线辅助发现算法进一步细分为全向发送全向接收 (Omnidirectional Transmit Omnidirectional Receive, OTOR)、全向发送定向接收 (Omnidirectional Transmit Directional Receive, OTDR) 和定向发送全向接收 (Directional Transmit Omnidirectional Receive, DTOR) 3 种模式。文献 [27] 通过混合天线模型, 结合了全向天线和定向天线的互补特性, 旨在加速邻居发现过程, 提高数据包接收率, 并在覆盖范围和重组延迟之间寻求平衡。另一方面, 文献 [28] 提出了多频段定向邻居发现 (MDND) 方案, 该方案利用 2.4GHz 频段的全向天线进行邻居发现, 而在 60GHz 频段使用定向天线进行数据传输, 展示了在平均邻居发现时间和能耗方面的性能提升。进一步地, 文献 [29] 探讨了一种适用于无人机网络的双向握手邻居发现方案, 如图 3 所示, 该方案采用了 DTOR 模式。在该方案中, 每个无人机以一定概率在发送、接收和休眠状态之间变换, 休眠概率与无人机网络拓扑变化相关, 最终推导出了使邻居发现时间最优的传输概率。

由于在相同功率下, 全向天线的搜索范围相对较小, 无法发现实际定向模式下的所有可达邻居, 同时搭载全向和定向

天线会导致节点剩余载荷减少,并且全向天线的参与还会增加信息碰撞的概率,因此当前的研究仍侧重于纯定向发现算法。

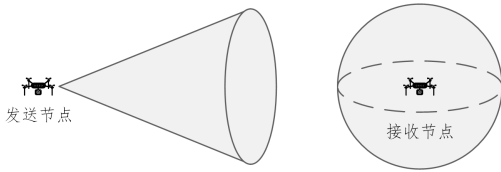


图3 DTOR模式示意

Fig. 3 Schematic of DTOR mode

4) 在无线自组网的邻居发现过程中,辅助信息的利用与否也是算法设计的一个重要方面。基于这一标准,算法可以分为全盲算法和半盲算法。全盲算法是指网络中的节点在邻居发现过程中不依赖任何先验信息,完全依赖于自身感知和扫描能力。这种算法在设计上较为简单,但可能需要较长的搜索时间来完成邻居发现。半盲算法则允许网络中的节点通过一些辅助设备获取一定的先验信息,例如网络中节点的大致位置信息、节点间可能的位置关系等,这些信息可以帮助节点排除大部分不可能的扇区,仅保留部分可能存在邻居的扇区,从而显著减小搜索范围,加快搜索速度。例如,文献[30]提出的算法能够从中继节点中获取邻居节点的相关移动信息,从而推断出潜在邻居的大概位置,提升邻居发现的效率;该文献同时还将该算法整合到了定向天线的MAC层协议中。文献[31]则通过GPS辅助获得网络中节点的大致方位,基于中国剩余定理(Chinese Remainder Theorem, CRT)<sup>[32]</sup>设计了一种适用于三维窄波束天线模型的半盲定向邻居发现算法,缓解了在三维环境下因扇区数量剧增而造成的定向邻居发现算法性能下降的问题。文献[33]在SBA-D算法的基础上,提出了基于迭代交集的邻居发现算法(Neighbor Discovery Algorithm Based on Iterative Common Neighbors, ICN-ND),该算法充分利用已知的邻居信息在相邻节点之间寻找邻居集合的交集,以加速邻居发现的过程。实验证明,相较于SBA-D算法,ICN-ND算法有效地缩短了收敛时长。文献[34]则在SBA算法的基础上,提出了一种高实时性的定向邻居发现算法(RSBA),该算法利用雷达扫描提供的邻居模糊方位角提升算法收敛效率,并通过OPNET仿真验证其提升了邻居发现算法的收敛性。一般而言,在某些特定环境中,半盲算法相对于全盲算法具有更强的发现能力和收敛性能。然而,半盲算法需要依赖提前部署额外设备的支持,这在实际的复杂环境中往往是一个挑战,因为这些环境可能缺乏可以提供先验信息的辅助设备。因此,选择全盲算法或半盲算法取决于具体应用场景和可用的资源。

5) 基于节点之间的发现方式,可将算法分为直接邻居算法和间接邻居算法。直接邻居算法要求两个节点之间通过一跳直接通信来建立邻居关系,只有当节点间通过直接通信接收到对方的通告消息时,才会建立邻居关系。间接邻居算法则允许节点之间通过传递关于彼此位置的信息来加速发现过程。在这种算法中,接收节点不仅接收直接发送的消息,还可以利用其他节点传递的间接信息来加速邻居发现。例如,文献[17]研究了基于Gossip的算法,其中节点通过传播关于

邻居位置的信息来加快发现过程。该文献从数学上推导出了这些算法的最优参数设置,并将算法从同步系统推广至异步系统。通过与直接算法中的CRA算法比较,文献[17]验证了基于Gossip的算法在收敛速度上的优越性。

除了上述所有传统的基于纯数学理论的定向邻居发现算法,近年来,结合机器学习的部分算法也逐渐引起了研究者的关注。下一节中,将详细讨论同步随机邻居发现算法、同步确定性邻居发现算法及异步邻居发现算法的原理和示例,并简要介绍基于机器学习的邻居发现算法。同时,为了方便理解不同算法的分类及对比情况,表1列出了相关算法的详细分类信息。

表1 定向邻居发现算法的分类

Table 1 Classification of directional neighbor discovery algorithms

邻居发现算法	扫描序列	时间同步情况	天线种类	其他信息辅助	节点发现方式
CRA <sup>[17]</sup>	随机	同步	DTDR	无	直接
基于Gossip的算法 <sup>[17]</sup>	随机	同步	DTDR	无	间接
MDND <sup>[28]</sup>	确定	同步	OTOR	无	直接
基于CRT的半盲算法 <sup>[32]</sup>	确定	异步	DTDR	有	直接
ICN-ND <sup>[33]</sup>	确定	同步	DTDR	有	直接
RSBA <sup>[34]</sup>	确定	同步	DTDR	有	直接
2-way CRA <sup>[35]</sup>	随机	同步	OTOR, OTDR, DTOR	无	直接
COND <sup>[38]</sup>	随机	同步	DTDR	无	间接
CSM-RR <sup>[40]</sup>	随机	同步	DTDR	无	直接
LRA <sup>[41]</sup>	随机	同步	DTDR	有	直接
SBA <sup>[46]</sup>	确定	同步	DTDR	无	直接
I-BSA <sup>[49]</sup>	确定	同步	DTDR	无	直接
3D-SBA <sup>[51]</sup>	确定	同步	DTDR	无	直接
基于Quorum的算法 <sup>[52]</sup>	确定	异步	DTDR	无	直接
扩展Quorum算法 <sup>[55-56]</sup>	确定	异步	DTDR	无	间接
基于共质数的算法 <sup>[60]</sup>	确定	异步	DTDR	无	直接
基于Q-learning的算法 <sup>[66-67]</sup>	确定	同步	DTDR	无	直接

## 4 定向邻居发现算法

### 4.1 随机邻居发现算法

随机邻居发现算法最初在文献[17]中提出。文献中设想了一个具有 $k$ 个节点的定向自组网。在每一个时隙中,节点会随机选取一个扇区按照概率 $p_i$ 选择发送,按照概率 $(1-p_i)$ 选择侦听。因此,一次时隙内节点 $i$ 与 $j$ 的发现概率如式(1)所示。

$$p_{i,j} = \frac{\theta}{2\pi} p_i \left(1 - \frac{\theta}{2\pi} p_i\right)^{k-2} (1-p_i) \quad (1)$$

其中, $\theta$ 为定向天线的波束宽度。在 $t$ 个时隙内,节点 $i$ 与 $j$ 的发现概率为 $p_{i,j} = 1 - (1-p_{i,j})^t$ ,文献[17]最终根据该数学模型求解出了最优的发送概率 $p_i$ 。文献[35]在文献[17]提出的单向CRA算法的基础上,首次引入了双向随机邻居发现算法,并分别在OTOR, OTDR和DTOR这3种模式下进行了发现时间的详细分析。为降低碰撞的概率,该算法使一个时隙中所有节点的发送和接收方向不同。随后,文献将CRA与SBA算法进行了综合比较。分析结果显示,CRA算法尽管由于无需节点间协调扫描序列而具备更好的灵活性和泛用

性,但在发现所有邻居所需时隙数的方差方面却高于 SBA 算法,这也与文献[36]的分析结果一致。

在此之后,一些基于随机邻居发现算法的改进算法也不断被提出。文献[37]基于纯随机双向算法的思想,让每个节点在某个方向随机发送 Hello 信息,然后等待同一方向的回应消息。为了避免来自多个潜在邻居的回应消息的冲突,文献引入了一种选择性回应机制,使每个节点根据发现的邻居数量动态确定其发送回应消息的概率。理论分析证明,该算法可以有效减少总邻居发现时间。文献[38]为定向传感器网络开发了一种协同邻居发现( Cooperative Neighbor Discovery, COND)机制。在该机制中,每个节点在每个扇区扫描时隙结束后以分布式方式轮询周围节点的邻居表,以协同发现其邻居。这种算法将直接发现与间接发现进行了结合,通过在 NS-3 中的评估,发现与现有算法相比,COND 降低了发现延迟以及操作开销。文献[39]基于现实场景中无人机的高度可以近似地遵循高斯分布的情况,提出了一种新颖的双向邻居发现算法,根据传输空间与俯仰角参数的比例调整扇区选择的概率,并推导了两个节点之间成功发现的概率和完成邻居发现所需时隙期望值的表达式。模拟结果展示了所提算法的有效性。文献[40]提出了一种基于空间多信道的邻居发现算法(CSM-RR),其通过增加网络中的信道数,大幅减少了收敛时间。当节点数量较大时,文献使用了一种基于动态保留时隙的随机回复算法,节点在收到 Hello 信息后以一定概率选择是否回复,同时,选择回应的节点还将随机延迟若干时隙再进行回复。通过调整回复概率和延迟时隙的数量,该算法可以进一步减少邻居发现的时间。

一般情况下,在具有可靠辅助信息的情况下,半盲算法具有更好的收敛性能。文献[41]提出了一种名为有限随机算法(LRA)的定向邻居发现算法,其利用了从全球定位系统(Global Positioning System, GPS)或其他类似技术获取的邻居的近似位置信息,加速机载海上自组织网络(ASNETs)中高速飞行器和低速船只之间的邻居发现过程。然而,该算法的性能对飞行器和船只的俯仰非常敏感。针对 GPS 信号较差的场景,文献[42]提出了一种无人机网络的联合邻居发现和定位方法,在邻居发现过程中,采用了双向测距(TWR)和到达角(AoA)算法,通过数值分析证明了邻居发现过程的收敛性能。文献[43]所提出的协议通过利用全天线辐射图案,检测一系列有效信号并将它们映射到通用信号模式,从而指示信号源的潜在方向以加速邻居发现过程。仿真数值结果显示,与仅具有主瓣信息的传统邻居发现协议相比,所提协议在收敛性能上有一定改进。文献[44]针对同步半盲随机邻居发现的长尾效应,提出了一种用于最小化邻居发现时间期望的认知框架。该框架在可以获取所有邻居信息的理想情景中,根据邻居数量调整发送概率,并采用动态规划方法递归计算最优接收概率。在无法获取所有邻居信息的实际情景中,在概率调整之前执行基于最大似然估计的邻居估计方法。仿真结果表明,该框架可以减少 38%~43% 平均邻居发现时间。

尽管随机邻居发现算法在收敛时间上不如确定性邻居发现算法,且发现所有邻居所需时隙数的方差可能显著高于其他算法,并在某些极端情况下可能出现长尾效应,导致发现

时间急剧延长,但随机邻居发现算法仍以其简洁的设计优势在某些场景中脱颖而出。与事先需要节点间进行协调的确定性邻居发现算法相比,随机邻居发现算法无需进行预先的特殊处理,适用于绝大多数应用场景,在某些紧急或复杂情境下仍有着广阔的应用前景。

## 4.2 确定性邻居发现算法

确定性算法以其可靠且稳定的发现时长,在一些可以预先协调时隙并获取先验知识的场景中得到了广泛的应用。本节将重点介绍确定性邻居发现算法中的 SBA 算法。SBA 算法是确定性邻居发现算法中最基础和应用最广泛的算法,最初在文献[45]中被提出。该算法在邻居发现开始前首先定义了每个节点上天线的扇区扫描序列,该序列由伪随机序列生成,节点保持时间同步,在扫描序列开始时等概率随机选择发送或接收状态。该算法发现所有邻居的平均扫描序列运行时间与网络拓扑结构有关。Zhang 在文献[45]的基础上,于文献[46]中对扇区扫描序列和收发状态的设计进行了改进,并在文献[47]中提出了 SBA 在发现时间上优于 CRA 算法的结论。

具体改进方法如下:对于含有  $N$  个节点的定向自组网络,每个定向天线均具有  $M$  ( $M$  需为偶数)个扇区。首先,将其从 0 到  $N-1$  依次进行编号,再将其编号转化为二进制 ID, ID 长度为不小于  $\log_2 N$  的最小整数  $L$ ,那么该邻居发现算法所需的总时隙数便为  $M \times L$ 。接着,设计节点的扇区扫描序列和收发状态序列。先将总时隙划分成  $L$  份,每一份中均有  $M$  个收发状态均一致的时隙,具体收发状态由节点二进制 ID 的第  $i$  位决定:0 表示收听,1 表示发送。当节点状态为收听时,扇区扫描序列依次从 1 递增到  $M$ ;当节点状态为发送时,扇区扫描序列依次从  $M/2+1$  递增到  $M$ ,再从 1 递增到  $M/2$ 。由于任意两个节点的二进制 ID 各异,因此总存在某一份中任意两个节点的收发状态各异。而由定向天线邻居发现的基本模型可知,节点发现的条件是同一时隙时两个扇区相差  $180^\circ$ ,即扇区 ID 相差  $M/2$ 。根据上述方法设计的扇区扫描序列,总能保证收发状态各异的节点在同一时隙时的扫描扇区 ID 相差  $M/2$ ,并遍历每个扇区。因此,在  $M \times L$  个时隙内,任意两个节点之间一定能相互发现。

以含有 5 个节点的定向自组网为例,其经过编码后的节点 ID 如表 2 所列。不妨再假设节点 3 和节点 4 的相对空间位置和扇区划分情况如图 4 所示。

表 2 含有 5 个节点的定向自组网节点 ID 的编码情况

Table 2 Node ID codes in directional ad hoc network with 5 nodes

节点序号	节点 ID
1	000
2	001
3	010
4	011
5	100

图 4 中,节点 3 的第 3 扇区与节点 4 的第 7 扇区对准。根据上述 SBA 算法设计节点 3 和节点 4 的扇区扫描序列和收发状态序列,根据时隙数进行展开后如图 5 所示,其中收发状态中的“R”表示接收状态,“S”表示发送状态。

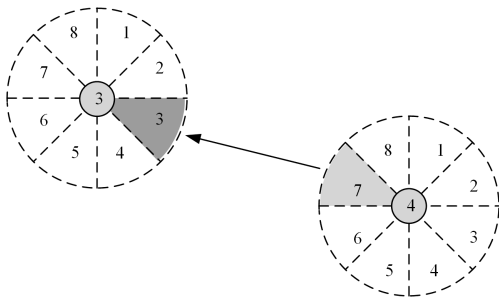


图4 节点3和节点4的相对位置和扇区划分情况

Fig. 4 Relative position and sector division of node 3 and node 4

在第19个时隙时,节点4正在第7扇区发送,节点3在第3扇区收听,此时两个节点可以相互发现,而其余节点也可以通过类似过程发现实现邻居发现。因此,SBA算法有着确定的最大发现时长,上限为 $M \times L \times t_{\text{slot}}$ ,其中 $t_{\text{slot}}$ 为一个时隙的长度。

但上述模型认为天线波束在一次搜索里只会包含一个节点,而未考虑碰撞问题。文献[48]提出了一种考虑了

碰撞效应的方向对模型,在假设多个节点位于一个定向波束中时,给出了发现所有邻居所需的时隙的详细解析表达式。数值结果与仿真结果比较表明,该模型具有一定精度,可以用于指导实际系统的评估,但是未提出解决实际碰撞问题的方案。文献[49]提出的I-SBA算法则是对SBA算法的有效改进,其通过在发送、接收状态外增加一定概率的空闲状态来减少节点的碰撞;同时,文中提出了一种新颖实用的数学模型,以分析考虑冲突效应的邻居发现算法的性能。根据数据分析,该算法有效地降低了有碰撞情况下的邻居发现的时间。文献[50]提出了一种使用双向载波感知冲突避免和基于扫描的多子信道的邻居发现算法(BD-SBA)。在SBA算法的基础上,BD-SBA算法在第一次广播步骤中执行双向载波感知,可以减少广播扫描请求(SREQ)帧的碰撞。在第二步(回复步骤)中,应用多个子信道和多个时隙的机制,以减少扫描响应(SRES)帧的碰撞。根据分析和仿真,所提出的算法在不同波束宽度和密集分布场景下具有更好的性能。

时隙数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
节点3扇区扫描序列	1	2	3	4	5	6	7	8	5	6	7	8	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	8
节点3收发状态序列	R	R	R	R	R	R	R	R	S	S	S	S	S	S	S	S	R	R	R	R	R	R	R	R
节点4扇区扫描序列	1	2	3	4	5	6	7	8	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4
节点4收发状态序列	R	R	R	R	R	R	R	R	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S

图5 节点3和节点4的扇区扫描序列和收发状态序列

Fig. 5 Sector-scan sequence and transceiver status sequence of nodes 3 and node 4

文献[51]提出的3D-SBA算法将SBA算法从二维引入到了三维。该算法将三维球体按照类似地球纬度的方法划分成多层(layer),每一层再划分成多个扇区。

相对外,发送层与接收层也满足相对称关系。根据上述条件,3D-SBA重新设计了扇区扫描序列和收发状态序列,对每一层也进行遍历。该算法的最大发现时长上限为 $\sum_i M_i \times L \times t_{\text{slot}}$ ,其中 $M_i$ 为每一层的扇区数。

如图6所示,在节点互相发现时,除发送扇区和接收扇区

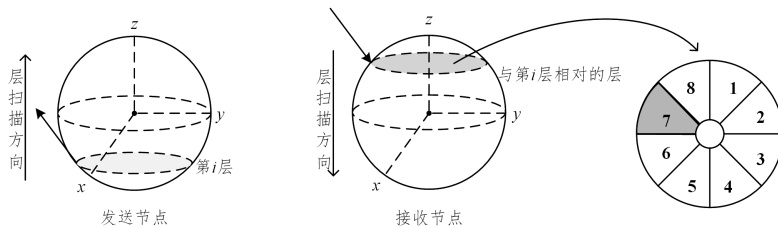


图6 3D-SBA算法示意图

Fig. 6 Schematic of 3D-SBA algorithm

确定性邻居发现算法在邻居发现的过程中表现出较高的可靠性和稳定性。通过确定性邻居发现算法,节点能够在可控的时间内完成邻居的发现,降低了不确定性和波动性。但是其实现需要节点间的协调,以确定扇区扫描序列和收发状态序列,且局限性较大,灵活性较低,难以适应网络拓扑的动态变化。

#### 4.3 异步邻居发现算法

尽管随机邻居发现算法和确定性邻居发现算法已在多种场景和领域下得到了广泛应用,但它们在发现过程中都要求节点的时钟严格同步以对准每个时隙。在时钟不同步的情况下,这两种算法均无法正常工作。前文提到的生日协议算法

虽然可用于常规自组网的邻居发现,但在定向自组网领域的应用仍然相对较少。目前,可用于定向天线的异步邻居发现算法主要包括基于Quorum的邻居发现算法、基于共质数的邻居发现算法,及一些其他异步邻居发现算法。

##### 4.3.1 基于Quorum的算法

文献[52]对基于Quorum的算法在定向天线中的应用进行了详细阐述,并采用网格(Grid)对其过程进行了描述。下面介绍具体算法。

首先,设计扇区扫描序列。对于含有 $M$ ( $M$ 需为偶数)个扇区的定向天线,可以构造出 $M \times M$ 的网格系统,网格中的每一个格子都代表一个时隙。先对每一个天线的扇区都进行

同样的编号,再对每一个同样的扇区都分配一个不同于其他扇区的行与列。

如图 7 所示,基于 Quorum 的算法对所有节点的 3 号扇区都分配第 2 行和第 3 列,对所有节点的 7 号扇区都分配第 4 行和第 5 列。分配到的行与列所在的时隙便是扫描该扇区的时隙。易证,经过上述分配方式,任意两个扇区在  $M \times M$  个时隙内总会存在两个重叠时隙可用于邻居发现。

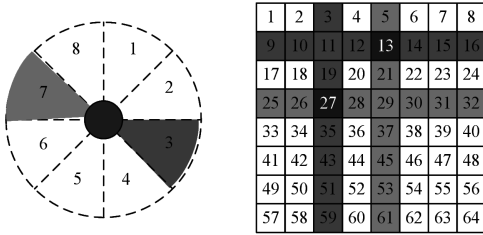


图 7 扇区网格分配情况  
Fig. 7 Sector grid distribution

接着,设计收发状态序列。由于邻居发现时的两个相对扇区 ID 相差  $M/2$ ,因此基于 Quorum 的算法便简单地将前  $M/2$  个扇区始终置于接收状态,后  $M/2$  个扇区始终置于发送状态,即扇区 1,2,3,4 在 64 个时隙内始终处于接收状态,扇区 5,6,7,8 在 64 个时隙内始终处于发送状态,以此保证可以完成邻居发现的扇区在相遇时的收发状态一定相异。对于需要多次握手的情况,该算法将一个时隙划分成多个小时隙。每个开头小时隙的状态与原设定状态一致,后续小时隙状态再不断改变,如图 8 中扇区 3 和扇区 7 在 3 次握手下的收发状态序列所示。因此,基于 Quorum 的算法的最大发现时长上限为  $M^2 \times t_{slot}$ 。

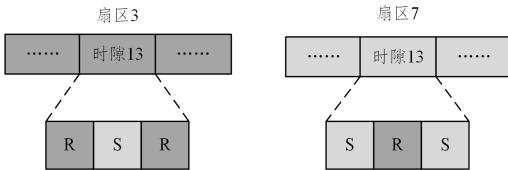


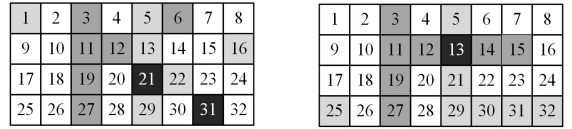
图 8 扇区 3 和扇区 7 在 3 次握手下的收发状态序列  
Fig. 8 Receiving and sending state sequence of sectors 3 and sectors 7 in three-way handshakes

基于 Quorum 的算法的时隙由于是通过随机选取行列确定的,因此具备一定的对抗时钟漂移的能力。当时钟漂移量为时隙的整数倍时,基于 Quorum 的算法仍能确保邻居发现过程顺利完成。这一特性使得基于 Quorum 的算法在某些异步时钟场景下能够发挥作用。

由于  $M \times M$  型的网格系统时隙矩阵维数较大,有很多空闲时隙无法利用,会带来较长的发现延迟,因此后续工作也研究了其他类型的网格系统和行列选择方法,如在  $M/2 \times M$  网格下的 Torus Quorum 系统<sup>[53]</sup>和 Continuous Torus Quorum 系统<sup>[54]</sup>。

如图 9 所示,Torus Quorum 系统给每一个扇区先任意选取不同的一列,再在该列右侧的  $M/2$  列的每列任意选取不同的一行,如果右侧剩余列数不足  $M/2$ ,则从最左边重新开始选取。Continuous Torus Quorum 系统则是 Torus Quorum 与传统 Quorum 系统的结合,在所选中列的右侧选择长为  $M/2$

的一行。相比于传统 Quorum 系统,Torus Quorum 系统和 Continuous Torus Quorum 系统都减少了一半的总时隙数,且能保证任意两个扇区仍有至少一个重叠时隙。



(a) Torus Quorum 系统 (b) Continuous Torus Quorum 系统

图 9 Torus Quorum 系统和 Continuous Torus Quorum 系统  
Fig. 9 Torus Quorum system and Continuous Torus Quorum system

一些基于 Quorum 的改进型算法也在被不断研究。Zhang 在文献[55]和文献[56]中提出了一种扩展 Quorum 系统,在扇区扫描的同时获取其余节点的邻居表,并采用图优化算法计算最短路由和最优跳数,从而减少邻居发现所用的时隙数,属于一种间接邻居发现算法。文献[57]评估了在使用基于 Quorum 的邻居发现算法时的碰撞问题,通过建立一个理论框架分析考虑碰撞效应时的发现延迟;并在理论结果的指导下,设计了一种基于 Quorum 算法的周期自适应机制。文献[58]提出了一种基于非对称协商的邻居发现(AQND)协议,旨在减少邻居发现和路由的延迟。

#### 4.3.2 基于共质数的算法

基于共质数的邻居发现算法近年来也一直被不断研究,它们通常利用中国剩余定理(CRT)<sup>[32]</sup>的特性确保任意两个节点都存在某一时隙可以相互发现。中国剩余定理的具体表述如下:对于任意两个互质的整数  $p$  和  $q$ ,及任意小于  $p$  的整数  $x$  和小于  $q$  的整数  $y$ ,都存在  $t \in (0, pq)$  使得以下方程组成立:

$$\begin{cases} t \bmod p = x \\ t \bmod q = y \end{cases}$$

即当  $t$  在  $pq$  内时,能通过对  $p$  和  $q$  取余,得到  $p$  和  $q$  内的任意一对整数  $x$  和  $y$ 。

基于共质数的邻居发现算法最早由 Prabal 等于文献[59]中提出,用于解决时隙不同步情况下的邻居发现问题。文献[60]将其引入到定向自组网中用于邻居发现,但该算法的特殊性使得其仅可适用于每个节点的扇区数目不同的情况。下面介绍该算法的基本内容。

首先,该算法与 SBA 算法一致,对各个节点进行编号并转化为  $L$  位二进制编码 ID,然后对二进制编码 ID 进行改进。不同的文献针对这个问题有着不同的改进方法。文献[28]的改进方式是:若编码 ID 长度为奇数,则编码 ID 不需要进行任何改变;但若长度为偶数,则在最后添加一位原编号中出现次数较少的数。文献[60]中的改进方式是:固定在编码 ID 开头添加  $l_1$  个 0,结尾添加  $l_2$  个 1,在中间添加固定序列“10”,其中  $l_1$  与  $l_2$  需满足  $l_1 > l_2$  且  $l_1 + l_2 > L$ ,并保证改进后的序列长度  $L'$  为奇数。如原 ID 为“1011”时,经过方法 1 改进后为“10110”,即在末尾添加了出现次数较少的“0”;而经过方法 2 则会被改进为“00010101111”,即在开头添加 3 个 0,结尾添加 2 个 1,在中间添加固定序列“10”。虽然对编码 ID 的改进方式不同,但它们本质上均是为了保证在设计扇区扫描序列时,能找到两个与序列长度  $L'$  互质的  $p$  和  $q$ 。

在改进完成节点的二进制编码 ID 后,收发状态序列即为改进二进制编码 ID 序列的不断循环,如上述节点在方法 1 改进后的收发状态序列即为“101101011010110……”,其中 0 表示接收,1 表示发送。

接着,设计节点  $i$  扇区扫描序列。为了保证节点天线的每一个扇区都有机会被选择,用于取余的  $p_i$  和  $q_i$  需均大于扇区数  $M_i$ 。一种广泛使用的选择方法是,选取  $p_i$  为大于  $M_i$  且不等于  $L_i'$  的最小质数, $q_i$  为大于  $M_i$  且不等于  $L_i'$  的最小 2 的幂数。若用  $e_i^t$  和  $u_i^t$  分别表示  $t$  时隙的收发状态和扫描的扇区号,则最终的扇区扫描序列为:

$$u_i^t = \begin{cases} (t \bmod p_i) + 1, & e_i^t = 1 \text{ and } (t \bmod p_i) < M_i \\ (t \bmod q_i) + 1, & e_i^t = 0 \text{ and } (t \bmod q_i) < M_i \\ \text{rand}(M_i), & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中,  $\text{rand}(M)$  表示在 1 到  $M$  中随机选取一个整数。根据上述 CRT 定理,通过此类方法设计的扇区扫描序列一定能保证  $t$  在  $p \times q$  内,能通过对  $p$  和  $q$  取余,得到  $p$  和  $q$  内的任意一对扇区号  $x$  和  $y$ ,并且  $x$  和  $y$  所处的收发状态各异,进而对于任意两个节点  $i$  与  $j$ ,一定能在  $\max(p_i, q_i, p_j, q_j)$  个时隙内相互发现。

基于共质数的邻居发现算法通过改进的二进制编码循环确定收发状态,并通过对不同的质数取余确定扫描扇区号。当节点时钟发生漂移时,互质性质的存在,保证了任意扇区号之间仍然都有时隙重叠的可能,因此任意两个节点之间仍能相互发现。文献[57]也验证了在时钟漂移量不是时隙整数倍时,基于共质数的邻居发现算法仍具备一定的邻居发现能力。

进一步,文献[61]引入了单个节点搭载多天线的场景,并利用基于共质数的邻居发现算法推导了成功进行邻居发现的有界延迟条件,以及在此情况下的最坏发现延迟限制。值得注意的是,基于共质数的邻居发现算法不仅适用于异步时钟情况,还可在各节点天线扇区数目不同的情况下使用,但这也给算法在节点天线扇区数目相同情况下的应用带来了限制。

从定义上看,基于 Quorum 的算法和基于共质数的算法实际上仍然属于确定性算法。与 SBA 算法相比,这两种算法虽然引入了更多的冗余时隙,但这些冗余时隙的存在也为邻居发现提供了更为可靠的保障。同时,这两种算法在运行时只需知晓定向天线的扇区数目,而无需知晓网络中节点的具体数量,因此在多种应用场景上更具适用性。

还有一些经过特殊设计的算法被提出,用于解决异步时钟下的邻居发现问题。文献[62]和文献[63]提出了近似相同的邻居发现算法。该算法以串行方式执行邻居发现,即依次使某一节点的天线固定不动,然后不断旋转其他节点的天线,以发现该节点的所有邻居,并同时收集间接邻居信息以加速算法的收敛。文献[64]提出了一种基于狩猎的定向邻居发现(HDND)方案,其适用于自组织的毫米波网络。在该方案中,节点以不同的速度不断旋转其定向波束,以扫描邻近的其他节点,旋转角速度较快的节点将在有限时间内追赶较慢节点的天线波束,从而完成相互发现。

综上,异步邻居发现算法尽管已经得到广泛研究,但在发现时间上仍然远远落后于同步时间算法,且算法实现十分复杂。因此,设计能快速收敛的异步邻居发现算法

仍然是当前面临的一个难题。

#### 4.4 基于机器学习的算法

随机邻居发现技术在邻居发现时间上限方面存在固有限制。确定性算法采用预定义的顺序扫描定向扇区,导致了其对网络拓扑的动态变化适应性较差。近年来,随着计算机科学和人工智能的迅速发展,机器学习[65]取得了巨大的进展和卓越的性能。作为计算机科学的重要分支,它在各个领域取得了显著的进展,并被广泛应用于日常生活。与传统基于纯数学方法的邻居发现算法相比,基于机器学习的邻居发现算法因具有高效性和泛用性而受到越来越广泛的关注,并逐渐展现出巨大的潜力,有望弥补上述算法的缺陷。

但由于在无线自组网中缺乏可用于模型训练的先验知识,普通机器学习算法的收敛速度会面临阻碍。因此,目前大多数利用机器学习的邻居发现算法采用了强化学习技术,包括 Q-learning 算法、贝叶斯推理、学习自动机和最优自适应学习等。

Q-learning 算法是强化学习中的关键技术,其本质上是通过价值迭代,得到智能体在给定环境中最大化累积奖励的最佳策略。

如图 10 所示,假设一个智能体正处于一个具有有限状态和离散时间间隔的动态系统。设  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  表示系统的状态空间, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  表示智能体可用的动作集。在状态  $s \in S$  中执行动作  $a \in A$  所获得的奖励设为  $r(s, a)$ 。Q-learning 算法的目标便是学习一个策略  $\pi$ ,该策略基于当前状态  $s$  选择动作  $a$ ,以获得最佳奖励。其中, $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$ 。

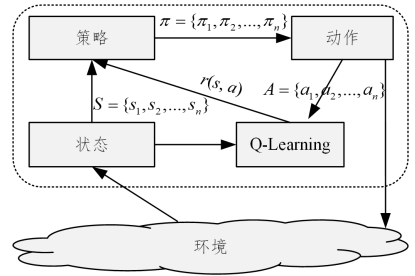


图 10 Q-learning 算法原理示意

Fig. 10 Q-learning algorithm principle

文献[66]和文献[67]在 SBA 算法的基础上,引入了 Q-learning 算法优化节点的收发状态策略,显著提高了邻居发现的效率。相应地,文献[68]和文献[69]在 CRA 算法的框架内,通过采用基于 Q-learning 算法的方案,使每个节点能够独立调整策略,以最小化发现延迟,并在降低开销和计算复杂度的同时提升性能。文献[70]对不同的回报策略进行了比较,最终结论表明 UCB(Upper Confidence Bound)策略在算法性能方面表现优越,相较于  $\epsilon$ -greedy 策略、衰减的  $\epsilon$ -greedy 策略和 SoftMax 策略具有更好的性能。文献[71]在 Continuous Torus Quorum 系统的基础上,通过综合考虑间接邻居信息和先前扫描知识,利用 Q-learning 算法自适应地调整波束的方向和数量,有效减少了进行邻居发现所需的预计时隙数量。

一些其他的强化学习算法也被陆续运用到邻居发现问题的优化上。在文献[72]中,邻居发现过程被建模为一个学习

自动机,在一个具有未知动态的非平稳学习环境中运行。节点通过其过去的观察学习环境,并调整其策略以实现更快的发现速率。通过对所提出的学习方案的渐近行为进行分析,发现其收敛到一个等概率分布,所提出的方案在密集节点网络中能更快地发现网络邻居。文献[73]介绍了一个贝叶斯推断模型,用于动态更改邻居发现参数。通过动态计算接近最优的邻居发现配置,最小化了在战术网络中从长时间无线链路断开中恢复所需的时间。

无线自组网经常处于动态且不断变化的应用环境中,与传统的随机和基于扫描的邻居发现方案相比,基于强化学习的算法在各种节点密度和波束宽度上都表现出显著的性能增强。但是,目前对异步时间系统的研究仍然不足,且当前所有可用的算法均属于强化学习领域。可以预见,针对定向自组网邻居发现问题的机器学习算法领域还存在巨大的研究空间。表3中对上文详细提到的5类定向邻居发现算法的相关性能进行了比较。

表3 定向邻居发现算法的性能比较

Table 3 Performance comparison of directional neighbor discovery algorithms

算法名称	收敛时间	适用场景	优点	缺点
确定性邻居发现算法	$M \times L \times t_{\text{slot}}$	同步时间系统,多节点场景	确定性高,收敛快速	灵活性差,适应动态变化差
随机邻居发现算法	按概率收敛,无上限	节点数量较少,紧急或复杂环境	设计简单,灵活性高	发现时间长尾效应,实时性差
基于 Quorum 的异步算法	$M^2 \times t_{\text{slot}}$	时钟漂移较小的异步环境	对抗时钟漂移能力强	冗余时隙多,发现延迟长
基于共质数的异步算法	$\max(p_i q_j, p_j q_i) \times t_{\text{slot}}$	各节点天线扇区数目不同的异步系统	适用于异步时钟,扇区数目不同的情况	只能适用于不同扇区数目的情况
基于机器学习的算法	由实际算法决定	需要实时调整的复杂网络环境	高效,适应性强	实现复杂,需大量计算资源

## 5 面临的挑战和发展趋势

尽管在定向自组网中的邻居发现算法方面已经取得了一系列显著的研究成果,但其收敛速度仍与全向自组网中的算法存在明显差距。此外,传统算法在适应复杂环境和动态拓扑方面存在困难,而智能化算法的计算量也是一个巨大的挑战。因此,未来对算法的优化研究仍然显得迫切和必要。根据当前的研究进展,未来可能的研究趋势包括以下几方面。

1)从传统数学优化向机器学习辅助优化的转变。传统的数学优化方法在提升邻居发现效率方面已经遭遇了发展瓶颈,未来的研究应更加注重算法的智能化与自适应性。随着机器学习算法能力的不断提升,将机器学习技术融入定向邻居发现的优化过程中已成为一种显著趋势。通过大数据分析等手段,识别并提取影响邻居发现效率的关键特征,结合机器学习的持续训练与优化,有望进一步提升定向邻居发现算法的收敛效率。此外,整合边缘计算<sup>[74]</sup>等技术,将邻居发现过程中的部分计算任务迁移至网络边缘,还能够有效降低核心网络的负载,增强整个网络中节点发现的性能与可靠性。

2)从简单环境到复杂多变的网络环境。随着无线自组网技术在多个领域的广泛应用,原本针对简单环境设计的邻居发现算法可能在特殊环境下遭遇挑战,如三维空间的复杂分布、时钟异步、外部干扰、节点数量不足或过多等问题。因此,研究外部干扰的处理机制,减少算法对时钟同步的依赖,并探索能够适应复杂环境的综合性通用算法,已成为一个重要的研究方向。未来可以考虑针对三维空间或更高维度的网络环境,引入连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)技术<sup>[75]</sup>,研究特定的邻居发现算法,以适应无人机、卫星网络等多种应用场景,并提升邻居发现算法的效率。

3)从单一型算法到混合型算法的过渡。为了提升邻居发现的效率,结合多种算法以利用它们的协同优势逐渐成为一种研究趋势。同时,越来越多的研究者开始关注将邻居发现效率与其他性能指标相结合的优化问题,而不是单一地关注某一算法的优化。未来可以在仿真环境中适当测试和优化组合策略,同时并行使用多种技术研究多模态算法。此外,

还可以考虑研究跨层设计方法<sup>[76]</sup>,将邻居发现算法与路由、MAC层等其他网络层结合起来,以实现整体性能的优化。例如,考虑物理层的特性,如信号衰减和干扰模型,以提高算法的准确性和效率。

4)从稳定拓扑向动态拓扑转变。当前的邻居发现算法大多基于节点位置固定的假设。然而,在实际应用场景中,节点可能会经历自由而迅速的移动,从而导致网络拓扑结构的动态变化。此外,在大规模无人机集群执行复杂任务的过程中,节点还存在动态地加入或退出网络的可能性,从而直接引起网络节点规模的改变。在这种背景下,定向邻居发现算法的设计将变得更加复杂和具有挑战性。因此,研究节点可移动性及复杂网络拓扑下的定向邻居发现算法,也将成为学术界未来的一个重要发展趋势和研究挑战。

此外,随着网络规模的扩大和应用场景的复杂化,一些潜在的新兴趋势也逐渐显现出来。例如,在安全性和隐私保护方面,设计邻居发现算法时,应将用户安全因素纳入考量范畴,研究抵抗恶意节点攻击和保护用户隐私的策略<sup>[77]</sup>,同时可以采用密码学技术来增强算法的安全性,或通过匿名认证等机制确保节点身份的合法性。其次,邻居发现算法的未来发展还应考虑到节能减排<sup>[78]</sup>等方面,以减小无线通信对环境的影响。这将涉及到算法设计和网络架构的优化,旨在实现更高效的能源利用。

**结束语** 定向自组网作为现代通信技术的一个重要分支,已经成为了通信领域的研究热点。这种网络结构能够在有限的能量和资源下提高通信效率和网络容量。邻居发现作为定向自组网中的基础功能,对于网络的构建和性能至关重要。本文旨在深入探讨定向自组网中的邻居发现问题,并通过不同的分类标准对现有的邻居发现算法进行系统性的分类及比较,总结和讨论定向邻居发现算法的未来挑战和发展趋势。

本文对定向自组网中的邻居发现算法进行了全面的分析和讨论,涵盖了算法的基本原理、内容、步骤以及性能等关键信息,旨在为该领域的后续研究提供理论支持和实践指导。随着技术的不断进步和应用场景的日益复杂,定向邻居发现

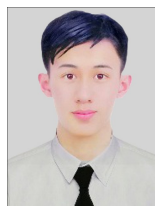
算法将继续发挥重要作用,并在未来通信技术的发展中占据重要地位。

### 参 考 文 献

- [1] JAHIR Y, ATIQUZZAMAN M, REFAI H, et al. Routing protocols and architecture for disaster area network: A survey[J]. *Ad Hoc Networks*, 2019, 82: 1-14.
- [2] PAPA KOSTAS D, ESHGHI S, KATSAROS D, et al. Energy-aware backbone formation in military multilayer ad hoc networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2018, 81: 17-44.
- [3] AGARWAL Y, JAIN K, KARABASOGLU O. Smart vehicle monitoring and assistance using cloud computing in vehicular Ad Hoc networks[J]. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2018, 7(1): 60-73.
- [4] OJHA T, MISRA S, RAGHUWANSHI N S. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 118: 66-84.
- [5] WU J J, ZHU X J, DONG C, et al. Research on Spectrum Sampling Performance for UAV Spectral Reconnaissance [J]. *Radio Communications Technology*, 2023, 49(3): 438-446.
- [6] SORRIBES J V, LLORET J, PEÑALVER L. Analytical models for randomized neighbor discovery protocols based on collision detection in wireless ad hoc networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2022, 126: 102739.
- [7] CHEN L, BIAN K. Neighbor discovery in mobile sensing applications: A comprehensive survey[J]. *Ad Hoc Networks*, 2016, 48: 38-52.
- [8] HUANG H J, ZHOU T, WANG G C. Study on Energy Consumption of ZigBee Networks Based on Distributed Neighbor Discovery Mechanism[J]. *Computer Science*, 2016, 43(5): 67-72, 112.
- [9] YANG Z L, XIE J, ZHANG G Q. Review of Directional Routing Protocols for Flying Ad-Hoc Networks Based on Directional Antennas[J]. *Computer Science*, 2021, 48(11): 334-344.
- [10] WU Z M, QIU Z L. A Survey on Directional Antenna Networking[C]//2011 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2011: 1-4.
- [11] DAI H, NG K, LI M, et al. An overview of using directional antennas in wireless networks[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2013, 26(4): 413-448.
- [12] JIALIANG Z, SOUNG C L. Capacity Improvement of Wireless Ad Hoc Networks with Directional Antennae[C]//2006 IEEE 63rd Vehicular Technology Conference. 2006: 911-915.
- [13] WANG J Y, MA Y, LU R R, et al. Hovering UAV-based FSO communications: Channel modelling, performance analysis, and parameter optimization[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(10): 2946-2959.
- [14] INTERNET ENGINEERING TASK FORCE . RFC 8161: benchmarking the neighbor discovery protocol[S]. Los Angeles: IETF, 2017.
- [15] HUGHES L E. Third Generation Internet Revealed: Reinventing Computer Networks with IPv6[M]. A Press, 2022.
- [16] STEENSTRUP M. Neighbor discovery among mobile nodes equipped with smart antennas [J/OL]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:59889440>.
- [17] VASUDEVAN S, KUROSE J, TOWSLEY D. On neighbor discovery in wireless networks with directional antennas[C]//Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. 2005: 2502-2512.
- [18] BAKHT M, TROWER M, KRAVETS R H. Searchlight: won't you be my neighbor? [C]//Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2012: 185-196.
- [19] MAEKAWA M. A  $\sqrt{N}$  Algorithm for Mutual Exclusion in Decentralized Systems [J]. *ACM Trans. Comput. Syst.*, 1985, 3(2): 145-159.
- [20] YU-CHEE T, CHIH-SHUN H, TEN-YUENG H. Power-saving protocols for IEEE 802.11-based multi-hop ad hoc networks [C]//Proceedings Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. 2002: 200-209.
- [21] LAI S, RAVINDRAN B, CHO H. Heterogenous Quorum-Based Wake-Up Scheduling in Wireless Sensor Networks [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2010, 59(11): 1562-1575.
- [22] KHATIBI S, ROHANI R. Quorum-based neighbor discovery in self-organized cognitive MANET[C]//21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2010: 2239-2243.
- [23] MCGLYNN M J, BORBASH S A. Birthday Protocols for Low Energy Deployment and Flexible Neighbor Discovery in Ad Hoc Wireless Networks[C]//Proceedings of the 2nd ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking & Computing. 2001: 137-145.
- [24] CHEN L, BIAN K. Neighbor discovery in mobile sensing applications: A comprehensive survey[J]. *Ad Hoc Networks*, 2016, 48: 38-52.
- [25] PANDEY S, SHUKLA P, KALWANI D. Birthday Protocol for Efficient Node Deployment and Neighbor Discovery in Wireless Sensor Network[C]//2021 Third International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV). 2021: 189-195.
- [26] ZHANG Z. Pure directional transmission and reception algorithms in wireless ad hoc networks with directional antennas [C]//IEEE International Conference on Communications. 2005: 3386-3390.
- [27] LI K, AKBAS M I, TURGUT D, et al. Reliable positioning with hybrid antenna model for aerial wireless sensor and actor networks[C]//2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2014: 2904-2909.
- [28] PARK H, KIM Y, SONG T, et al. Multiband Directional Neighbor Discovery in Self-Organized mmWave Ad Hoc Networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(3): 1143-1155.
- [29] WEI Z, LIU X, HAN C, et al. Neighbor Discovery for Unmanned Aerial Vehicle Networks [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 68288-68301.
- [30] ZHU L B, WANG S C, WEI H X, et al. A potential neighbor

- discovery algorithm in directional UAV ad hoc networks based on collaboration [J]. *Radio Engineering*, 2023, 53 (6): 1438-1443.
- [31] LIANG X Y. Research on Neighbor Discovery and Resource Allocation in Directed Ad Hoc Networks[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [32] DING C, PEI D, SALOMAA A. Chinese Remainder Theorem: Applications in Computing, Coding, Cryptography [M]. World Scientific, 1996.
- [33] HONG L, LUO P T, YAN X, et al. A Neighbor Discovery Algorithm for UAV Networking Based on Directional Antennas[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, 38(1): 191-198.
- [34] ZHANG W, PENG L X, XU R H, et al. Neighbor Discovery in Radar Communications Ad Hoc Networks[J]. *Communications Technology*, 2017, 50(4): 701-706.
- [35] ZHANG Z, LI B. Neighbor discovery in mobile ad hoc self-configuring networks with directional antennas; algorithms and comparisons[J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2008, 7(5): 1540-1549.
- [36] PARK J S, CHO S W, SANADIDI M Y, et al. An analytical framework for neighbor discovery strategies in ad hoc networks with sectorized antennas [J]. *IEEE Communications Letters*, 2009, 13(11): 832-834.
- [37] CAI H, WOLF T. On 2-way neighbor discovery in wireless networks with directional antennas[C]//2015 IEEE Conference on Computer Communications(INFOCOM). 2015;702-710.
- [38] NUR F N, SHARMIN S, HABIBM A, et al. Collaborative Neighbor Discovery in Directional Wireless Sensor Networks [C] // 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). 2016: 1097-1100.
- [39] LIU L, PENG L, XU R, et al. A Neighbor Discovery Algorithm for Flying Ad Hoc Network Using Directional Antennas[C]//2019 28th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC). 2019;1-5.
- [40] SONG Y, ZENG L, LIU Z, et al. Cross-Layer Optimization Spatial Multi-Channel Directional Neighbor Discovery with Random Reply in mmWave FANET[J]. *Electronics*, 2022, 11(10): 1566.
- [41] ZHANG W, PENG L, XU R, et al. Neighbor discovery in three-dimensional mobile ad hoc networks with directional antennas [C] // 2016 25th Wireless and Optical Communication Conference(WOCC). 2016;1-5.
- [42] WU Q, WEI Z, PAN C, et al. Joint Neighbor Discovery and Positioning for Unmanned Aerial Vehicle Networks[C]//2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference(VTC2021-Fall). 2021;1-5.
- [43] XIA Q, JORNET J M. Expedited Neighbor Discovery in Directional Terahertz Communication Networks Enhanced by Antenna Side-Lobe Information[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2019, 68(8): 7804-7814.
- [44] BAI W, XU Y, WANG J, et al. Cognitive Neighbor Discovery With Directional Antennas in Self-Organizing IoT Networks [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(8): 6865-6877.
- [45] STEENSTRUP M. Neighbor discovery among mobile nodes equipped with smart antennas[C]//ADHOC'03. Los Angeles: IEEE Press, 2003:120-129.
- [46] ZHANG Z. DTRA: directional transmission and reception algorithms in WLANs with directional antennas for QoS support [J]. *IEEE Network*, 2005, 19(3): 27-32.
- [47] ZHANG Z. Performance of neighbor discovery algorithms in mobile ad hoc self-configuring networks with directional antennas[C] // 2005 IEEE Military Communications Conference. 2005;3162-3168.
- [48] XIONG W, LIU B, LIN G. Neighbor Discovery with Directional Antennas in Mobile Ad-Hoc Networks[C]//2011 IEEE Global Telecommunications Conference. 2011;1-5.
- [49] CAI H, LIU B, GUI L, et al. Neighbor discovery algorithms in wireless networks using directional antennas[C]//2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2012; 767-772.
- [50] YANG A, LI B, YAN Z, et al. A Bi-Directional Carrier Sense Collision Avoidance Neighbour Discovery Algorithm in Directional Wireless Ad Hoc Sensor Networks [J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 2120.
- [51] LAN H, LIU G, WANG W, et al. Three-dimensional scan-based algorithm for directional neighbor discovery in ad hoc networks [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2023, 36(10): e5496.
- [52] KHATIBI S, DEHGHAN M, POORMINA M A. Quorum-based pure directional neighbor discovery in self-organized ad hoc networks[C]//2010 5th International Symposium on Telecommunications. 2010;476-481.
- [53] JEHN-RUEY J, YU-CHEE T, CHIH-SHUN H, et al. Quorum-based asynchronous power-saving protocols for IEEE 802.11 ad hoc networks [C] // 2003 International Conference on Parallel Processing. 2003;257-264.
- [54] CHEN L Y, YAN B S, ZHANG J Y, et al. Neighbor discovery algorithm in mobile low duty cycle WSNs[J]. *Journal of Software*, 2014, 25(6): 1352-1368.
- [55] ZHANG D, HE T, YE F, et al. Neighbor Discovery and Rendezvous Maintenance with Extended Quorum Systems for Mobile Applications [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2017, 16(7): 1967-1980.
- [56] ZHANG D, HE T, YE F, et al. EQS: Neighbor Discovery and Rendezvous Maintenance with Extended Quorum System for Mobile Sensing Applications [C] // 2012 IEEE 32nd International Conference on Distributed Computing Systems. 2012; 72-81.
- [57] CAI H, WOLF T. Self-Adapting Quorum-Based Neighbor Discovery in Wireless Sensor Networks [C] // IEEE INFOCOM 2018 — IEEE Conference on Computer Communications. 2018: 324-332.
- [58] XIA Z, GAO Z, LIU A, et al. AQND: An asymmetric quorum-based neighbor discovery protocol for reducing delay in sensor based systems[J]. *Information Sciences*, 2024, 654: 119820.
- [59] DUTTA P, CULLER D. Practical asynchronous neighbor discovery and rendezvous for mobile sensing applications[C]//SenSys '08. New York, NY, USA, 2008:71-84.

- [60] CHEN L, LI Y, VASILAKOS A V. On Oblivious Neighbor Discovery in Distributed Wireless Networks With Directional Antennas: Theoretical Foundation and Algorithm Design [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2017, 25(4): 1982-1993.
- [61] HONG X, LV N, REN Z. Oblivious neighbor discovery algorithms in airborne networks with directional multi-antenna[J]. *Ad Hoc Networks*, 2023, 141: 103074.
- [62] MURAWSKI R, FELEMBAN E, EKICI E, et al. Neighbor discovery in wireless networks with sectored antennas[J]. *Ad Hoc Networks*, 2012, 10(1): 1-18.
- [63] YANG W, BO L, LIN G. Adaptive Scan-based Asynchronous Neighbor Discovery in wireless networks using directional antennas[C]//2013 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. 2013: 1-6.
- [64] WANG Y, ZHANG T, MAO S, et al. Directional neighbor discovery in mmWave wireless networks[J]. *Digital Communications and Networks*, 2021, 7(1): 1-15.
- [65] ZHOU Z H. *Machine Learning*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [66] HUANG S, LI M, ZHAO L. An intelligent neighbor discovery algorithm for Ad Hoc networks with directional antennas[C]//Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer(MEC). 2013: 302-305.
- [67] LI M, ZHAO L. Simulation of Neighbor Discovery Algorithm for Directional Antenna Ad Hoc Networks Based on OPNET [J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(5): 1707-1714.
- [68] KHAMLICHI B E, ABBADI J E, ROWE N W, et al. Adaptive Directional Neighbor Discovery Schemes in Wireless Networks [C]//2020 International Conference on Computing, Networking and Communications(ICNC). 2020: 332-337.
- [69] WANG Y, PENG L, XU R, et al. A Fast Neighbor Discovery Algorithm Based on Q-learning in Wireless Ad Hoc Networks with Directional Antennas [C] // 2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE, 2020: 467-472.
- [70] GAO J, TANG H, SUI C, et al. Adaptive Neighbor Discovery Scheme for Directional Ad Hoc Network [C]//ICCBN'21. New York, NY, USA, 2021: 222-226.
- [71] JIANG J, WANG S, HAN G, et al. Reinforcement-Learning-Based Adaptive Neighbor Discovery Algorithm for Directional Transmission-Enabled Internet of Underwater Things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(10): 9038-9048.
- [72] EL KHAMLICHI B, NGUYEN D H N, EL ABBADI J, et al. Learning Automaton-Based Neighbor Discovery for Wireless Networks Using Directional Antennas[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(1): 69-72.
- [73] LOEVENICH J F, RETTORE P H L, LOPES R R F, et al. A Bayesian Inference Model for Dynamic Neighbor Discovery in Tactical Networks[J]. *Procedia Computer Science*, 2022, 205: 28-38.
- [74] WANG X, LI J, NING Z, et al. Wireless powered mobile edge computing networks: A survey[J]. *ACM Computing Surveys*, 2023, 55(13s): 1-37.
- [75] WEI Z, LIANG Y, MENG Z, et al. Fast neighbor discovery for wireless ad hoc network with successive interference cancellation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(1): 1322-1336.
- [76] IVANOV V, TERESHONOK M. Cross-Layer Methods for Ad Hoc Networks—Review and Classification[J]. *Future Internet*, 2024, 16(1): 29.
- [77] PUHL Z T, GUO J. Securing IPv6 Neighbor Discovery Address Resolution with Voucher-Based Addressing[J]. 2024, 4(3): 338-366.
- [78] SHAH S M, SUN Z, ZAMAN K, et al. Advancements in neighboring-based energy-efficient routing protocol(NBEER) for underwater wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2023, 23(13): 6025.



**LI Xiang**, born in 2001, postgraduate. His main research interest is UAV beehive networking.



**DONG Chao**, born in 1980, Ph.D, professor. His main research interests include UAV cluster intelligent network and low-altitude intelligent network.

(责任编辑:柯颖)