

基于宽窄波束变换的定向邻居发现算法研究

余彪¹, 张子东², 刘玉涛², 郑博文²

(1. 中国人民解放军 92493 部队, 辽宁 葫芦岛 125003;

2. 中国电子科技集团公司 第 54 研究所, 石家庄 050081)

摘要: 无线自组网是一种无需预设基础设施的无线通信网络, 它由一组带有无线收发装置的移动终端所组成, 形成一个无中心、多跳、自组织的网络; 自组网 MAC 协议的邻居发现问题是网络性能的关键, 针对空中无线自组网窄波束、高动态的场景需求, 提出了一种基于宽窄波束变换的定向邻居发现算法 (FDNC-ND), 该算法能在保证空中组网通信需求的基础上, 根据窄波束、高动态的毫米波通信特点, 保证天线的对准速度与时间的同步精度; 通过仿真实验对邻居发现算法进行验证; 仿真结果表明, FDNC-ND 算法在天线的波束宽度为 12° 、网络节点数为 20 时, 网络的平均邻居发现时间约为 11.85 s; 可以良好地应用于空中定向窄波束、高动态的场景。

关键词: 无线自组网; 窄波束; 网络同步; 毫米波; 邻居发现

Research on Directional Neighbor Discovery Algorithm Based on Wide-Narrow Beamforming Transformation

YU Biao¹, ZHANG Zidong², LIU Yutao², ZHENG Bowen²

(1. The 92493 Troops of the Chinese People's Liberation Army, Huludao 125003, China;

2. No. 54 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Wireless ad hoc network is a wireless communication network without the need of preset infrastructure. It consists of a group of mobile terminals equipped with wireless transceiver devices, forming a decentralized, multi-hop, and self-organizing network. The neighbor discovery issue in the Medium Access Control (MAC) protocol of ad hoc networks is crucial to network performance. To meet the needs of narrow-beam and high-dynamic scenarios in airborne wireless ad hoc networks, a directional neighbor discovery algorithm based on wide-narrow beamforming transformation (FDNC-ND) is proposed. This algorithm ensures the alignment speed of antennas and the synchronization accuracy of time based on the characteristics of narrow-beam and high-dynamic millimeter-wave communication while satisfying the communication requirements of airborne networking. The neighbor discovery algorithm is verified through simulation experiments. Simulation results show that when the beam width of the antenna is 12° and the number of network nodes is 20, the average neighbor discovery time of the FDNC-ND algorithm is approximately 11.85 s. It can be effectively applied in airborne directional narrow-beam and high dynamic scenarios.

Keywords: wireless ad hoc network; narrow-beam; network synchronization; millimeter-wave; neighbor discovery

0 引言

当今社会步入大数据时代, 随着无线通讯技术的普及, 无线自组网应运而生, 自 20 世纪以来由于无线自组网拥有不需要固定的基础设施, 网络建立灵活等特点, 无线自组网一直受到广泛的关注^[1]。定向窄波束天线由于拥有更广的通讯范围以及更强的抗干扰能力, 可以良好地用运载在空中无线组网的应用场合中^[2]。目前大多数主流的通讯设备大多是基于固定基础设施的固定通讯设备, 随着时代的发展与科技的进步, 在某些特殊场景例如野外、高空中等, 固定设备通信已经无法满足通信的需求。无线自组网由此应运而生^[3]。

无线自组网是一种不需要依赖基础设施的无中心自组织的多跳网络, 各个节点可以随时进行退网和入网使得网络拓扑进行动态的调整。无线自组网由于拥有着抗干扰能力强、通信范围远、适用性强等特点可以广泛地应用于军事空中通信复杂的无线电环境^[4]。

近年来, 关于空中自组织网络 (Ad Hoc Networks) 中的媒体接入控制 (MAC) 协议的研究相对匮乏。在现有文献中, 文献 [5] 所提出的特殊多节点无线自组网协议, 该协议要求各个节点在预定的时隙内进行数据传输, 以实现高效的通信。文献 [6] 则介绍了一种基于载波监听的无冲突 MAC 协议 (ESTDMA, evolutionary self-organized time

收稿日期: 2024-07-06; 修回日期: 2024-07-16。

基金项目: 国家自然科学基金(61971162)。

作者简介: 余彪(1985-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 张子东(1999-), 男, 在读研究生。

引用格式: 余彪, 张子东, 刘玉涛, 等. 基于宽窄波束变换的定向邻居发现算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(9): 283-289.

division multiple access), 通过动态调整时隙分配来减少冲突。进一步地, 文献 [7] 进一步细化了时隙分配策略, 为不同节点设定了优先级以占用时隙, 然而这一方法未能充分考虑到各时隙间可能存在的不同业务需求, 导致资源分配不够灵活。文献 [8] 则创新性地提出了自组织时分多址接入协议, 该协议允许对空闲时隙进行二次预约, 以优化时隙资源的分配。然而, 二次预约机制也可能增加传输失败的概率, 从而使得网络时延的控制变得复杂。文献 [9] 设计了一种并发传输 MAC 协议, 该协议结合了载波监听与随机退避机制, 旨在提高 TDMA 协议的信道利用率。尽管这一设计在提升信道使用效率上有所建树, 但同时也带来了吞吐量下降和时延增加的问题, 需要在性能优化上做出权衡。这些研究各有千秋, 同时也揭示了空中自组织网络 MAC 协议设计所面临的挑战与机遇。

在高空场景下, 由于在高空当节点的相对移动速度较高时, 大概率会造成节点间的相对方位发生快速偏转, 天线波束之间的对准关系仅能保持极短的时间, 从而对窄波束天线对准及跟踪周期都提出了更高的要求。在定向自组网协议中, 天线对准是完成邻居发现的基础, 也是最关键亟需解决的技术问题^[10]。

网络同步技术涉及两大核心领域: 邻居发现与时间同步^[11]。在高空环境中, 邻居发现确保节点能精确定位其邻居并建立连接; 而时间同步则应对全盲的自组网环境, 通过算法将各节点时钟校准至统一基准, 以支持资源调度^[12]。利用先进的邻居发现算法与相控阵天线, 我们能迅速确定邻居位置, 并通过时间同步算法统一全网时钟, 为空中无线自组网通信奠定坚实基础。

针对毫米波自组网的特殊需求, 我们提出了一种新颖的基于宽窄波束变换的定向邻居发现算法 (FDBC-ND)。在全盲场景下, 为了维持整个无线自组网的时间同步, 我们设计了三重校准时间同步算法。这一算法通过邻居发现时隙实现粗同步和精同步, 而同步维护则通过预约时隙进行, 确保网络具备出色的时间同步精度。结合相控阵定向天线的特性^[13], 我们进一步创新地采用了宽窄波束变换技术, 实施了粗对准与精对准的双重策略, 从而实现了高效的定向邻居发现。特别地, 针对全盲和半盲两种不同环境, 我们灵活调整策略, 增强了 MAC 协议的环境适应性。经过仿真分析, 我们的 FDBC-ND 算法在性能上展现出了显著优势。与传统的 CA-ND^[14] 和 SBA-R 算法相比^[15], 算法不仅具有更高的时间同步精度, 而且显著缩短了网络建链时间, 实现了更快的邻居发现速度。这一成果为毫米波自组网的优化和应用提供了有力的技术支持。

1 自组网 MAC 协议及邻居发现

MAC 协议是自组网的关键技术之一, 为自组网提供了必要的网络同步支持, 确保了节点间邻居的快速发现以及时间的精准同步。传统的 MAC 协议多适用于固定设施的网络, 而无线自组网由于节点的动态变化以及自组织等特性

的原因, 需要设计新的 MAC 协议, 近些年来研究人员设计了不同的 MAC 协议, 都有着各自的优缺点, 如何设计适合的 MAC 协议是研究的关键。

自组网的 MAC 协议大致分为 3 类: 基于分配的 MAC 协议、基于竞争的 MAC 协议、混合类 MAC 协议^[16]。

基于分配的 MAC 协议主要是通过通过将各种时空、频谱资源进行分割划分, 将各个节点与不同的时隙对应, 使得不同节点在指定的时隙时访问特定的信道。从而实现高容量的网络传输。具体主要有频分多址、时分多址与码分多址。这三者互有优缺点例如: 频分多址虽然易实现, 但是在高动态场景下由于会产生多普勒频移, 导致丢包严重^[17]。码分多址对网络同步的要求过于苛刻很难在高空组网实现。时分多址是将时间分割成一个个不同的时隙, 将不同的时隙分给不同的用户, 但是在多节点通信时如何减少网络的时间延时是关键问题。

基于竞争的 MAC 协议是每个节点在传输数据时通过竞争的方式来竞争信道的使用权, 若成功则发送数据若失败则进行退避, 并根据算法间隔一定时间后再次发送数据, 直到发送成功或者发送超时。CSMA 协议^[18]是典型的竞争类协议, 在低负载的情况下拥有极好的信道利用率与传输时延。目前的空中组网协议大多是基于 CSMA 的协议, 通过竞争信道的使用来避免冲突, 但是在高动态的通信环境中若网络节点过多负载过大, 会使得节点间的握手次数呈指数增大导致很高的传输时延, 网络稳定性急速降低。

混合类 MAC 协议是结合了竞争类 MAC 协议与分配类 MAC 协议的特点, 将二者的优点相结合但是随之而来的便是算法的复杂度很高, 实现困难。典型的混合协议便是 A-DAPT 协议将 TDMA 与 CSMA 结合^[19], 使得其工作在在 TDMA 擅长的多节点环境下有较高的吞吐量, 在网络负载较低时又可以利用 CSMA 特点使得传输时延很低。混合类 MAC 协议的难点在于如何将两个不同的协议融合起来, 以及在竞争阶段与时隙分配阶段合理的进行竞争与时隙分配, 并最终达到在不同的场景下发挥各自的优势弥补各自的目的^[20]。

在常规的全向天线自组网中通常遇到的问题主要是由于无线网络的多跳性引起的隐藏终端与暴露终端的问题^[21], 在引入定向窄波束天线后, 由于节点的移动随机性使得网络节点间没有先验位置信息, 若想让两个节点互相波束对准从而发现彼此这一过程就叫做“邻居发现”^[22]。由于定向天线波束方位的不确定性会导致网络邻居间难以互相发现从而使得网络同步十分困难。因此节点间的位置信息显得十分重要。主要的解决方式一般分为: 通过定位系统例如北斗卫星来获取节点的方位信息; 通过节点在全方向上互相交互握手信息, 来精确判断节点的位置信息与天线的波束方向。邻居发现是实现无线自组网的网络同步、天线对准与跟踪等后续进程的前提。具体分为基于引导的邻居发现、基于半盲的邻居发现与基于全盲的邻居发现^[23]。

MAC 协议为自组网提供了至关重要的网络同步支持,

确保节点间能够迅速进行邻居发现以及时间精准同步。在自组网中, 由于节点移动具有随机性, 节点间通常缺乏先验位置信息。因此, 当两个节点需要相互波束对准以实现彼此的发现时, 这一过程被称为“邻居发现”。一个节点的信息传输范围内能够相互通信的节点被称为邻居节点。网络的建链过程指的是每个节点与其邻居节点之间首次建立通信交互的过程。通过邻居发现, 无线自组网的各个节点能够形成完整的网络拓扑图, 为后续的路由选择和信息传输奠定坚实的基础, 成为无线自组网正常运行的前提条件。

定向天线的自组网网络同步首先要解决的便是天线对准(邻居发现)问题, 在全向天线时天线在各个方向上的增益是相同的, 节点之间通信并不需要知道互相的位置信息, 在使用定向天线后, 由于只在制定方向辐射只有知道节点间的位置信息才可以保持正常通信并防止节点间通信时其他节点的干扰^[24]。

定向天线可以采用的对准方式一般分为 3 种: 基于全盲对准、基于半盲对准与基于引导对准的对准策略。

在本文所描述的通信场景中, 要实现节点 A 和 B 之间的邻居发现过程, 需要满足以下关键条件: (1) 节点 A 和 B 必须处于相反的工作模式, 即一个处于发送模式, 另一个处于接收模式。(2) 两个节点的天线辐射方向需要相对, 确保它们能够相互捕捉到对方的信号。假设节点 A 的发射方向为 θ' , 接收方向为 θ'' ; 节点 B 的发射方向为 φ' , 接收方向为 φ'' 。基于上述两个约束条件, 我们可以推导出如下公式来指导邻居发现的实现:

$$\theta' = (\theta'' + \pi) / 2\pi \quad (1)$$

$$\varphi' = (\varphi'' + \pi) / 2\pi \quad (2)$$

邻居发现算法可以根据不同的先验条件以及天线的波束收发方式进行分类。依据先验条件的差异, 主要可归为三种类型: 全盲邻居发现算法、半盲邻居发

现算法以及基于引导的邻居发现算法。

首先, 全盲邻居发现算法无需过多的先验条件, 仅需知道网络中的节点总数即可。这种算法实现起来相对简单, 对设备的要求也较低。然而, 当对邻居发现的效率有较高要求且设备条件允许时, 可能需要考虑更为先进的算法。其次, 半盲邻居发现算法则需要更多的先验信息, 比如节点的大致位置、节点间的相对位置等。这种算法虽然实现起来相对复杂, 但在设备条件允许的情况下, 能够显著提高邻居发现的效率, 从而增强整个自组网 MAC 协议的运行效率。最后, 基于引导的邻居发现算法相较于半盲算法, 对先验条件的要求更为严格。它通过对不同算法的优缺点进行对比分析, 选择最适合空中毫米波无线自组网的邻居发现策略。在实际应用中, 需根据具体的设备条件和性能需求, 选择最合适的邻居发现算法, 以确保空中毫米波无线自组网的高效运行。

2 网络同步算法

2.1 帧结构设计

本文的帧结构如图 1、图 2、图 3 所示, 预约帧结构被设计为特定格式, 用于网络中的节点在接入网络后, 当其 MAC 层有数据传输需求时, 通过预约帧来发送请求信息。

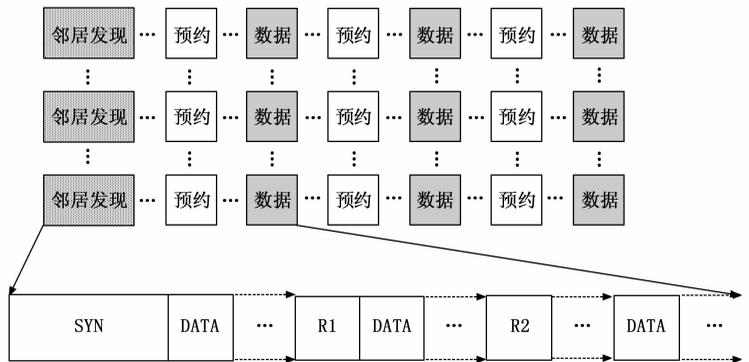


图 1 FD-BC 算法时隙结构

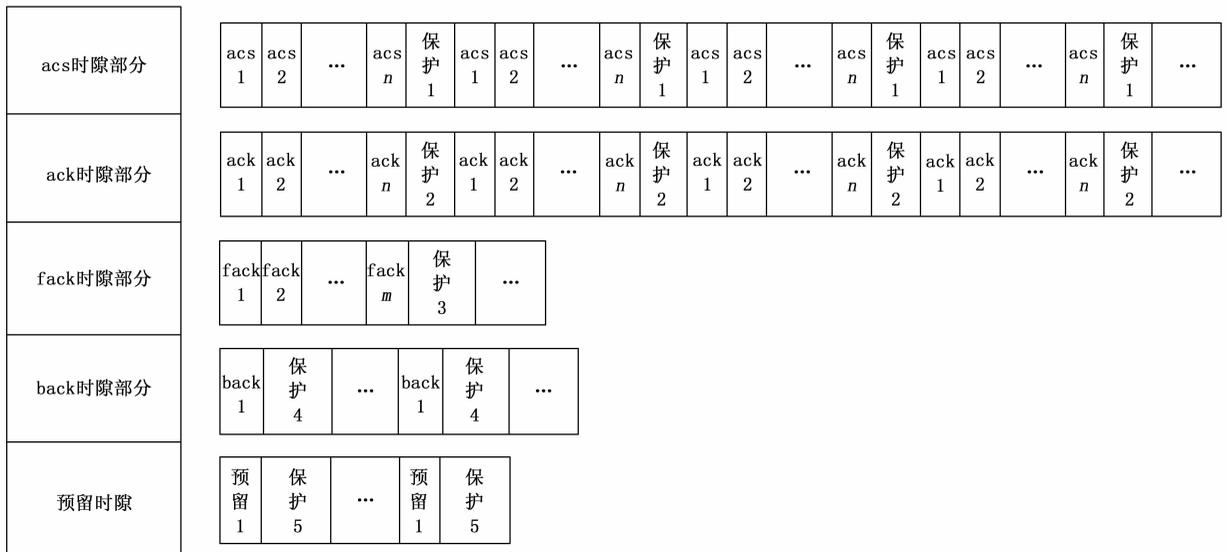


图 2 邻居发现帧结构示意图

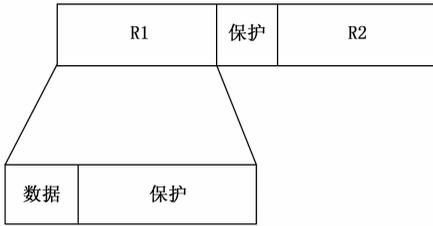


图 3 预约帧结构

这些请求信息中包含了数据的大小、数据包的优先级、节点的唯一标识符 (ID)，以及与之相关的邻居节点信息。一旦接收节点成功捕获到其他节点发送的预约帧，它将把这些帧中的信息汇总并存储起来，随后在预约确认帧中提供相应的反馈。预约确认帧的结构与预约帧保持一致，这种设计确保了网络中所有邻居节点之间的信息流通与共享。

在本文中，每个预约帧的长度都被精确设定为 1.5 毫秒，它由 3 个主要部分组成：预约时隙 R1、预约确认时隙 R2 以及一个保护间隔。其中，R1 时隙和 R2 时隙的长度是相等的。每个预约帧中的发送节点和接收节点是相互绑定的，即它们互为通信的目的节点。此外，为了确保节点在接收到 R1 时隙的信息后有足够的时间进行解调并计算所需的时隙资源，预约帧中设置了一个保护间隔，其长度约占整个预约帧总长度的 10%。这一设计确保了节点能够准确、高效地处理接收到的信息，并将处理结果通过 R2 时隙发送出去。

在采用定向天线的自组网中，节点间进行通信的前提是确保收发波束的相互对准。然而，由于定向天线波束方位的不确定性，网络邻居间的互相发现变得十分困难，这也给网络同步带来了极大的挑战。因此，节点间的精确位置信息成为了实现高效通信的关键。

为了解决这一问题，除了借助如北斗卫星等定位系统来获取节点的方位信息外，另一种有效的方式是通过节点在全方向上互相交互握手信息，从而精确判断节点的位置信息与天线的波束方向。

本文提出了一种适用于毫米波自组网的基于宽窄波束变换的定向邻居发现算法。该算法针对全盲和半盲两种不同的外部先验条件，采取了不同的策略，旨在增强 MAC 协议在实际应用环境中的实用性。通过波束的宽窄切换，结合粗对准与精对准的双重策略，该算法显著缩短了无线自组网的建链时间。此外，针对没有外部时间同步的场景，本文基于 TPSN 算法设计了一种三重校准时间同步算法。这一算法确保了网络内各节点的时间同步，进一步提升了网络的整体性能。最后，通过仿真实验对提出的算法性能进行了验证和评估。

在时间同步且已知双方位置的前提下，可以快速实现节点的天线对准，因此主要思路是设计专用的邻居发现帧，用于周期性的进行节点间发现与对准。进一步充分考虑双方位置的时效性等问题，在计算得到的波束方向上适当增加天线对准扫描范围能进一步增加天线对准算法的鲁棒性。

2.2 邻居发现算法模型

1) 网络邻居发现的扇区划分。整个周期依据时隙结构划分为四个扇区 $M = 4$ ，每个扫描扇区的角度 $x = 90^\circ$ 每个扇面分别对应一个周期内的一次邻居发现，且节点的扇区划分一致。相较于传统单波束定向发送与接收，本文邻居发现算法采用窄波束发送、宽波束接收。每个扇区共有 i 个窄天线波束，节点在某个方向的概率相同均为 $\varphi_1 = \alpha_1/2\pi$ ，其扫描角度（波束宽度）为 $\alpha_1, i \cdot \alpha_1 \geq 90^\circ$ ；每个扇区共有 j 个更窄天线波束，其扫描角度（波束宽度）为 $\alpha_2, j \cdot \alpha_2 \geq 2\alpha_1$ ；宽波束角度为多个窄波束的和 $m\alpha_1$ ，且 $m\alpha_1 \geq 90^\circ$ 。发送节点的波束个数为 k_1 ，接收节点波束个数为 k_2 。

2) 网络的节点数量 N 。在本算法中网络节点数为 N ，节点设置唯一 ID。

3) 时间同步。在基于半盲的邻居算法中节点会有大致的位置信息、时间的外部授时等等。网络若无外部授时，则处于全盲状态，按照时间同步算法进行网络的时间同步。

4) 信息冲突。传统窄波束定向天线产生信号冲突的概率较小，但是由于为了减少邻居发现的时间本文采用窄发宽收的邻居发现策略，宽收时可能会带来一定的信号冲突。因此当可能会产生冲突时，节点按概率休眠退避。如果节点在当先时隙为发送状态，则有 p 的概率选择发送状态， $1 - p$ 的概率选择休眠状态；从而达到冲突避免的作用。但发送概率的选择和可能发生冲突的节点数相关，空中无线自组网节点数越多，发送概率也需要随之降低，才能达到降低冲突的目的。

5) 节点的收发状态序列为 e ，当 $e = 0$ 时代表该节点为接收节点， $e = 1$ 时代表该节点为发送节点。为了解决节点收发状态的对应，节点初始收发状态均为 0，设定一个起始发现节点，将其收发序列状态设为 1。当其余节点收到起始节点的交互信息后，节点收发状态序列切换为 1 从而进入发送模式，继续寻找各自的邻居节点。继而满足波束相对，模式相反的邻居发现条件。网络节点的通信波束模型如下图所示。假设有两个节点分别是 A 与 B。二者均为多波束节点模型，它们的扫描扇区号码分别为： $u = \{1, 2, 3, 4\}$ 。若要完成邻居发现过程 A、B 两个节点必须在各自的天线辐射范围内，且天线波束方向相对。假设每个节点的波束总数有 N_b 个，各个节点在发送或接收时定向天线的波束序号为 B_i, B_j 。在邻居发现过程中分别处于发送与接收模式的节点波束方向必须相对，用公式表达为：

$$B_i = (B_j + N_b/2) \% N_b \quad (3)$$

在法定收场景下，节点 A 以 γ 的概率发 B 以 φ 的概率在 A 的发送覆盖角度内。当 B 回复确认信息时 A 为 $1 - \gamma$ 的概率收。总概率为：

$$\varphi \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma) \quad (4)$$

而在邻居发现过程中由于可能产生干扰，若需要避开干扰情况则其他节点以 γ 的概率发节点 B 不在 φ 的概率的波束范围内；或者让其他的节点以 $1 - \gamma$ 概率侦听，当 A 接收回复信息时不会受到以概率 γ 发送的信息，A 不能在其他的

节点的辐射覆盖范围内 φ 。总概率为:

$$\gamma \cdot (1 - \varphi) + (1 - \gamma)(1 - \varphi \cdot \gamma \cdot \varphi) \quad (5)$$

综上所述在节点有 N 个邻居的网络环境下 A、B 节点的邻居发现概率为:

$$P_{cov} = 2\varphi\gamma(1 - \gamma)[(1 - \varphi)\gamma + (1 - \gamma)(1 - \varphi^2 \cdot \gamma)]^{N-1} \quad (6)$$

2.3 邻居发现算法流程

本设计提出的邻居发现算法的工作流程如图 4 所示, 主要包括以下几个关键阶段: 网络状态初始化阶段、天线的波束扫描阶段以及冲突退避阶段。以下是具体的流程描述。

1) 网络状态初始化阶段: 在这一阶段, 算法首先生成初始化节点, 并确定网络的关键参数, 如网络节点数 N 、初始时隙 t 、真北方向以及节点的收发状态 e_i 等。对于半盲的网络环境, 若所有节点具备外部时间同步与真北信息, 则直接进入网络邻居发现流程; 对于全盲的网络环境, 若无外部时间同步与真北信息, 则在邻居发现的过程中需额外用三重校准时间同步算法来实现网络时间同步。

2) 天线波束扫描阶段: 此阶段包括主动扫描节点和扫描回复两个阶段。在主动扫描阶段, 算法将节点分为固定节点和初始搜索节点。固定节点设定为初始搜索节点, 当所有节点未入网时, 由初始搜索节点开始扫描, 而其他节点则处于接收状态。若已有节点入网, 则该节点有一定几率成为新的扫描发起节点。以节点 A 为例, 假设其作为起始发现节点在主动扫描时隙阶段, 使用窄波束从扇区 1 开始扫描。同时, 存在被动接收节点 B。在扫描回复时隙阶段, A 节点和 B 节点的收发模式对调, A 节点切换到侦听模式, 以宽波束监听扇区 1, 而 B 节点切换到发送模式, 以窄波束发送反馈信息。在 ack 时隙阶段, 若 A 节点成功接收到 B 节点的反馈信息, 则双方成功完成第一次握手, 并进入 fack 时隙阶段进行第二次握手; 若 A 节点未收到反馈信息, 可能是由于 A 节点扇区 1 覆盖的范围内存在多个被动接收节点 (如 C 节点) 同时回复, 造成信息冲突。此时, A 节点将进入休眠状态, 停止发送后续握手信息。在 fack 时隙阶段, 若 B 节点未收到 A 节点的二次交互信息, 则判断为信息冲突, 随后启动节点休眠退避算法。

3) 冲突退避阶段: 根据三次握手的信息交互结果, 算法判断是否存在信息干扰节点。若存在信息冲突, 则按照节点休眠退避算法进行信息的重传; 若未发生冲突, 则节点完成三次握手流程, 邻居发现成功。此时, 节点将互相更新各自的邻居信息表, 并交互邻居的位置信息, 从而完成全网邻居发现和网络同步过程。为了使得邻居发现算法的效率更高休眠系数应选取更优的选择。我们设节点 A 的目标扇区有 n 个节点在一跳范围内, 则每个节点的发送概率为 $(1 - DC)$, 每个节点均可能处于发送状态, 当仅有一个节点处于发送, 其余节点进入休眠时, 即成功进行一次邻居发现, 将问题转化为数学模型, 存在二项分布:

$$(n, (1 - DC)) \quad (7)$$

多个节点 i 选择时隙发送概率为:

$$p(i) = C_n^i \times (1 - DC)^i \times DC^{n-i} \quad (8)$$

只有一个节点选择该时隙的概率为:

$$p(1) = C_n^1 \times (n(1 - DC)) \times DC^{n-1} \quad (9)$$

综上所述, 不同的邻居节点数量若采用相同的休眠系数, 在邻居节点较多时, 效果会明显下降, 因此当判断冲突邻居节点较多时, 通过增大休眠系数有效提升了邻居发现效率。

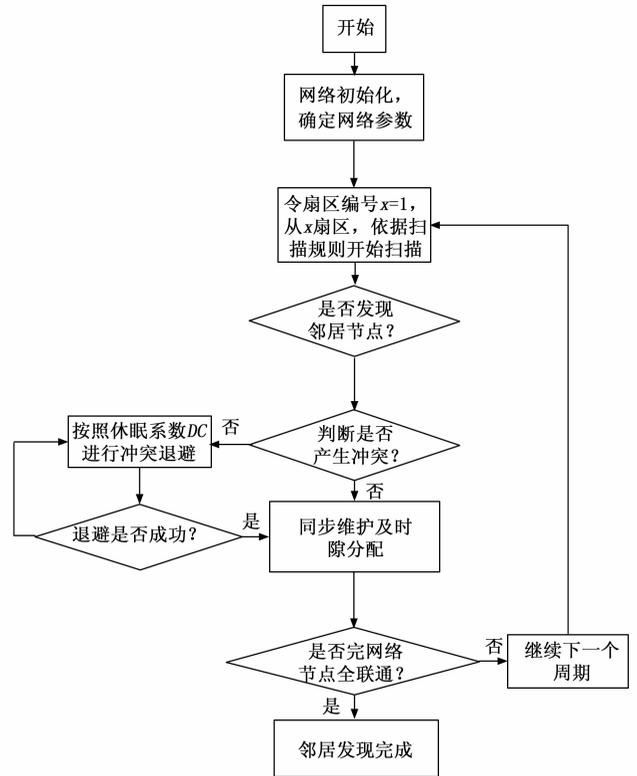


图 4 邻居发现流程示意图

2.4 基于半盲的对准策略

半盲对准是指平台可以提供一部分的辅助信息如外部授时、自身姿态、自身位置辅助天线对准。基于窄波束进行半盲对准时, 由于波束数量过多仅通过专用的邻居发现帧难以实现 (设计难点在于无法实现邻居发现帧巨大开销与过长邻居发现时间之间的平衡); 因此半盲对准基于随机发 Hello 碰撞的机制, 采用窄波束发宽波束收, 快发慢收的策略。

其基本原理是将对准策略分为两个阶段, 分别为粗捕获阶段和精对准阶段。其中粗捕获阶段要在空域内初步完成双方位置的捕获, 其基本思想是在空闲数据时隙上基于随机扫描机制, 采用窄发宽收+快发慢收策略, 占用空闲的数据时隙进行 Hello 帧的广播与回复。精对准阶段则是根据双方位置信息进行精确对准, 可通过邻居发现帧来实现。

粗捕获阶段具体流程为: 先随机发送 Hello 帧, 当有节点接收到 Hello 帧后恢复 hello 帧。粗对准阶段需要的时间主要取决于广播 Hello 帧的次数, 其影响因素主要包括宽窄波束各自的数量、空闲时隙数量以及单个空闲时隙可发送

Hello 帧数量、收发概率等因素影响。而这些因素在帧结构确定的情况下、空闲时隙数量（初始入网阶段）以及收发概率波动较小，因此对粗对准时间影响不大。要降低粗对准时间就必须从宽窄波束数量、单个空闲时隙可发送 Hello 帧数量入手；可以发现粗对准时间与宽窄波束数量成正比，与单个空闲时隙可发送 Hello 帧数量成反比。

精对准阶段：精对准阶段存在有一定的必要性：一对节点通过发 Hello 得知对方位置后，可能存在误差，通过精对准/邻居发现可以实现窄窄波束的对准；通过邻居发现阶段，一对节点能够握手确定完成了邻居发现，进而完成 R 时隙对的占用。而在精对准阶段，可判断收到 Hello 的节点号和自身节点号大小，并根据节点号大小来进行收发扫描分配，以降低随机收发引起的碰撞概率，提高对准效率。

3 仿真与分析

3.1 仿真原理及参数

使用软件基于 Linux 下的 Pycharm，利用 Python 仿真语言搭建了多节点仿真验证平台进行仿真代码实现，使用软件 Matlab 对仿真数据进行处理与分析。通过对算法的同步精度、邻居发现时间等性能指标进行优化并与 SBA-R、CA-ND 等典型协议进行性能对比，由此对本文网络同步算法性能进行验证。主要仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数名称	参数值
通信场景/km×km	500×500
节点数量/个	2~32
协议单个复帧周期/s	1
数据包大小/字节	1 000
邻居发现时隙长度/ms	10
仿真时间/s	200

3.2 邻居发现算法仿真

3.2.1 天线波束宽度对算法的影响

在定向天线构成的网络环境中，天线波束的数量对 MAC 协议的邻居发现时间具有显著影响。为了深入探究这一影响，本文通过设置不同的天线波束宽度来观察和分析其对协议性能的变化。一般而言，为确保邻居发现对准的可靠性，精同步的天线波束宽度应严格控制在 5° 以内。基于此，本文选择了 3° 作为的波束宽度，天线波束宽度设置为 4~30°。

本文算法开始后，邻居发现时间是指节点从侦听到第一个邻居控制信息分组开始，直到与所有单跳通信范围内的邻居节点成功建立链路所需的总时间。这个过程也被称为节点的接入时延。仿真设定了网络节点个数为 20。通过这种方式，我们可以更准确地评估和了解邻居发现时间的性能，进而优化网络协议和控制策略。

图 5 所示为本文提出的 FDBC-ND 算法与经典的 CA-ND 算法对比，由图观察可知，随着天线的波束宽度增大时，邻居发现的时间会逐步下降，这是由于以上算法均是

通过波束扫描的方式进行邻居发现，天线的波束宽度增大会使得扫描的次数减少，所需要的邻居发现时间也会相应减少。从图中可以看出当天线波束增大到 12° 以上时，由于后续需要进行第二次波束的精对准扫描，虽然初次波束对准较快，但是会使得二次扫描对准时间增大，且冲突节点也会增多，使得邻居发现时间反而增大。综上所述，波束宽度对本文 FDBC-ND 算法的影响是相对的。通过与 CA-ND 算法对比可知，本文算法由于采用五步扫描对准的邻居发现方式，缩短的天线的波束扫描次数，减少了波束对准的时间，相较于 CA-ND 算法本文通过引入休眠系数，当冲突节点增多时，通过调整休眠系数，有效解决冲突节点较多时邻居发现时间增大的问题，邻居发现时间小于 CA-ND 算法。本文后续仿真的天线波束宽度均采用 12° 的波束宽度。

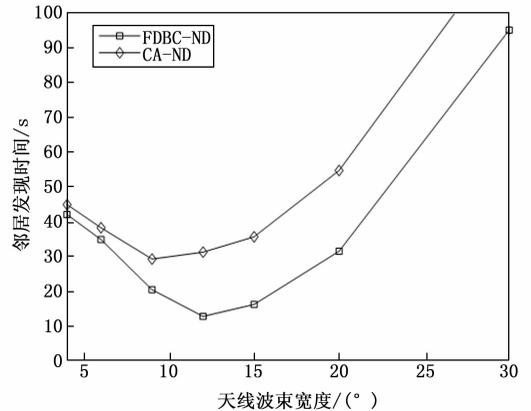


图 5 不同的天线波束宽度邻居发现时间对比

3.2.2 网络节点数量对算法的影响

在无线自组网的应用场景中，网络的节点数量对 MAC 层协议算法起到至关重要的影响。本文通过设置了不同的网络节点数，并将本文的 FDBC-ND 算法与 SBA-R、CA-ND 算法对比，通过对比来观察网络邻居发现时间的变化情况。算法设波束宽度为 12°，为 3°。网络的节点数量范围设置为 2~32。

如图 6 所示，随着网络节点数量的增多，网络平均邻居发现时间的变化情况。通过 3 种算法的对比可知，当无线自组网的网络节点增多时，由于每个节点的邻居数量增

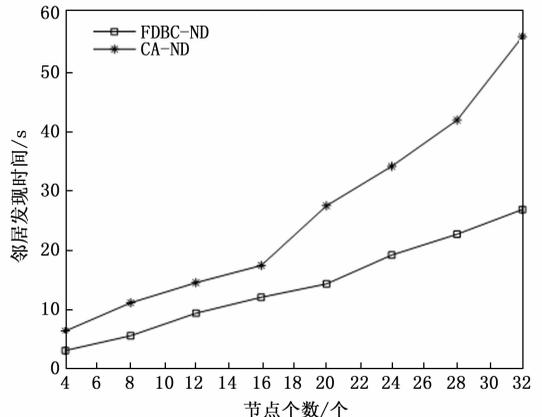


图 6 不同的网络节点数邻居发现时间对比

多, 所需要的邻居发现的时间也会随之增大。经对比可知, 由于本文提出的 FDBC-ND 算法采用五步波束对准扫描的方式, 使得扫描次数减少邻居发现时间相比于其余算法显著减少, 且算法采用引入了休眠系数的休眠退避算法, 相比于单纯的碰撞感知 CA-ND, 可以将冲突节点有效避开, 极大提升了网络产生节点冲突时的邻居发现效率, 网络平均邻居发现时间减少。

4 结束语

近年来, 随着无线自组网技术的不断探索与广泛应用, MAC 协议作为构建自组网架构的关键基石, 其研究价值日益凸显。鉴于高空环境中分布式定向自组网所呈现出的拓扑高度动态变化的特性, 本文在深入研究过程中, 特别聚焦于这一特点, 提出了一种适用于毫米波自组网的基于宽窄波束变换的定向邻居发现算法 FDBC-ND, 通过天线波束宽窄的变换, 有效解决了邻居发现困难的问题, 并通过粗对准与精对准的五步交互流程有效降低了网络的邻居发现时间。通过仿真对比分析, FDBC-ND 算法在多节点且高动态变化的场景中展现出了卓越的应用效果。该算法显著降低了网络整体的平均邻居发现时间, 从而有效提升了网络的运行效率与性能。这一结果验证了 FDBC-ND 算法在复杂动态环境下优化网络性能、加速信息交互方面的优越性。

参考文献:

- [1] 王阳坤. 密集无线自组网 MAC 层混合多址协议研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [2] RYO I, KOICHI G. Performance evaluation of wireless ad hoc network for train control system [C] //2022 5th World Symposium on Communication Engineering (WSCE), 2022: 119 - 123.
- [3] 王 静, 杨 旭, 莫亭亭. 60 GHz 无线通信研究现状和发展趋势 [J]. 信息技术, 2008 (3): 140 - 144.
- [4] GUPTA L, JAIN R, VASZKUN G. Survey of important issues in UAV communication networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18 (2): 1123 - 1152
- [5] WANG L, HAI L, LIU Z. Research and pragmatic-improvement of statistical priority-based multiple access protocol [C] // IEEE International Conference on Computer & Communications, 2017.
- [6] 谢嘉倍. 基于定向天线的无线自组网邻居发现技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [7] 雷丹丹, 刘庸民. 无线自组织网络 MAC 协议研究综述 [J]. 数字技术与应用, 2019, 37 (6): 31 - 33.
- [8] 焦立名. 多跳自组网无线网络系统研究 [J]. 舰船科学技术, 2020, 42 (8): 115 - 117.
- [9] 薛文艳. 一种无线自组织网络的路由设计与实现 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [10] YAN G B, SUN Q, HUANG J Y, et al. Helmet detection based on deep learning and random forest on UAV for power construction safety [J]. Jaciii, 2021, 25 (1): 258 - 264.
- [11] HU X, OLESEN D, KNUDSEN P. Toward high quality mag-

- netic data survey using UAV: development of a magnetic-isolated vision-based positioning system [J]. GPS Solutions, 2021, 25 (1): 1306 - 1315.
- [12] ALEJANDRO V, RITA C, RICARDO F, et al. Design and evaluation of indoor wireless ad hoc network using BATMAN adv with mobile robots [C] //2022 IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2022: 376 - 383.
- [13] OMAR H, ABOUBAKR H, ZHUANG W, et al. VeMAC: A TDMA-Based MAC protocol for reliable broadcast in VANETs [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12 (9): 1724 - 1736.
- [14] NGUYEN V D, DANG D, JANG S, et al. E-VeMAC: An enhanced vehicular MAC protocol to mitigate the exposed terminal problem [C] // 2014 16th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), IEEE, 2014.
- [15] ZOU R, LIU Z, ZHANG L, et al. A near collision free reservation based MAC protocol for VANETs [C] // IEEE, 2014: 1538 - 1543.
- [16] DAVID C Y. USAP multiple access: Dynamic resource allocation for mobile multihop multichannel wireless networking [C] // Military Communications Conference, 1999, 1: 271 - 275.
- [17] KANZAKI A, UEMKAI T, HARA T. Dynamic TDMA slot assignment in ad hoc networks [C] //Proceedings of the 17th International Conference on Advanced information Networking and Applications, 2003, 330 - 335.
- [18] CHENNIKARA J J. Gross-Layer Qos design: Overcoming Qos-unaware slot allocation [C] //Military Communications Conference, 2008: 1 - 7.
- [19] 彭革新, 谢胜利, 陈彩云. 一种基于固定 TDMA 的无冲突动态时隙分配算法 [J]. 信息安全与通信保密, 2005 (11): 115 - 120.
- [20] YOW J, LIN J. Cross-Layer QoS design: Overcoming QoS unaware slot allocation [C] // Military Communications Conference, 2008: 1 - 7.
- [21] ALSHBATAT A I, Dong L. Adaptive MAC protocol for UAV communication networks using directional antennas [C] // International Conference on Networking, IEEE, 2010.
- [22] OMAR H A, ZHUANG W, LI L. Ve-MAC: a TDMA-based MAC protocol for reliable broadcast in VANETs [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12 (9): 1724 - 1736.
- [23] LEI L, CAI S S, LUO C, et al. A dynamic TDMA-based MAC protocol with QoS guarantees for fully connected ad hoc networks [J]. Telecommunication Systems, 2015, 60 (1): 43 - 53.
- [24] XU J, ZHAO Y K, ZHANG R, et al. A load-aware dynamic TDMA protocol for terahertz wireless nano-sensor networks [C] //In proceedings of 2018 IEEE International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICIC-SP). Singapore: IEEE Press, 2018: 11 - 16.