

# 基于定向天线的飞行自组网定向路由协议综述

杨章林 谢 钧 张耕强

陆军工程大学指挥控制工程学院 南京 210001

(515982423@qq.com)

**摘 要** 近年来,以无人机为节点的飞行自组网因其在各个领域的不同应用而受到广泛关注。为满足复杂任务的服务质量需求,飞行自组网的路由需要提供足够高的网络性能。相比于基于全向天线的全向路由,基于定向天线的定向路由能提升信道利用率,扩大通信范围,可以使飞行自组网获得更好的网络性能和服务质量。文中综述了基于定向天线的飞行自组网定向路由,分析了在飞行自组网中应用定向天线的优势和所带来的问题,而后对现有单路径定向路由和多路径定向路由从定向天线控制机制、路由算法、使用场景和优缺点等多个方面进行详细介绍,并从天线类型、控制机制、网络性能和关键参数等多方面对这些路由协议进行定性比较,最后讨论了基于定向天线的飞行自组网定向路由在实际应用中和未来发展中所面临的挑战。

**关键词:** 飞行自组网;定向天线;路由协议;无人机群;服务质量

**中图法分类号** TP393

## Review of Directional Routing Protocols for Flying Ad-Hoc Networks Based on Directional Antennas

YANG Zhang-lin, XIE Jun and ZHANG Geng-qiang

Command & Control Engineering College, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210001, China

**Abstract** In recent years, flying ad-hoc networks with UAVs as nodes have received extensive attention due to their different applications in various fields. In order to meet the quality of service requirements of complex tasks, the routing of flying ad-hoc networks needs to provide sufficient network performance. Compared with omnidirectional routing based on omnidirectional antennas, directional routing based on directional antennas can improve channel utilization and communication range, which can enable flying ad-hoc networks to obtain better network performance and quality of service. In this paper, the advantages and problems brought by the application of directional antennas in flying ad-hoc networks are analyzed. Furthermore, the existing single path directional routing and multi-path directional routing are introduced in detail from the aspects of directional antenna control mechanism, routing algorithm, application scenarios, advantages and disadvantages. What's more, these routing protocols are compared qualitatively in terms of antenna types, control mechanisms, network performance, and key parameters. Finally, the challenges faced in application and future development of the directional routing are discussed.

**Keywords** Flying ad-hoc networks, Directional antennas, Routing protocol, Unmanned aerial vehicles, Quality of service

### 1 引言

得益于电子技术、信息技术、通信技术、计算机技术等一系列高新技术的迅速发展,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)以其机动灵活、成本低廉、无人驾驶等特点,在民事和军事领域得到了广泛应用。多架无人机相互协调合作可以构成多无人机系统,该系统具有自组织性好、隐蔽性强、并行性和协同性高且成本低廉等优势<sup>[1-2]</sup>,可完成实时监控、临时网络中继、航空测绘、灾害救援、农业灌溉、货物投寄、军事侦查和打击任务等复杂任务<sup>[3-5]</sup>,同时无人机系统有望成为5G网络、空地一体化网络等未来无线网络的重要组成部分<sup>[6]</sup>。

多无人机系统需要通过构建飞行自组网(Flying Ad-Hoc Networks, FANETs)来实现相互协调和配合<sup>[7-8]</sup>。飞行自组网是以无人机为节点的一种特殊的自组织网络(Ad-Hoc Networks),不需要通过固定基站等辅助设施,即可实现多无人机之间的有效通信<sup>[7,9-11]</sup>。飞行自组网与其他现存自组织网络有显著性差异,可以将飞行自组网独有的特点概括为节点移动性强、网络拓扑变化频繁、需要建立对等连接、通信距离长、网络协议复杂、性能要求高等<sup>[7]</sup>,这些显著的特点对飞行自组网的吞吐量、时延和丢包率等网络性能都造成了极大的影响。并且多无人机系统需要完成多种类型的任务,不同任务对时延、带宽、抖动、丢包等网络性能的要求不同<sup>[12]</sup>,因此最好建立高带宽、低时延、低抖动、低丢包的飞行自组网通信链路,尽可能提供更好的网络性能,以应对不同的任务。

多无人机系统需要通过构建飞行自组网(Flying Ad-Hoc

到稿日期:2021-04-19 返修日期:2021-07-28

基金项目:国家自然科学基金(61971439)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(61971439).

通信作者:谢钧(xiejun73@189.cn)

路由协议是飞行自组网通信协议研究中的一个核心问题,优秀的路由协议可以极大地提升飞行自组网的网络性能。影响路由协议设计的因素包括节点移动、天线类型、网络规模、应用场景等,其中天线类型是影响路由协议设计和飞行自组网性能的一个决定性因素<sup>[7]</sup>。无人机可携带全向和定向两种类型的天线。全向天线(Omnidirectional Antenna, OA)在水平方向上必须向全部方向均匀地辐射能量,而定向天线(Directional Antennas, DA)可仅向部分区域发送信号。无人机节点使用全向天线时,必须向所有方向辐射能量,以方便广播和邻居发现,但这会导致较多的信号冲突和较低的无线信道利用率降低,从而影响网络性能。节点使用定向天线时可以向指定方向发送数据,且通信范围通常高于全向天线,因此其可以提升空间重用性,降低网络冲突,增加网络性能,但是使用定向天线不便于广播和数据接收,会增加路由协议设计的复杂度。通常来说,在信息交互的过程中,只使用全向天线进行收发数据的路由称为全向路由,至少使用一个定向天线进行收发数据的路由称为定向路由。

近年来,已有众多研究人员对飞行自组网的路由协议设计问题进行了研究,包括通信体系结构、路由技术、路由协议分类和路由协议比较等方面。文献[1,4,7,12-26]以不同主题从众多角度对飞行自组网进行了综述,这些文献中有的专门针对路由协议进行了综述,有的将路由协议作为一个模块进行了介绍。表1对现有涉及飞行自组网路由协议的综述类

文献进行了总结,从中可以看出,现有的综述类文献虽然从多个方面对飞行自组网路由协议进行介绍,但是缺乏专门针对基于定向天线的飞行自组网定向路由的介绍。因此,本文详细讨论了基于定向天线的飞行自组网定向路由协议的设计挑战、协议分类、协议机制和协议比较。本文的贡献可概括如下:

(1)针对飞行自组网的服务质量需求,总结了相比于全向天线,在飞行自组网中应用定向天线带来的网络性能优势和服务质量提升,同时分析了引入定向挑战给路由协议设计带来的问题。

(2)将定向路由分为单路径定向路由和多路径定向路由,对每一种飞行自组网定向路由机制、特点、效果、适用场景进行了详细的介绍,并指出各种定向路由的优势和劣势。

(3)从定向天线类型、定向天线控制方式、网络性能和路径发现方式等多个方面对现有定向路由协议进行综合比较。

(4)探讨了飞行自组网定向路由协议在实际应用中和未来发展中所面临的挑战。

本文第2节明确相比于全向天线,在飞行自组网中应用定向天线的优势和所带来的问题;第3节对现有的飞行自组网定向路由的路由机制、路由应用场景、路由效果和路由优缺点等问题进行了详细的阐释;第4节从天线类型、控制机制、网络性能等多个方面对现有的定向路由进行了比较;第5节探讨了飞行自组网定向路由协议所面临的挑战与机遇;最后对全文进行了总结。

表1 现有无人机网络路由协议综述类文献总结

Table 1 Summary of literature review of existing UAV network routing protocols

文献	发表时间	主要内容
[1]	2015	将现有路由协议分为静态、主动、被动、混合、基于位置和分层路由协议6大类,并根据不同的性能标准对路由协议进行了分析和比较
[4]	2020	将路由协议分为基于拓扑路由、地理位置路由、拓扑和位置相混合路由、仿生路由4类,重点介绍了现有飞行自组网路由协议的主要特征和优缺点
[7]	2013	首次正式定义了飞行自组网,介绍了飞行自组网的应用场景、设计特性和通信协议,其中概述了当时可用于飞行自组网的路由协议和有待研究的课题
[12]	2020	主要概述了多种无人机通信网络的路由,并介绍了服务质量(Quality of Service, QoS)感知路由和支持链路稳定的服务质量路由
[13]	2013	通过比较集中式和分散两种通信体系结构的特点后,得出飞行自组网是最合适多无人机的结构,而后对数据链技术进行了综述
[14]	2014	详细讨论了飞行自组网的所面临的挑战、背景、特点、结构、网络分层模型和待解决的问题,并对静态、主动、被动和主被动混合4类路由进行了介绍
[15]	2015	介绍了静态、主动、被动和主被动混合4类路由协议中的几种经典路由协议
[16]	2016	详细分析了路由问题和现有静态、主动、被动、混合、确定性、随机、基于社交网络和节能路由的适用性
[17]	2017	介绍了高动态飞行自组网路由方案,综述了基于拓扑、基于地理位置以及拓扑和地理位置混合3种路由方案
[18]	2017	介绍了飞行自组网的通信架构并概述了静态、主动、被动、混合、基于位置和分层6大类路由协议
[19]	2017	总结了6大路由技术,详细综述了基于位置的路由协议,讨论了每种路由协议的优缺点和改进方向,并从多个方面对基于位置的路由协议进行了评估
[20]	2018	介绍了无人机路由协议设计问题,概述了基于概率簇和基于确定性簇的两类簇路由,最后从突出功能、性能度量、特征等方面对路由协议进行了比较
[21]	2018	概述了飞行自组网及其路由协议,重点介绍了基于地理位置的无状态路由算法,并对其进行了性能评估
[22]	2018	分析了现存的单跳路由、多跳路由、基于拓扑的路由和基于位置的路由,并做简要的比较
[23]	2019	介绍了设计无人机网络需要考虑的因素和无人机网络体系结构和通信,讨论了多种无人机网络路由设计技术,对无人机网络中多种路由进行了介绍和比较
[24]	2019	介绍了飞行自组网路由协议的演变和进展,着重从单路径和多路径两个方面对众多路由协议进行了深入研究,分析了路由协议的优缺点
[25]	2019	总结了12种路由技术,将现有协议分为9类并做了较为全面且完整的综述,而后进行了简要的比较
[26]	2020	讨论了现有路由方案的目标、挑战、路由度量、特征和性能衡量标准,并从自适应、主动、被动和主被动混合4种路由方案对现有路由协议进行了综述

## 2 飞行自组网中应用定向天线的优势和问题

无人机的速度可超过 400 km/h<sup>[7]</sup>, 远超传统自组网节点的移动速度, 这导致以无人机为节点的飞行自组网对路由协议的设计要求超出了传统自组网对路由协议的设计要求。飞行自组网在众多领域都有所应用, 其路由协议的设计需要考虑不同应用领域数据流量的特点和对 QoS 的要求。比如, 在交通、环境遥测数据监控等应用中的实时监测数据流量要求低延迟、低带宽和中等抖动; 在环境和军事监视图像等应用中的存储转发数据流要求高延迟、高抖动和高带宽; 无人机与无人机之间和地面控制中心或者卫星与无人机之间的指挥和控制数据要求低延迟、低带宽和低抖动<sup>[16]</sup>。因此, 为飞行自组网设计的路由协议的可靠性越高越好、数据分组丢失的概率越低越好、开销越小越好、端到端延迟越低越好、吞吐量越大越好。

飞行自组网在无线环境通常需要进行多跳传输, 无线信道属于共享媒介, 需要通过天线进行数据收发, 天线类型有全向天线和定向天线两种。使用全向天线进行通信, 会大大增加由多节点竞争无线信道造成的信号冲突概率, 从而导致实际带宽容量常常远低于理论最大带宽。相比于全向天线, 定向天线有以下两个优势: 一是相同功率下, 定向天线的传播范围更远, 信号质量更好<sup>[27]</sup>; 二是定向天线具有方向性, 可以提高空间重用性, 降低冲突概率, 提升信道利用率, 进而提升网络性能<sup>[27]</sup>。为定量探讨使用定向天线与全向天线对自组织网络的影响, 文献<sup>[28]</sup>统计了在 1000 m × 1000 m 范围的空间内, 节点传输范围都为 1000 m 时, 配备不同主波束角天线的无人机群可同时工作的最大数量, 其统计结果如图 1 所示。

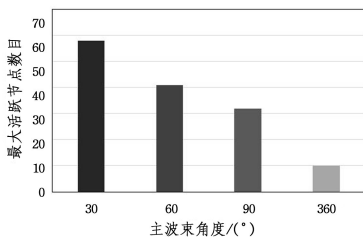


图 1 不同主波束角情况下的无人机最大活跃个数

Fig. 1 Maximum active number of UAV under different main beam angles

结果显示, 当节点使用主波束角分别为 30°, 60° 和 90° 的定向天线时, 网络中可同时最大活跃个数分别约为使用全向天线的 6 倍、4 倍和 3 倍。这表明定向天线可以通过提升空间重用性, 成倍地提升无人机最大活跃个数, 进而提升飞行自组网的信道利用率和容量。因此, 定向天线可以给飞行自组网带来更好的网络性能, 更符合如今复杂多变的任务的服务质量需求。

在无人机上配置定向天线虽然可以显著提升网络性能, 但同时也给飞行自组网带来极具挑战的定向天线控制问题<sup>[29]</sup>。定向天线通信需要两个定向天线主波束对准, 一旦两个天线没有对准, 则会导致数据传输失败, 如此一来, 不仅不会提升网络性能, 反而会致使网络拥塞。另外, 仅简单地使用定向天线进行通信并不一定能充分发挥定向天线的优势, 想要得到最优的数据传输总速率, 还需要设置适当的定向天线

的方向性参数和角度参数<sup>[30]</sup>。因此, 定向天线的引入给飞行自组网路由协议带来了如下问题。

(1) 定向天线的朝向控制问题。两个定向天线间进行通信时必须相互对准, 而无人机具有高移动性, 位置在时刻发生变化, 定向天线想要相互对准难度很大。发送节点不知道应该控制定向天线朝向何处, 接收节点也不知道数据会从哪个方向来。即使发送节点在这一时刻的波束能覆盖接收节点, 但是两个无人机都在高速移动, 很有可能下一时刻接收节点会移动出发送节点的波束覆盖范围。若无法很好地解决定向天线朝向控制问题, 不能让发送节点和接收节点的定向天线时刻对准, 那么两个节点将无法通信, 更勿论发挥定向天线的优势提升网络性能, 因此定向天线的朝向控制是使用定向天线的关键性问题。

(2) 定向天线的广播效率和邻居发现问题。定向天线采用定向传输, 虽然可以传输得更远, 但在执行邻域广播时不得不在多个方向上顺序发射波束进行扫描, 而扫描会增加延迟和开销; 且定向天线接收广播数据时只能接收当前朝向的广播数据, 会丢失来自其他方向的数据, 这将导致定向天线的广播效率大大降低。而飞行自组网拓扑频繁变化, 需要经常广播消息以进行邻居发现, 若广播效率低下, 无法进行邻居发现, 将会对路由协议的性能产生严重影响, 因此广播效率和邻居发现是应用定向天线必须要解决的问题。

(3) 定向天线的角度控制问题。定向天线的主波束角度影响着定向天线的传输距离和覆盖范围。如果主波束角度小, 传输距离远, 传输效率提升, 则可能会降低跳数, 减少时延, 但此时波瓣较窄, 覆盖范围较小, 可能难以覆盖到接收节点, 或者接收节点很快移出覆盖范围, 导致链路质量下降甚至路由失败; 如果主波束角度大, 波瓣较宽, 覆盖范围大, 可能容易覆盖到接收节点, 使链路质量提升, 但传输距离会变短, 导致传输效率下降, 空间重用性降低, 影响定向天线的性能发挥, 因此定向天线的角度选择同样是一个需要考虑的问题。

## 3 飞行自组网定向路由

定向天线按照波束类型可以分为单波束定向天线和多波束定向天线。单波束定向天线只有一个波束, 仅当处于波束范围内才可以接收和发送数据, 超出波束范围将无法通信; 多波束定向天线可无干扰地在多个方向上发送和接收数据。基于单波束定向天线的路由多为单路径定向路由, 基于多波束定向天线的路由多为多路径定向路由。

### 3.1 单路径定向路由

高效按需定向路由协议 (Directional Routing Protocol, DRP)<sup>[31]</sup>; Gossain 等<sup>[31]</sup>受源动态路由 (DSR)<sup>[23, 32]</sup> 的启发, 提出了基于定向天线的按需定向路由协议 DRP, 该协议具有高效的路由发现机制、定向路由表和定向邻居表的建立和维护机制以及新颖的路由修复机制。他们通过 NS2 设计实现了可切换波束的自适应定向天线阵列模块, 当波束角度为 360° 时处于全向天线模式, 其余时间处于定向天线模式, 相当于节点既有全向天线又有定向天线, 但是二者不能同时工作, 且定向天线同时只有一个波束可以收发数据。仅在节点空闲时天线处于全向模式下, 检测到信号时可切换到指向检测到信号

最强方向的定向波束。其余时刻皆处于定向模式下。

DRP 需要广播数据包时默认使用定向天线以扫描方式进行广播,在进行路由发现时,为减小路由发现开销和降低路由发现时延,DRP 在收到第一个 RREQ 时会等待一段时间,并记录所有接收到 RREQ 的波束 ID,而后使用定向天线向没有接收到 RREQ 的波束依次发送 RREQ。在进行路由发现时,还会建立定向邻居表(DNT),由于 DRP 要求网卡打开混杂模式,以便于可以接收和处理所有收到的数据包,因此 DNT 的建立和维护除了可以利用 RREQ 和 RREP 的信息,还可以使用 MAC 层接收到的数据包信息。DNT 由 MAC 层和路由层共享,保存具体到波束的定向邻居。发现的路径存储在定向路由表(DRT)中,DRT 位于路由层,以维护到不同目的地的路由信息。

DRP 路由维护有 3 个阶段。当连续 3 次传输失败后,进入位置跟踪阶段,即在相邻波束进行尝试发现下一跳节点的位置,所扫描的波束数根据波束宽度而定。若未发现下一跳节点则进入两跳定向恢复阶段,即断裂链路的上游节点从数据包中识别下一跳节点的下一跳节点,并以其为目的节点发送 RREQ 进行路由发现。如果路由发现失败则进入第三阶段(区域路由修复阶段),该阶段源节点通过波束信息估计目的节点的相对位置区域,而后向相对位置区域发送 RREQ,如果区域路由修复仍然失败,则源节点按照路由发现策略重新进行路由发现。

Gossain 等从路由发现和路由维护两个角度对 DRP 的性能进行了评估,与 DDSR<sup>[33]</sup> 和 DSR 相比,DRP 不论是在路由发现时延、路由控制开销、吞吐量,还是在包投递率、平均路由开销和平均端到端延迟上都有较大优势。然而,DRP 缺乏节点位置更新机制,在节点移动性低的情况下问题并不突出,但一旦移动速度过高,链路便可能会频繁断裂,从而导致频繁的路由恢复,影响协议性能。此外 DRP 必须配合特定的 MAC 层协议 MDA<sup>[34]</sup>,MDA 对经典的 IEEE802.11 协议进行了修改,这将影响 DRP 的适用性。

稳健可靠预测路由(RARP)<sup>[35]</sup>;Gankhuyag 等<sup>[35]</sup> 针对飞行自组网的高动态性,对按需平面距离向量路由协议(AODV)<sup>[32,36]</sup> 进行改进,提出了具有最小连接时间预测、路径选择效用函数、更新机制的定向传输、动态角度调整、备用链路建立、本地路径修复六大特性的 RARP 协议。RARP 假设无人机节点配置定向天线和全向天线两种天线,二者皆可接收和发送数据,其中全向天线主要用于广播和邻居发现,也是保证数据传输可靠性的最终方法。RARP 假设每架无人机都有三维地理位置、速度和飞行风险信息,其中飞行风险的含义是无人机的失效概率,考虑了两类参数,一是无人机的具体参数,包括大小、任务更新、操作要求、导航技能和剩余能量等;二是与地理位置有关的参数,包括地形结构和环境条件等。飞行风险越小,无人机越不容易发生故障。RARP 为了实现众多独有的特性,在包括控制数据包和负载数据包在内的所有数据包中都加入了自身节点的位置和速度信息。

RARP 认为节点在彼此的通信范围内即可进行双向通信,超出通信范围便无法通信。预计连接持续时间是指节点根据接收到数据包中的速度和位置信息按照最坏情况估计出

两个节点的最小可通信时长,最小可通信时长即为预期的连接持续时间,预期连接持续时间越长,路由寿命越长。由于所有数据包都携带速度和位置信息,因此每接收到一个数据包即可更新一次预期连接时间,这不仅有助于适应飞行自组网的高动态性,而且还可以确定备用链路的建立时间,在路径预期连接持续时间到期前,主动进行路由发现,建立一条备用路由。由于有数据包持续发送,知道目的节点的大致位置,因此可以进行区域路由发现,提高路由发现的效率,尽快建立备份路由。RARP 认为选用连接持续数据长的链路可以提高路由寿命,跳数少的路径优于跳数多的路径,飞行风险小的无人机更不容易发生故障,最小预期连接时间、跳数和无人机飞行风险 3 个因素加权构成效用函数,RARP 根据效用函数选择最终用于通信的链路。

RARP 向 RREQ 分组中添加了路径的最小预期连接时间、最大风险值和发送节点的位置及速度信息。接收到 RREQ 的节点据此可以得到发送节点的位置和速度信息以及链路质量信息,并将此信息保存在反向路由表中,当需要向发送节点发送数据时,接收节点根据反向表中的速度、位置信息和时间差估计出发送节点的位置,而后接收节点控制定向天线指向该位置即可发送数据。由于所有数据包都携带这些信息,因此通信节点间可频繁更新路由表中的信息,大大提高了位置估计的准确率。当位置估计失败后,RARP 启动动态角度切换机制来尝试使用定向天线寻找节点位置。位置估计失败会出现两种问题,分别为远节点问题和近节点问题。每当发送节点和接收节点之间的距离接近定向天线当前角度值提供的最大传输范围时,就会出现远无人机问题,此时 RARP 会减小定向天线角度以增加最大传输范围;当选定的接收节点靠近发射节点并且定向天线角度较小时,就会发生近无人机问题,此时 RARP 会调大定向天线角度以增加覆盖范围<sup>[35]</sup>。如果使用定向天线进行路由修复没有成功,则会切换到全向天线进行本地路由修复,即使用全向天线广播当前数据包以期能接收到 ACK,如果本地路由修复失败,则会返回路由错误消息,由源节点重新进行路由发现。

Gankhuyag 等<sup>[35]</sup> 通过仿真实验比较了 RARP 和 AODV 的路由性能。结果表明,RARP 在路径平均寿命、路由建立成功率、服务中断时间、端到端时延、平均时延、吞吐量和数据传递率等方面均优于 AODV。此外,RARP 还可用于灾后行动,如搜索和救援,以及远程无人机通信。然而,RARP 没有考虑能源效率和计算开销,这对于能量容量较低的无人机来说可能是一个问题。同时所有数据包都携带控制消息,节点每接收到一个数据包就要更新许多信息,这虽然有助于适应频繁变化的拓扑,但会带来大量的控制开销和占用较多的计算资源。

自适应位置感知定向路由(ALAR-DA)<sup>[37]</sup>;Noguchi 等<sup>[37]</sup> 受具有请求区域动态适应的位置感知路由(LAR-DAR)<sup>[38]</sup> 和定向天线多径辅助定位路由(DA-MLAR)<sup>[39]</sup> 的启发,对位置辅助路由(LAR)<sup>[40]</sup> 的路由发现请求区域算法进行改进,提出了同时具有自适应机制和定向天线的位置感知路由 ALAR-DA。ALAR-DA 的主要思想是通过定向天线来缩小洪泛的区域,从而减少洪泛开销。ALAR-DA 中节点根据

邻居节点数目调整洪泛 RREQ 泪滴形区域,同时定向天线可以防止洪泛区的节点接收不必要的 RREQ。

LAR 在路由发现时会形成两个区域:请求区域和预期区域。如图 2 所示,预期区域为以目的节点  $D$  的位置为圆心、以时间差  $(t_1 + t_0)$  乘以目的节点速度  $v$  所得值为半径的圆。请求区域是包括源节点  $S$  和预期区域的矩形区域,只有在请求区域的节点收到来自  $S$  到  $D$  的 RREQ 才会对其进行转发,其余节点会直接丢弃来自  $S$  到  $D$  的 RREQ。当请求区域无法构建路径时,会扩大请求区重复该过程。

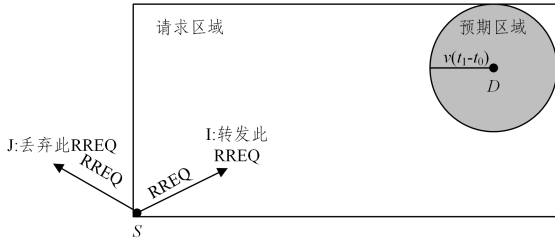


图 2 LAR 请求区域与预期区域

Fig. 2 Request zone and expected zone of LAR

ALAR-DA 为了减少洪泛开销,对 LAR 的请求区域和期望区域进行了改进,如图 3 所示,将请求区域缩减为泪滴形请求区域,并且改变了 LAR 预期区域的半径计算方法。当时间差过小或者节点移动速度过慢时,LAR 的预期区域将会很小,即 ALAR-DA 的泪滴形请求区域很小,而该区域很小则很容易导致路由发现失败。因此,为提高路由发现的成功率,ALAR-DA 预期区域半径  $r_0$  将根据定向天线传输范围、定向天线辐射角度和发送节点邻居数目而定,其计算方法如式(1)<sup>[37]</sup>所示。

$$r_0 = R \times \frac{360}{n \cdot \theta} \quad (1)$$

其中, $R$  为定向天线传输范围, $n$  为发送节点邻居数目, $\theta$  为定向天线辐射角度, $\theta$  固定不变。每当路由发现失败后,ALAR-DA 会将  $r_0$  扩大一倍重新进行路由发现。

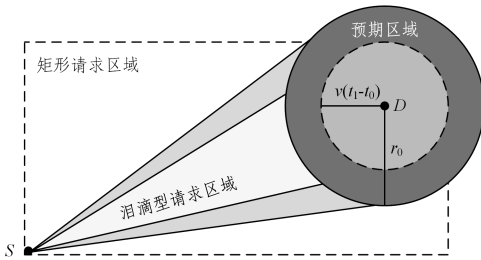


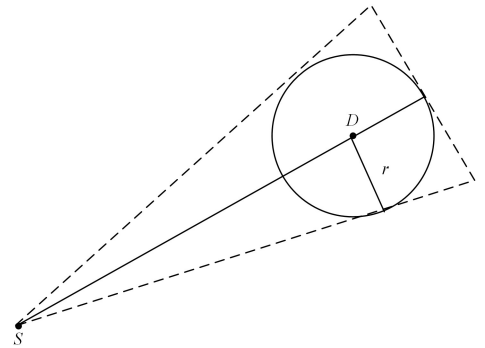
图 3 ALAR-DA 的泪滴形请求区域和预期区域

Fig. 3 Teardrop shaped request zone and expected zone of ALAR-DA

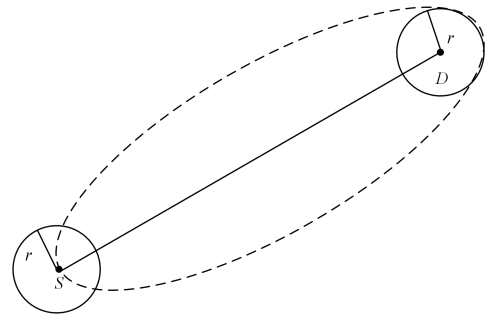
ALAR-DA 与 LAR, DA-MLAR 和 LARDAR 相比,在路由协议开销和时延方面有一定的优势,但不适用于高动态网络,且路由请求区域有可能大于原来区域,导致更大的开销。此外 ALAR-DA 假设目的节点位置已知,在目的节点位置未知的情况下需要使用其他方法获取目的节点位置,而这本身就很有难度。

如图 4 所示,除了 ALAR-DA 泪滴形的请求区域,还有基

于定向天线的三角形和椭圆形的请求区域,其基本思想与泪滴形请求区域一致,都是通过减少路由请求区域从而减少路由洪泛开销。Jayasree 等<sup>[41]</sup>通过实验对矩形、泪滴形、三角形、椭圆形几种请求区域在路由开销方面进行比较。4 种请求区域的路由开销都远小于不限制区域的控制开销,其中泪滴形的路由控制开销最小,而椭圆形请求区域可实现以较小开销达到矩形区域的性能。此外,Jayasree 等还对比了使用定向天线和全向天线用于数据通信的网络情况,实验表明,使用定向天线可以明显减少数据包冲突、干扰量、延迟和冗余分组传输,从而提供比全向天线更好的性能<sup>[41]</sup>。



(a) 三角形请求区域



(b) 椭圆形请求区域

图 4 ALAR-DA 其他优化形状的请求区域

Fig. 4 ALAR-DA request zone for other optimized shapes

基于多定向天线的自适应方向控制无人机中继网准静态路由<sup>[42]</sup>(MDA-ADCFQS): Matsuda 等<sup>[42]</sup>针对具有线性拓扑的无人机中继网络,提出了一种基于多定向天线的自适应方向控制全双工准静态路由,简称为 MDA-ADCFQS,其可实现高吞吐量无人机中继网。MDA-ADCFQS 的特点是低复杂度、全双工、自适应和低开销。为了降低高增益定向天线计算复杂性使 MDA-ADCFQS 适用于低计算能力的小型无人机,其使用了 4 个如微带贴片天线<sup>[43]</sup>的低成本模拟天线设备,通过自适应旋转无人机本身而非复杂的信号处理和计算来调整定向天线的辐射方向以及降低自干扰。无人机节点上天线的安置方式如图 5 所示,4 个天线以相邻两个定向天线间的夹角为  $90^\circ$  的方式均匀放置。为了提高无人机中继网的吞吐量,协议采用多天线实现全双工的方式进行传输,所谓全双工即每个无人机节点都可以在同频上同时发送和接收。虽然每一个定向天线还是采取半双工的工作方式,即同一时刻只能接收或者发送,但是可以采取一个定向天线接收,另一个定向天线发送的方式实现整体的同时接收和发送。这样的实现方式会引入较高的自干扰,因此 MDA-ADCFQS 除了需要应对外

界干扰外还需要应对自干扰。

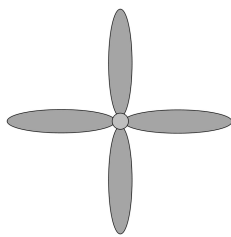


图5 4个微带贴片定向天线的装配方式

Fig. 5 Assembly method of four microstrip patch DA

MDA-ADCFQS 应对自干扰的方式不是通过复杂的信号处理方式消除,而是通过旋转无人机采用不同的中继方式来减轻自干扰。MDA-ADCFQS 有直中继和正交中继两种中继方式。如图 6(a)所示,直中继是将两个相位相反的定向天线分别作为发送天线和接收天线进行数据传输;如图 6(b)所示,正交中继则是将两个相邻的定向天线分别作为发送天线和接收天线进行数据传输。这两种中继方式可通过旋转无人机的方式进行切换。

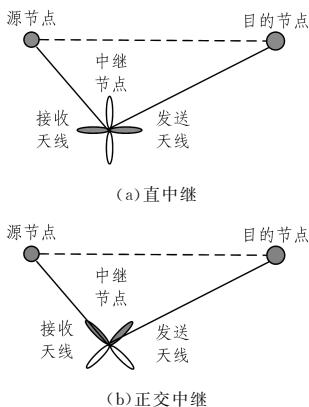


图6 MDA-ADCFQS 的两种中继方式

Fig. 6 Two relay modes of MDA-ADCFQS

Matsuda 等通过图 7 所示的简单两跳中继网分析了不同条件下两种中继方式对吞吐量的影响。其中  $L$  表示源节点和目的节点之间的距离,  $d$  ( $d < L$ ) 表示中继节点到源节点和目的节点之间的线路的距离,  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) 表示源节点和目的节点之间中继节点的相对位置,  $\theta_{BW}$  表示定向天线的波束宽度。实验发现,在参数  $d$  和  $\theta_{BW}$  之间存在一个切换点,当两个参数大于某值时,正交中继方式的吞吐量将会大于直中继的吞吐量;参数  $\alpha$  和  $d/L$  之间也存在一个切换点,当二者大于某值时,正交中继方式的吞吐量将会大于直中继的吞吐量。据此 Matsuda 等设计了自适应方向控制的准静态路由。

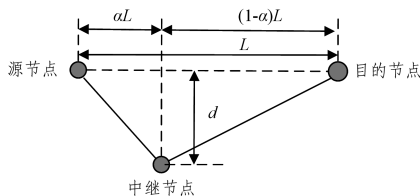


图7 两跳中继网

Fig. 7 Two hop relay network

控制阶段持续时间的情况,这种情况下网络不用频繁地交换控制消息,进行控制报文交换需要相隔较长的时间,大部分时间都用于数据交换。因此准静态路由分为控制和数据交换两个阶段。控制阶段会通过控制报文更新中继无人机的位置和状态,然后中继节点根据所接收到邻居节点的位置和状态参照预先定义的中继表自适应选择合适的中继方式。如此即可实现低复杂度、低开销的具有自适应方向控制的准静态路由。

MDA-ADCFQS 通过简单的旋转无人机实现定向天线朝向控制,以较低的计算开销和控制开销获得了较高的无人机中继网性能,但该方案仅适用于无人机移动性很低的简单线性中继网,难以胜任网状拓扑,适用性有限。

### 3.2 多路径定向路由

火山路由 (Volcano Routing)<sup>[44]</sup>; Toorchi 等<sup>[44]</sup> 基于多波束定向天线 (MBDA) 提出了一种具有“空洞”避免的多管道高吞吐量的路由协议,该协议可充分利用多波束定向天线的并发分组调度能力来实现高吞吐量的数据传输。由于该协议的拓扑结果类似于火山熔岩的流动,因此被称为火山路由。

多波束定向天线具有多个定向波束,且各个波束互不干扰,所有波束可覆盖各个方向,每个波束都可以接收或者发送数据,但是同一时刻,所有波束要么同时处于接收模式 (Rx), 要么同时处于发送模式 (Tx)。因此使用多波束定向天线的网络必然导致相邻节点间接收模式和发送模式交替出现,如图 8(a) 所示。火山路由将多波束定向天线均分为图 8(b) 所示的 16 个虚拟波束扇区,相当于 16 波束定向天线,并均分为 4 组,其分组索引用  $G$  表示 ( $G=1, 2, 3, 4$ )。火山路由将任何通信质量极差的网络区域称为“空洞”,通过分组投递率和接收信号强度估计将节点分为 3 种状态:在空洞内的节点处于阻塞状态,至少有一个邻居处于阻塞状态的节点称为边界节点,传输范围内没有邻居阻塞的节点处于正常状态<sup>[44]</sup>。火山路由要求节点保存两跳邻居表,且需要具体到扇区,通过单独实现的 MAC 协议保证收发模式定向交替出现。

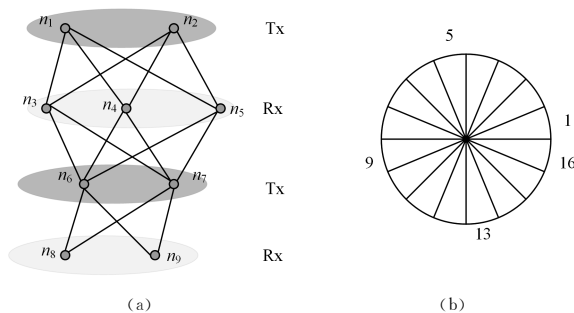


图8 多波束定向天线的特性

Fig. 8 Characteristics of multibeam DA

火山路由由主路径搜索、火山路由建立和数据转发 3 个阶段组成。主路径搜索阶段需要通过广播修改的 RREQ 得到一组到目的节点的候选主路径和栅栏状管道。管道由主路径和副路径组成,主路径主要由主节点组成,副路径由主节点和位于左右两侧的两个副节点相互连接而成,本节管道主节点与边节点和上一节管道主节点与边节点两两相互连接,同时也和下一节管道主节点与边节点两两连接,组成栅栏状管道,如图 9 所示,粗线为主路径,细线为副路径,主路径和副路

准静态路由适用于数据交换阶段的持续时间远长于数据

径交错形成栅栏状管道<sup>[44]</sup>。由于节点保存的是两跳邻居表,因此在确定了下一跳主节点后,下一跳主节点即可从自己的两跳邻居表中找到符合构建栅栏要求的本跳左右两个边节点。接收到 RREQ 的节点需要更新 3 个参数:表示管道强度的栅栏系数(FF)、指示节点周围是否存在空洞的绕行指数(Detour)和表示源节点扇区组号的分组索引(G)<sup>[44]</sup>。为选择主节点,火山路由设计了一个主路径选择分级计分系统(HSS),HSS 根据绕行指数 Detour、分组索引 G 以及管道强度 FF 得出。

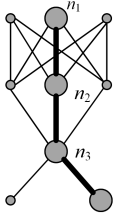


图9 栅栏状管道  
Fig. 9 Fence pipe

在火山路由建立阶段,目的节点会在接收到第一个 RREQ 后继续接收一定时间内到达的 RREQ,而后根据分组索引将接收到的 RREQ 分组,对每组都做如下操作:选取具有最低 FF 的路径作为最佳主路径,设其跳数为  $H$ ,从其他主路径中选取跳数同样为  $H$  且与最佳主路径重合节点不超过  $1/3$  的主路径作为备用路径。目的节点最多选取 4 条主路径,而后向所选择的主路径回复 RREP 建立管道,源节点接收到 RREP 开始进入数据转发阶段。为提高多条路径的数据转发效率,Toorchir 等提出了随机转发、过期预测和概率转发 3 种转发策略<sup>[44]</sup>,其中随机转发策略导致数据包排队的概率较大,而过期预测与概率转发两种策略均可降低数据包排队概率。当管道断裂或者出现瓶颈时,火山路由首先启动本地修复,由路径断裂处的上游节点在自身的两跳路由表中搜索替代节点。若本地修复失败,则上游节点向源节点发送 RERR 报文,源节点收到 RERR 报文后将启动全局修复,重新进行主路径发现阶段来发现主路径,以替换断裂管道。

仿真实验表明,与多路径 DSR(MPDSR)相比,火山路由在路径搜索能力、路由建立性能、数据转发性能和数据传输吞吐量方面都有极大提升,同时火山路由还具有绕开“空洞”的特性。但是火山路由需要两跳邻居表,导致协议开销明显增大。火山路由需要特定的 MAC 协议保证多波束定向天线处于相对应的收发模式,并不适用于通用 MAC 协议。火山路由适用于低移动性、超高吞吐量要求的传输场景,不适用于高移动性的场景。

基于多波束定向天线增强型 OLSR<sup>[45]</sup>(MBDA-EOLSR):Zhang 等<sup>[45]</sup>基于多波束定向天线结合社会网络概念的创新方法,针对要求低检测概率(LPD)的军事应用,提出了多路径增强型优化链路状态协议,简记为 MBDA-EOLSR。MBDA-EOLSR 利用多波束定向天线的多波束传输优点,实现了具有 LPD 感知的邻居发现机制、基于社会网络度中心

性<sup>[46]</sup>和介数中心性<sup>[47]</sup>概念的 MPR 选择机制、基于译码误码率的功率控制方案和减小跳数的捷径算法。

基本的 OLSR 协议假设节点使用全向天线,通过周期性广播 HELLO 消息得到一跳邻居节点和两跳邻居节点列表,并在一跳邻居列表中选择部分节点作为多跳中继节点(MPR),源节点可以通过 MPR 和两跳内的所有节点通信。OLSR 定期向邻居广播 HELLO 消息进行邻居发现和邻居检测,并定期通过 MPR 向全网广播拓扑控制消息用于构建和更新全网拓扑。MBDA-EOLSR 基于多波束定向天线首先对 OLSR 的邻居发现机制进行了改进,提出了具有波束扫描和功率递增两步 LPD 感知的邻居发现机制。为了更好地利用多波束定向天线优势,避免冲突和耳聋问题,MBDA-EOLSR 需要基于时分多址(TDMA)定义好每个节点的收发时间表,而节点通过该表可知其他节点何时处于接收模式,何时处于发送模式。在波束扫描步骤中,为避免被对手发现,源节点按照时间表使用多波束定向天线进行扫描,初始时扫描功率较低。处于监听阶段的节点打开所有波束,收到邻居发现信息后根据时间表回复 ACK,源节点收到 ACK 后再根据时间表回复确认消息,经过三次握手,得到邻居信息。在完成所有波束扫描后进入功率增强阶段,此阶段根据扫描步骤获得的网络节点状态信息增加功率,如果有敌方的信息被反馈,则可根据文献[48]直接将节点的扫描功率增加至最大总发射功率级别;若没有敌方信息被反馈,发送方应该使用默认功率增量级别开始新一轮的扫描,默认功率增量可以自行设计。两个步骤反复进行,直到找到足够数量的邻居,则停止增加发送功率级别。LPD 感知的邻居发现机制可以避免类似于全向天线的盲目搜索,大大降低了被敌机发现的概率,同时功率渐增和使用多波束定向天线限制搜索区域都可降低被敌机检测到的概率,有助于 LPD 通信。

在通过邻居发现机制获得一跳邻居表和两跳邻居表后,MBDA-EOLSR 通过基于社会网络度中心性和介数中心性概念的 MPR 选择机制从一跳邻居中选择 MPR,一般来讲,MPR 越少,路由协议越好。MBDA-EOLSR 根据度中心性和介数中心性来衡量节点对网络连通性的重要程度,度中心性的计算方式为节点的邻居数量<sup>[47]</sup>,而介数中心性的计算方式为经过该邻居节点的连接数占所有源节点到两跳邻居连接数的比例<sup>[45]</sup>。度中心性和介数中心性越大,表示该节点越重要。因此 MBDA-EOLDR 首先根据源节点的一跳邻居表和两跳邻居表,分别计算出邻居节点的度和介数,而后选择超过预设阈值的节点,并根据 MBDA 的波束数目选择出 MPR。然后,为降低被敌机发现的概率,更好地支持 LPD,一个时段只用一个 MDBA 的波束通告和更新链路状态。为了降低译码误码率,节点的发射和接收功率不能太低,而为了实现 LPD,发射功率也不能太大。因此 Zhang 等<sup>[45]</sup>根据译码误码率和 LPD 设计了功率控制方案,在该方案中,每个节点根据自己的链路状态和被敌机检测的概率计算该节点发射、接收功率的上下限,实现译码误码率和被检测概率的平衡。

由于协议保存全网拓扑和链路状态信息,因此可以根据最低译码误码率和低检测概率选择一条最佳路径,可以改变功率和传输方向并利用多波束建立多条辅助路径,从而建立多条路径。当节点侦测到敌机靠近或者敌方检测变强时,切换到低检测概率的辅助路径能够降低被发现的概率,当节点侦测到敌机离开或者敌方检测强度变弱时,则启动捷径算法,从目的节点逐个检查路径中的每个节点,尝试增加功率和改变方向,以寻找跳数更小的路径,提升网络性能。

仿真结果表明,与传统的 OLSR 协议相比,在不超过 40% 的敌对检测强度中,MBDA-EOLSR 的网络吞吐量、时延和丢包率都有优势。但是 MBDA-EOLSR 的协议开销和计算开销远大于 OLSR,而且需要对 MAC 协议进行一定的修改。此外,为了获得更好的 LPD,牺牲了邻居发现效率和链路更新效率,因此其适用于对 LPD 有独特要求的小规模高密度的动态网络场景。

#### 4 飞行自组网定向路由比较

飞行自组网自身的高动态性与定向天线的有向性相结合,给飞行自组网路由协议设计带来众多问题。在解决定向天线与无人机节点相融合的问题时,不同的研究者结合特定场景提出了不同的定向路由方案。针对拥有网络规模、节点密度和拓扑类型的网络场景,这些定向路由方案在定向天线类型选择、定向天线控制、邻居发现和路径发现上都有所区别,同时根据应用需求不同,定向路由方案在吞吐量、延时、开销等公共参数方面有不同侧重。

与全向天线相比,定向天线具有空间重用性高、传输距离远、吞吐量大等优点<sup>[49]</sup>,这些优点使得定向路由在性能方面优于全向路由。表 2 对比了定向路由与全向路由的网络性能,可以看到定向路由相比于全向路由可以明显降低网络冲突,提升网络性能,特别是在丢包率、跳数( $H$ )、吞吐量( $T$ )、包递送率(PDR)和端到端时延(EED)方面。然而,控制定向天线必须引入定向天线控制信息,因此定向路由的控制开销通常大于全向路由。但当目的节点的位置固定且已知时,定向路由可以在特定区域进行路由发现,在网络性能得到提升的同时,其控制开销反而可以小于全向路由。

表 2 定向路由与全向路由的性能比较

Table 2 Performance comparison between directional routing and omnidirectional routing

定向路由 VS 全向路由	丢包率	跳数	吞吐量	包递送率	路由开销	平均端到端时延
DRP VS DSR	低	少	高	低	高	低
DDSR VS DSR	低	少	高	高	高	低
RARP VS AODV	低	少	高	高	高	低
ALAR_DA VS LAR	低	少	高	高	低	低

表 3 总结了定向路由协议在定向天线类型、定向天线控制、邻居发现、路径发现、是否支持低检测概率(LPD)、仿真工具和网络类型等协议设计方面的异同。定向天线可以分为单波束定向天线和多波束定向天线两类。使用单波束定向天线的网络常为单路径路由,使用多波束定向天线的网络多为多路径路由。单波束定向天线存在无法接收来自非波束覆盖方向的信号,因此一般情况下单波束定向天线多与全向天线配合使用。DRP 的全向天线用于在节点空闲时监听信道,而 RARP 协议使用全向天线进行广播和邻居发现。特定场景下协议也可以仅使用定向天线,如 ALAR\_DA 仅向位置固定且已知的地面基站发送数据,只需定向天线朝向地面基站进行路由发现即可,再比如 MDA-ADCFQS 是准静态路由,线性拓扑,每个节点只有前后两个邻居,且节点移动性很小,邻居位置基本固定,因此只需向原来方向广播即可。多波束定向天线可以接收来自多个方向的信号,不再需要全向天线进行辅助,而且多波束定向天线具有多个方向的互不干扰波束,很适合构建多路径路由。单波束定向天线的朝向控制一般使用位置预测技术,通过相对速度和位置预测预测出下个时刻的位置。MDA-ADCFQS 协议创新性地提出了通过无人机选择来调整定向天线的方向,可以减少信号处理和计算复杂度。基于定向天线的路由协议波束角一般为固定值,很少在运行过程中变化,但 RARP 协议提出了自适应角度动态调整机制,可以在一定程度上弥补位置预测的误差。定向路由多为被动式路由协议,按需发现路径,因为在高动态网络中,相比于主动式路由,被动式路由可以极大减少路由开销,但 MBDA-EOLSR 为了支持低检测概率(LPD),使用了主动式路由策略,主动进行波束扫描,定期维护拓扑,以便尽快检测出敌机。

表 3 定向路由在协议设计方面的对比

Table 3 Comparison of directional protocols in protocol design

协议	天线类型	单/多路径	定向天线朝向控制	定向天线角度选择	邻居发现	路径发现	LPD	仿真工具	网络类型
DRP	单波束定向天线+全向天线	单路径	位置预测	90°/45°/30°	单波束扫描+跨层信息	按需发现	不支持	NS2	MANET/FANET
RARP	单波束定向天线+全向天线	单路径	位置预测	自适应角度调整	全向天线广播	按需发现	不支持	C++	FANET
ALAR_DA	单波束定向天线	单路径	指向地面固定节点	90°	区域广播	按需发现	不支持	NS2/Matlab	MANET/FANET
MDA-ADCFQS	多波束定向天线	单路径	无人机旋转	4 个 30°/60° 天线	多定向天线广播	按需发现	不支持	Testbed	FANET
Volcano Routing	多波束定向天线	多路径	多波束覆盖	4 波束	多波束扫描	按需发现	不支持	Matlab	MANET/FANET
MBDA-EOLSR	多波束定向天线	多路径	多波束覆盖	4 波束	多波束扫描	主动发现	支持	Matlab	FANET

表 4 对比了定向路由协议的性能特征和实际表现。定向天线一般用于节点密度较高、网络规模大的网络,特定环境下

定向天线也可用于低密度或小规模网络,如用于线性拓扑无人机中继网的 MDA-ADCFQS 协议,其利用定向天线传输距

离远的特性提升了中继距离,并通过多个单波束定向天线实现全双工传输,极大地提升了中继效率和吞吐量,降低了传输时延,同时由于节点几乎不移动,还节省了大量控制开销。一般情况下网络中的节点都要相互通信,每个节点都有可能和其他节点接收或者发送信息,由于目的节点的位置信息通常是未知的,因此需要通过路由发现机制或者拓扑更新机制获取,但这会造成高开销和高延时。但是在特定情况下,目的节点的位置可能是固定且已知的,不需要通过协议发

现,无需目的节点的位置发现开销和时延,在低开销和低延时的情况下便能够获得高吞吐量,比如无人机中继网中的MDA-ADCFQS和目的节点为固定的地面基站的ALAR-DA。飞行自组网一般为网状拓扑,很少是线性拓扑,因此MDA-ADCFQS在适用场景上有一定的局限性。定向路由转发数据离不开MAC协议,但为了简化路由协议设计,通常将MAC协议理想化,或者使用自定义的MAC协议。

表4 定向路由在协议性能方面的对比

Table 4 Comparison of directional routing in protocol performance

协议	节点密度	拓扑规模	移动性	评价指标	PDR	延时	吞吐量	控制开销	目的节点位置	适用拓扑	MAC协议
DRP	中	大	中	L,O,T, PDR,EED	高	高	中	高	未知	网状	MDA
RARP	中	大	高	PDR,L, T,EED	高	高	中	高	未知	网状	理想化MAC
ALAR-DA	中	大	中	PDR,O,EED	高	低	中	低	已知	网状	理想化MAC
MDA-ADCFQS	低	小	低	T,O	高	低	高	低	已知	线性	理想化MAC
Volcano Routing	高	大	低	T,L	高	低	高	高	未知	网状	自定义MAC
MBDA-EOLSR	高	小	高	T,L,PDR	中	高	中	高	未知	网状	理想化MAC

## 5 飞行自组网定向路由挑战

以在空中高速移动的无人机作为节点的飞行自组网本身就面临着复杂的路由协议设计挑战,而定向天线的有向性在提升飞行自组网网络性能的同时,更是加剧了路由协议设计的复杂性。本节针对飞行自组网定向路由在实际应用和未来发展中所面临的挑战进行了探讨。

(1)定向天线控制。定向天线的控制仍是飞行自组网使用定向天线的主要挑战之一,尤其是单波束定向天线。朝向控制、波束角度、广播效率和邻居发现仍然需要新的解决方案。加一个全向天线辅助单波束定向天线是最常用的解决方案之一,但是全向天线的通信范围小于定向天线,因此只能发现靠近发送节点的邻居节点,不能发现在定向天线通信范围内全向天线通信范围外的节点,而这些较远的节点才是定向路由得以降低跳数提升性能的关键。因此在使用全向天线辅助时,必须仔细设计路由发现机制才能发挥定向天线的优势。仅使用单波束定向天线则需要进行波束扫描,这势必会引入开销与时延,因此设计一种仅用定向天线就可以高效、快速、准确地发现邻居的邻居发现机制意义重大<sup>[50]</sup>。在传输数据时,常利用位置预测技术进行定向天线朝向控制,位置预测需要节点位置、速度等信息,势必要引入大量控制开销。因此,在高动态网络中定向天线的控制仍是一个值得研究的问题。

(2)定向MAC协议支持。定向路由必须要有相应的MAC协议支持,当前的路由协议要么基于理想化的MAC协议,要么是特定的MAC协议,缺少普遍使用的MAC协议。因此提出定向路由后还需要有相适用的MAC协议才可能充分发挥其优势,且所提出的MAC协议必须适应定向天线的有向性和飞行自组网的高动态性,这大大增加了MAC协议的设计难度<sup>[51]</sup>,所以提出支持定向天线的普适性的MAC协议标准也是一个重要的挑战。

于传统的分层网络模型来设计的,虽然分层网络模型在有线网络中已达到很高的性能,但是难以满足具有动态性的无线自组网的特殊要求。特别是在高动态的定向飞行网络中,由于节点的高移动性和有限的网络资源,分层模型需要传递大量的控制开销来确保网络的正常运行。允许层与层之间交换信息和反馈有助于路由决策,而链路层的链路状态信息可以作为路由层决策的参考,并且基于链路层服务可以建立更可靠的路由路径<sup>[52]</sup>。因此跨层协议设计有可能是飞行自组网定向路由的一个优化方向。

**结束语** 本文对现有的飞行自组网定向路由协议进行了详细的综述,通过分析明确了相比于全向天线,定向天线能为飞行自组网提供更好的网络性能和服务质量,同时提出了飞行自组网中使用定向天线会引入的朝向控制问题、角度控制问题、广播效率和邻居发现问题。定向路由可分为单路径定向路由和多路径定向路由。本文从天线配置、定向天线控制、路由机制、路由评估指标、路由优缺点等方面对现有定向路由进行了分析和介绍,从定向天线控制策略、路由策略和关键参数等方面进行了比较。最后,本文提出了飞行自组网定向路由在实际应用中和未来发展中所面临的挑战。研究表明,虽然基于定向天线的飞行自组网定向路由仍面临着众多挑战,但定向路由能提供远高于全向路由的飞行自组网性能,更能满足复杂任务的服务质量需求,具有很高的研究价值。

为提升无人机网络性能以满足复杂任务对网络可靠性、时延、带宽和吞吐量等QoS要求,可以充分利用定向天线的信道利用率高和通信范围大的特点,研发基于定向天线的飞行自组网定向路由协议。本文首先总结了定向天线应用于无人机网络中的优势和问题,然后对现有的飞行自组网从多个方面进行了详细的综述和定量比较,最后探讨了飞行自组网定向路由在实际应用和未来发展中所面临的挑战。

## 参考文献

[1] TAREQUE M H, HOSSAIN M S, ATIQUZZAMAN M. On the

- Routing in Flying Ad hoc Networks[C]// Proceedings of the 2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems. Lodz:IEEE Press,2015:1-9.
- [2] DU Y H,XING L N,CAI Z Q. Survey on intelligent scheduling technologies for unmanned flying craft clusters[J]. *Acta Automatica Sinica*,2020,46(2):222-241.
- [3] WANG J,JIANG C,HAN Z,et al. Taking Drones To The Next Level Cooperative Distributed Unmanned-Aerial-Vehicular Networks for Small and Mini Drones[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*,2017,12(3):73-82.
- [4] LAKEW D S,SA'AD U,DAO N,et al. Routing in Flying Ad Hoc Networks:A Comprehensive Survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*,2020,22(2):1071-1120.
- [5] KIM S,KWAK J H,OH B,et al. An Optimal Routing Algorithm for Unmanned Aerial Vehicles[J]. *Sensors*,2021,21(4):15-22.
- [6] LI B,FEI Z S,ZHANG Y. UAV Communications for 5G and Beyond:Recent Advances and Future Trends[J]. *IEEE Internet of Things Journal*,2019,6(2):2241-2263.
- [7] BEKMEZCI I,SAHINGOZ O K,TEMEL S. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs):A Survey[J]. *Ad Hoc Networks*,2013,11(3):1254-1270.
- [8] YOU W J,DONG C,WU Q H. Survey of Layered Architecture in Large-scale FANETs[J]. *Computer Science*,2020,47(9):226-231.
- [9] ZAFAR W,KHAN B M. Flying Ad-Hoc Networks:Technological and Social Implications[J]. *IEEE Technology and Society Magazine*,2016,35(2):67-74.
- [10] BOUACHIR O,ABRASSART A,GARCIA F,et al. A mobility model for UAV ad hoc network [C]// International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Orlando:IEEE Press,2014:383-388.
- [11] AGRAWAL J,KAPOOR M. A comparative study on geographic-based routing algorithms for flying ad-hoc networks[J]. *Concurrency and Computation-Practice & Experience*,2020,33(16):53-62.
- [12] NAWAZ H,MANSOOR H,LAGHAR I,et al. UAV Communication Networks Issues: A Review[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*,2020,28(3):1349-1369.
- [13] LI J,ZHOU Y,LAMONT L. Communication architectures and protocols for networking unmanned aerial vehicles [C]// 2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). 2013:1415-1420.
- [14] SAHINGOZ O K. Networking Models in Flying Ad-Hoc Networks (FANETs):Concepts and Challenges[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*,2014,74(1/2):513-527.
- [15] YADAV K,NAIN A,MAAKAR S. Routing Protocols in FANET:Survey[J]. *National Conference on Innovative Trends in Computer Science Engineering*,2015,96(13):7-12.
- [16] GUPTA L,JAIN R,VASZKUN G. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*,2016,18(2):1123-1152.
- [17] FAN X,CAI W,LIN J. A survey of routing protocols for highly dynamic mobile ad hoc networks [C]// 2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT). 2017:1412-1417.
- [18] KHAN M A,SAFI A,QURESHI I M,et al. Flying ad-hoc networks (FANETs):a review of communication architectures,and routing protocols [C]// 2017 First International Conference on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies. Karachi:IEEE Press,2017:1-9.
- [19] OUBBATI O S,LAKAS A,ZHOU F,et al. A survey on position-based routing protocols for Flying Ad hoc Networks (FANETs)[J]. *Vehicular Communications*,2017,10(3):29-56.
- [20] ARAFAT M Y,MOH S. A Survey on Cluster-Based Routing Protocols for Unmanned Aerial Vehicle Networks[J]. *IEEE Access*,2018,7(1):498-516.
- [21] BUJARI A,PALAZZI C E,RONZANI D. A Comparison of Stateless Position-based Packet Routing Algorithms for FANETs[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*,2018,17(11):2468-2482.
- [22] JIANG J,HAN G. Routing Protocols for Unmanned Aerial Vehicles[J]. *IEEE Communications Magazine*,2018,56(1):58-63.
- [23] ARAFAT M Y,MOH S. Routing Protocols for Unmanned Aerial Vehicle Networks: A Survey [J]. *IEEE Access*,2019,7(3):99694-99720.
- [24] MALHOTRA A,KAUR S. A comprehensive review on recent advancements in routing protocols for flying ad hoc networks [J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*,2019,10(1):36-59.
- [25] OUBBATI O S,ATIQUZZAMAN M,LORENZ P,et al. Routing in Flying Ad Hoc Networks:Survey,Constraints,and Future Challenge Perspectives [J]. *IEEE Access*,2019,7(99):81057-81105.
- [26] KHAN M F,YAU K L A,NOOR R M,et al. Routing Schemes in FANETs:A Survey[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*,2020,20(1):38-71.
- [27] WANG S,ZHUANG Z W,WANG J X,et al. Research on the Scheme and Performance of Anti-jamming ad hoc Networks Routing Using Directional Beams[J]. *Acta Automatica Sinica*,2007,33(7):775-777.
- [28] TEMEL S,BEKMEZCI I,LODMAC. Location oriented directional MAC protocol for FANETs[J]. *Computer Networks*,2015,83(4):76-84.
- [29] 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.
- [30] YANG B,TALEB T,SHEN Y L,et al. Performance,Fairness,and Tradeoff in UAV Swarm Underlaid mmWave Cellular Networks With Directional Antennas [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*,2021,20(4):2383-2397.
- [31] GOSSAIN H,JOSHI T,CORDEIRO C,et al. DRP:An Efficient Directional Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*,2006,17(4):76-84.

- [32] AL-KHATIB A A, HASSAN R. Performance Evaluation of AODV, DSDV, and DSR Routing Protocols in MANET Using NS-2 Simulator[C]// Iriect 2017. Cham: Springer, 2017: 276-284.
- [33] CHOUDHURY R R, VAIDYA N H. Performance of ad hoc routing using directional antennas[J]. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3(2): 157-173.
- [34] TU Y, ZHANG Y, ZHANG H. A novel MAC protocol for wireless Ad hoc networks with directional antennas [C]// 2013 15th IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT). Wuhan: IEEE Press, 2013: 494-499.
- [35] GANKHUYAG G, SHRESTHA A P, YOO S J. Robust and Reliable Predictive Routing Strategy for Flying Ad-Hoc Networks [J]. *IEEE Access*, 2017, 5(5): 643-654.
- [36] PERKINS C E, BELDING-ROYER E M. Ad-hoc on-demand distance vector routing[C]// Workshop on Mobile Computing Systems & Applications. New Orleans: IEEE Press, 2002: 90-100.
- [37] NOGUCHI T, KOBAYASHI T. Adaptive Location-Aware Routing with Directional Antennas in Mobile AdHoc Networks[J]. *IEEJ Transactions on Electronics Information and Systems*, 2017, 137(10): 1310-1319.
- [38] SHIH T F, YEN H C. Location-aware routing protocol with dynamic adaptation of request zone for mobile ad hoc networks [J]. *Wireless Networks*, 2008, 14(3): 321-333.
- [39] GAJUREL S, MALAKOOTI B, WANG L. DA-MLAR-ODTP: Directional Antenna Multipath Location Aided Routing with On Demand Transmission Power [C]// International Symposium on Wireless Pervasive Computing. San Juan: IEEE Press, 2017: 71-76.
- [40] YUNG B, KONITIN H. Location-Aided Routing (LAR) in mobile ad hoc networks[J]. *Wireless Networks*, 2000, 6(4): 66-75.
- [41] JAYASREE G, INDULEKHA K P, MALARKODI B. Directional Antenna Based Efficient Location Aware Routing in Mobile Adhoc Network[J]. *ICTACT Journal on Communication Technology*, 2018, 9(2): 1765-1775.
- [42] MATSUDA T, KANEKO M, HIRAGURI T, et al. Adaptive Direction Control for UAV Full-Duplex Relay Networks Using Multiple Directional Antennas[J]. *IEEE Access*, 2020, 8(99): 85083-85093.
- [43] DEY S, MITTRA R. Compact microstrip patch antenna[J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2015, 13(1): 12-14.
- [44] TOORCHI N, HU F, PUDLEWSKI S, et al. Volcano Routing: A Multi-Pipe High-Throughput Routing Protocol with Hole Avoidance for Multi-Beam Directional Mesh Networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2020, 19(12): 2981-2996.
- [45] ZHANG L, HU L, HU F, et al. Enhanced OLSR routing for airborne networks with multi-beam directional antennas [J]. *Ad Hoc Networks*, 2020, 102(1): 102-116.
- [46] FREEMAN L C. Centrality in social networks conceptual clarification[J]. *Social Networks*, 1978, 1(3): 215-239.
- [47] YANG Y, DONG Y, CHAWLA N V. Predicting node degree centrality with the node prominence profile [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 1-7.
- [48] BASH B A, GOECKEL D, TOWSLEY D, et al. Hiding information in noise: fundamental limits of covert wireless communication[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(12): 26-31.
- [49] KHAN M A, NOOR F, ULLAH I, et al. An Efficient Medium Access Control Mechanism for Flying Ad-hoc Networks[J]. *Computer Systems Science and Engineering*, 2021, 38(1): 47-63.
- [50] BAI W, XU Y H, WANG J L, et al. Cognitive Neighbor Discovery With Directional Antennas in Self-Organizing IoT Networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(8): 6865-6877.
- [51] LI A, WU G, DONG C, et al. CU-MAC: A MAC Protocol for Centralized UAV Networks with Directional Antennas [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2020, E103. B(5): 537-544.
- [52] DU J Z, LIU H, CHEN P, et al. Building the Best Reliable Routing Tree Using Link Quality Services in WSNs[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(12): 1269-1275.



**YANG Zhang-lin**, born in 1996, post-graduate. His main research interests include wireless communication and flying ad-hoc networks.



**XIE Jun**, born in 1973, Ph.D, professor, Ph.D supervisor. His main research interests include computer network and intelligent information processing.