

# 无线网络轻量级抗毁路由技术

韩明<sup>1,2</sup>, 王洋<sup>1</sup>, 张金刚<sup>1,2</sup>, 孙雪峰<sup>1</sup>, 唐舟扬<sup>1</sup>

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京, 100076; 2. 电磁兼容与防护全国重点实验室, 北京, 100076)

**摘要:** 复杂环境下, 无人飞行器各节点快速机动、激烈对抗, 存在位置变化、链路干扰压制等恶劣工况, 为解决无线网络拓扑频繁变化、管控开销急剧增加带来的网络资源管理难题, 实现特殊环境中无线通信业务稳健、及时、准确承载服务的目标, 研究无线网络适配的鲁棒路由技术, 构建了分层管控的轻量化混合路由方案, 利用拓扑感知和故障检测技术, 迅速准确地发现网络变化, 通过路由分层构建、段内路由修复和段间路由修复方式, 快速对损毁剩余网络进行优化调度和补偿, 提高被破坏网络的通信服务能力。

**关键词:** 无线; 网络; 轻量级; 抗毁; 路由

中图分类号: TN925 文献标识码: A

## A Lightweight Invulnerability Routing Technology for Wireless Networks

HAN Ming<sup>1,2</sup>, WANG Yang<sup>1</sup>, ZHANG Jingang<sup>1,2</sup>, SUN Xuefeng<sup>1</sup>, TANG Zhouyang<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing, 100076;

2. National Key Lab of Electromagnetic Compatibility and Protection, Beijing, 100076)

**Abstract:** The nodes of the unmanned aircraft are fast maneuvering and confronting fiercely in the complex environment. There are bad conditions such as position change and link interference suppression. The robust routing technology adapted to wireless network is studied in order to solve the problem of network resource management caused by the frequent change of wireless network topology and the sharp increase of management and control cost, and realize the goal of tenacious, timely and accurate service carrying of wireless communication service in the specific environment. A lightweight hybrid routing scheme with layered management and control is constructed, and topology awareness and fault detection technologies are used to detect network changes quickly and accurately. The damaged residual network is quickly optimized scheduling and compensation through layered route construction, intra-segment route repair and inter-segment route repair, and the communication service capability of the damaged network is improved.

**Keywords:** wireless; network; lightweight; invulnerability; routing

## 0 引言

以无人飞行器为代表的无人平台, 具备快速移动和灵活组网的特点<sup>[1-3]</sup>。无人飞行器通常以“编队”的形式执行任务, 利用无线技术交互和传输数据, 形成自组织的智能通信网络, 实现信息可靠交互<sup>[4-5]</sup>。

考虑到应用环境的复杂性和特殊性, 无人平台无线通信网络面临节点损毁、频繁入退网、强电磁干扰等情况, 传统的移动自组网路由算法并不适用<sup>[6-10]</sup>, 尽管部分学者已经对无线网络开展了研究工作, 包括负载携带转发 (Load Carry And Delivery, LCAD) 协议<sup>[11]</sup>、无线自组网按需平面距离向量路由 (Ad hoc On-Demand Vector Routing, AODV) 协议<sup>[12]</sup>、主动-

贪婪-反应 (Reactive-Greedy-Reactive, RGR) 协议<sup>[13]</sup>等, 此外, 部分学者也开展了抗毁网络研究<sup>[14-16]</sup>, 但仍缺乏对恶劣工况下低资源消耗路由算法的研究, 研究针对复杂环境的无线组网鲁棒路由技术, 攻克轻量级抗毁路由技术, 已成为亟须解决的实际问题。

本文针对无人飞行器特点, 构建了分层管控的混合路由架构, 形成了簇间分布式、簇内集中式的鲁棒通信网络架构, 提出了低开销自适应的拓扑感知技术和轻量级抗毁路由技术, 在较短时间内进行网络快速重构。

### 1 分层管控的混合路由架构

#### 1.1 总体架构

针对无人飞行器无线组网通信需求，基于网络的分层分簇架构与组织形态，提出使用分层管理的路由方案，具体分为簇间路由和簇内路由。

簇间通信时，由簇首节点依照无中心的分布式路由管理技术形成路由决策，并指引分组转发。

簇内通信时，各个簇为独立的网络。单个簇形成以簇首为中心的集中式路由管理体系，由簇首节点对簇内多跳网络进行路由计算，并将路由表等信息通告各成员节点。节点跨簇通信时，通过簇间路由和簇内路由共同实现（见图1）。

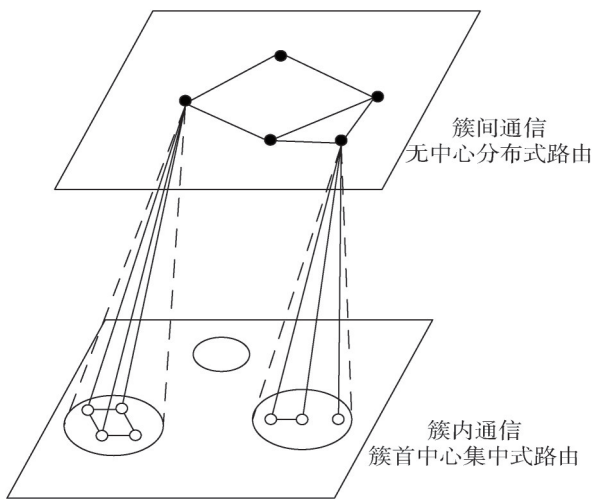


图1 分层分簇路由架构

Fig.1 Layered and clustered routing architecture

#### 1.2 簇间分布式路由

分布式路由选择技术是目前应用最广泛的路由算法，能够支持各种无线通信网络。分布式路由选择技术的实现机理为：各节点周期性地接收相邻节点发送的状态信息，同时周期性发布本节点已经做出的路径选择结果，及时通知相邻节点，各节点持续按照整个网络新状态更新路由。分布式路由选择技术可有效选择效率和数据传输速度，是一种双向动态选择技术。

针对无人飞行器无线网络簇首节点通信需求，簇间可采用分布式路由选择技术，保障节点间的信息交互。在路由方案中构建4种报文帧：路由请求帧（Route Request, RREQ）、路由应答帧（Route Reply, RREP）、路由错误帧（Route Error, RERR）、路由检测帧（Hello）。

当簇首构成的网络中的节点需要向另一节点发送

报文信息时，若存在可到达目的节点的有效路由，则无需进行路由查找过程；若不存在可到达目的节点的有效路由，则会启动路由查找过程，从而形成有效路由。路由查找具体过程为：源节点先利用无线网络对RREQ报文进行广播，当邻近节点接收到RREQ报文后，首先对比本节点的地址信息，确认本节点是否为目的节点，如果是目的节点则直接向源节点发送RREP报文进行回复，如果不是目的节点则在路由表中查询是否存在到达目的节点的路由，若存在，则向源节点发送RREP报文，若不存在，则继续转发RREQ进行路由查找，最终，源节点收到RREP后，根据记录的跳数，按照最短路径原则建立有效路由，之后向目的节点发送数据包传输数据。

分布式路由选择技术中报文传输示意如图2所示。

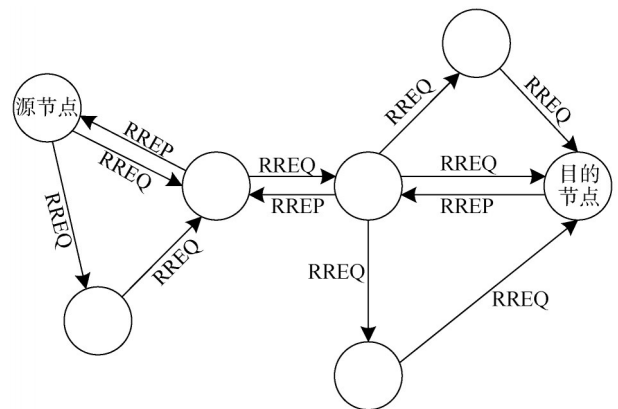


图2 分布式路由选择技术中报文传输示意

Fig.2 Message transmission diagram in distributed routing

分布式路由选择技术在维持节点间无线通信的同时，还能够通过播发Hello报文来维护邻近节点并修复断路路由，从而保证整个无线通信网络的路由稳定和更新。无线通信网络中某些节点处于活跃状态，它们会按照一定的时间周期发送Hello报文，对无线链路的可用性进行实时监测，如果在本节点规定的有效时间内，未收到另一节点的Hello报文，则认为这两节点之间的路由链路已经失效，那么就需要发起一次指向该节点的路由修复，如果路由修复时间超过一定时间限度，该节点会通过无线信道向其他节点发送RERR路由错误帧，通信链路上的各节点在收到路由错误帧后，删除该失效节点对应的路由信息从而完成无线网络路由信息的维护。节点间通信的流程如图3所示。

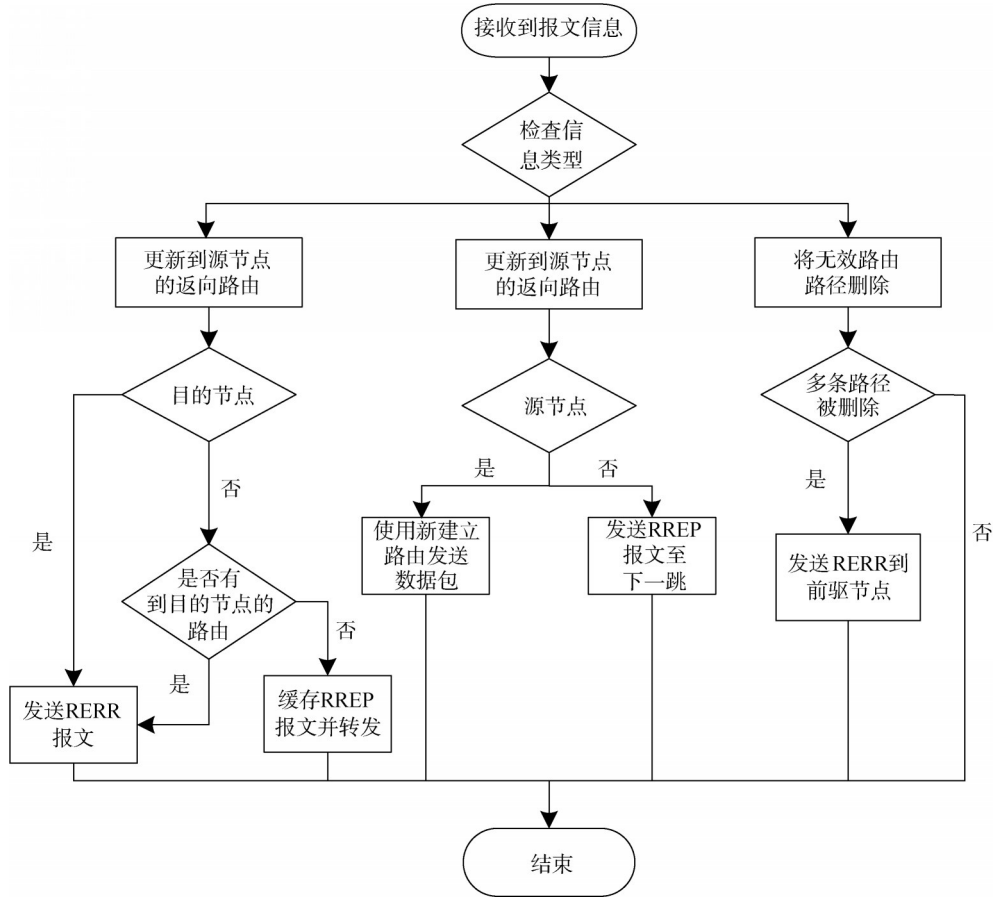


图3 簇间节点通信的流程

Fig.3 Flow chart of communication between clusters

### 1.3 簇内集中式路由

针对无人飞行器无线网络的簇内节点通信需求，采用以簇首为中心的集中式路由技术，仅在簇首计算并决策路由，成员节点按照路由执行信息交互。计算路由表时，遵循最短路径优先原则，由以下4个阶段组成：

a) 邻居节点发现阶段。

该阶段负责监测簇内成员节点邻居关系，各个节点通过所有接口周期性地发出Hello报文并产生相应应答实现。

b) 上报阶段。

相邻簇内节点建立双向连接关系后，开始链路状态数据同步过程。各节点通过向簇首、副簇首发送链路状态信息包，描述自身的链路连接状态。簇首和副簇首建立全簇数据库，记录当前簇内所有节点的拓扑连接关系。

c) 计算最短路径阶段。

簇首或副簇首会根据其各自的链路状态数据库，运行Dijkstra算法计算出所有节点的路由表。在每个

节点的路由表中，包含目标地址、目标地址类型、链路的代价、链路的存活时间、链路类型以及下一跳等内容。

d) 分发阶段。

当进入预先约定的更新时刻或在网络拓扑结构发生变化时，簇首或副簇首会生成新的全部路由表，针对每个节点的路由表信息，分发给对应的节点，簇内节点根据其接收到的信息更新自己的路由表。

当簇首节点损毁时，由副簇首节点执行以上任务，以确保网络的稳定性，增加抗毁能力。一旦网络发生变化，受影响的节点将执行拓扑发现并进行上报过程，簇首节点更新路由。簇内报文如表1所示。

表1 簇内报文

Tab.1 Message in a cluster

类型	作用
Hello 报文	用于发现和维持邻居关系
链路状态信息包	各个簇内成员节点向簇首或副簇首汇报自身链路状态信息
路由表更新包	簇首或副簇首向各个簇内成员节点指派对应路由表

### 2 低开销网络拓扑感知技术

当复杂环境改变带来拓扑变化时，一般采用基于周期探测和主动探测的拓扑发现机制<sup>[17]</sup>，如图4所示。

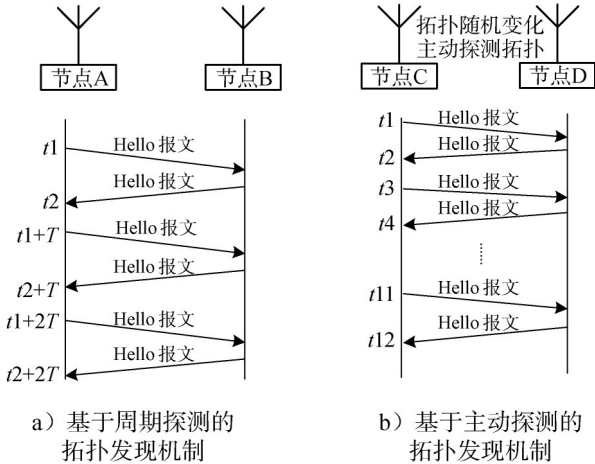


图4 典型拓扑发现机制

Fig.4 Typical topology discovery mechanisms

针对时变网络环境，可采用基于路径信息区分的拓扑发现与维护算法，调整拓扑探测周期，适应可预测与随机时变拓扑，自适应调用与之匹配的拓扑发现机制，降低拓扑发现与维护的负荷，提升链路利用率。

基于路径信息区分的拓扑发现与维护算法，使用Hello报文进行邻居探测，发现新的节点，通过链路状态信息包进行邻居状态的更新。在Hello报文里加入路径信息，利用路径信息在拓扑发现与维护时对邻居节点进行分类标记，将邻居节点分类为相对位置固定节点和相对位置变化节点，不同的节点使用不同的自适应控制包交互周期进行拓扑发现与维护。

若根据Hello报文交互信息计算判断邻居节点是来自相对位置固定节点，则采用固定的Hello报文交互周期。若邻居节点来自相对位置变化节点，则采用动态变化周期的Hello报文发现机制，其周期依据邻居节点与当前节点的相对运动速度确定。交互频率与相对运行速度成正比，相对运动速度较快时，增大Hello报文交互频率；相对运动速度慢时，减少Hello报文交互频率。

### 3 轻量级抗毁路由技术

随着网络规模的增大，源节点和目的节点之间的路由变得 longer。当路由因节点移动性或节点故障而中断时，平面路由协议通常会放弃整个原始路由，并启

动新一轮路由发现，以建立源节点和目的节点的新路由。这种方法浪费了原始链路的资源，并可能在全局链路状态发现中造成巨大的开销。

鉴于此，提出轻量级的分层分段式区域路由技术，通过分层建立和维护活动路由，可以在路由发生故障的任何地方修复断开的路由。与传统端到端整体路由相比具有明显的优势：

- a) 分层分段构建路由，取代端到端整体路由，分层分段交互信息，减少节点开销；
- b) 分层分段修复路由，取代端到端整体路由重构，支持快速重构与敏捷抗毁。

#### 3.1 分层路由构建

在层次结构中，一条管线被划分为多个子链路，这些子链路被称为段。在分层路由模型中，可管理的单元是一个段。将路由划分为段后，得到了一个两级的层次路由模型，即全局段间路由和局部段内路由。在更高的层次上，源节点到目的节点使用全局段间路由方案；在较低级别上，每个网段内使用段内路由方案。通过从路线中选择多个路径节点，将链路分成若干段。每段以一个名为起始节点的路径节点开始，以一个名为结束节点的路径节点结束，中间节点被称为转发节点。两个相邻段共享一个公共路径节点，该节点充当上游段的结束节点和下游段的开始节点。

两个路由方案分层组合，当段长度设置为1时，分层分段式路由方案在段内路由模式下工作，每跳为一个段，段间路由方案占主导地位；当段长度设置为n (n>1) 时，在段间路由模式下工作，整个路由为一段，段内路由方案占主导地位，如图5所示。

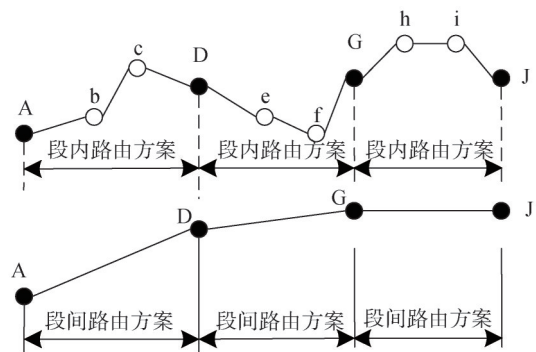


图5 分层分段路由方案

Fig.5 Layered segment routing scheme

该模型的主要优势为，当路由上的一个节点移出或失败时，不必放弃整个原始路由并发现一条从源节点到目的节点的新路由，只需要断开段的两个路径就

可以找到一个新的段，使得端到端的延迟大幅下降，大大减少路由开销并提高性能。此外，一条链路上每段的跳数可能不同，不同路线上的段长度也可能不同，对外界环境具有了一定的自适应性。

### 3.2 段内路由修复

当一个节点发现下一节点不可到达时，它会向其前序节点发送一条段内路由错误消息 (RERR<sub>intra</sub>)，前序节点将当前节点用作某些段的下一跳。RERR<sub>intra</sub> 包含断开的链接和断开段的结束节点。在接收到 RERR<sub>intra</sub> 后，前序节点从其路由表中搜索断开的段，并将断开段的状态设置为无效。如果当前节点不是某些断开段的起始节点，则将继续转播 RERR<sub>intra</sub>，直到消息到达断开段的起始节点。起始节点获取段内路由错误信息后，将尝试段内路由修复，成为路由修复的发起方，广播段内路由请求 (RREQ<sub>intra</sub>)，寻找断开段的结束节点。

转发节点接收到 RREQ<sub>intra</sub> 后，若消息不是重复的且其网络生存时间 (Time-to-Live, TTL) 大于零，则转发该消息，否则丢弃。当结束节点收到第 1 条 RREQ<sub>intra</sub> 消息时，它会向起始节点发送一条段内路由应答 (RREP<sub>intra</sub>) 消息。RREP<sub>intra</sub> 作为单播消息沿着从结束节点到起始节点的反向路径进行中继。如果起始节点收到 RREP<sub>intra</sub>，则段内路由修复成功。在从启动段内路由修复到获知修复结果的这段时间内，起始节点缓冲其接收到的正在被修复的路由数据包。若段内修复成功，则起始节点发送缓冲数据包；否则，将尝试段间修复，并继续缓冲无法传递的数据包。

图 6 显示了段 DG 的原始路径是 D→e→f→G 且 e 和 f 之间的连接中断。段内路由成功发现，并为段 DG 提供新路径 D→u→v→G。

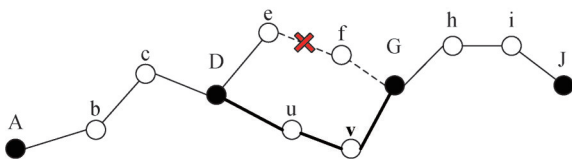


图6 段内路由修复

Fig.6 Intra-segment route repair

起始节点通过使用计时器获知段内路由修复结果，该计时器在段内路由修复时设置。如果计时器过期且不存在到断开段的结束节点路径，则起始节点将结束不成功的段内路由修复，并开始段间路由修复。

### 3.3 段间路由修复

段间路由修复的过程即发现路由上下游路径节点

的路由，如果路由发现成功，修复断开的路由，并将修复结果发送到源节点。

利用段间路由错误消息 (RERR<sub>inter</sub>) 来传输不同的信息。一个 RERR<sub>inter</sub> 可以是以下 3 种类型中的任意一种：

- a) 修复：路由已断开，且段间路由修复成功，修复的路由包含在消息中，表示为 RERR<sub>inter</sub><sup>repair</sup>。
- b) 断开：路由断开，段间路由修复失败，源节点需要启动另一轮全局路由发现，表示为 RERR<sub>inter</sub><sup>broken</sup>。
- c) 循环：删除路线上的一个循环，表示为 RERR<sub>inter</sub><sup>loop</sup>。

起始节点作为发起方，通过广播 RREQ<sub>inter</sub> 消息启动段间路由发现。各节点在接收到段间路由请求 (RREQ<sub>inter</sub>) 消息后，若其不是重复项且其 TTL 大于零，则会传播该 RREQ<sub>inter</sub>。当目的节点接收到 RREQ<sub>inter</sub> 时，如果路径长于默认跳数长度，则会将在 RREQ<sub>inter</sub> 中记录的路径分割为段。目的节点向发起方发送段间路由应答 (RREP<sub>inter</sub>)。在收到 RREP<sub>inter</sub> 后，发起方通过用 RREP<sub>inter</sub> 返回的新段替换断开的段和一些旧的下游段，进行路由修复。然后，发起方更新其路由缓存，通过上游路径节点向源节点发送包含修复路由的重新修复的内部消息，并使用修复的路由传输缓冲数据包。在接收到重新修正的 RERR<sub>inter</sub><sup>repair</sup> 后，上游路径节点更新其路由缓存，并使用修复的路由发送缓冲数据包。

发起方在启动段间路由修复时设置一个计时器。如果计时器过期时未收到 RERR<sub>inter</sub>，则发起方认为段间路由修复失败。然后，发起方通过上游路径节点向源节点发送重新中断的 RERR<sub>inter</sub><sup>broken</sup>，通知路由已中断，段内和段间路由修复均已失败。上游路径节点从其路由缓存中删除使用断开段的路由。路径修复期间，路径节点上的缓冲数据包被删除。源节点可以启动另一轮全局段间路由发现，以建立到目的地的路由。

### 3.4 路由重建时间仿真分析

通过分层分段式路由协议，无人飞行器能够适用于更大的无线网络，降低端到端延迟，并通过延长链路的使用寿命来大幅降低开销。当无人飞行器无线网络由于节点运动、对抗损毁等情况发生拓扑改变时，可对路由进行重构。

使用 OPNET 仿真软件，按照以下约束条件开展仿真分析：

- a) 网络节点数量：512 个。
- b) 簇划分原则：初始建网阶段所有节点地位平等，

通过初始化阶段的竞争产生簇首节点, 然后由各簇首节点按照模糊逻辑算法根据节点位置和无线覆盖范围形成簇, 各簇首节点依照无中心的分布式路由管理技术进行簇间通信, 最终形成分层管控的轻量化混合路由。

c) 毁伤条件下应对措施: 当非簇首节点失效, 则由簇首节点开展簇内路由修复; 当簇首节点失效时, 副簇首节点充当簇首对簇内节点进行管控与资源分配, 并通过邻居簇簇首及副簇首将副簇首网络中的副簇首节点迁移至簇首网络, 并由新的簇首节点指定新的副簇首节点, 使其同步网络信息加入副首网络。以上过程在整个链路上表现为段内和段间路由修复。

在仿真次数为1 000时, 随机选取50条链路传输业务, 在不同的路由节点数下, 随机失效20%节点, 得到路由平均重建时间、最大重建时间和最小重建时间, 如表2所示, 根据工程实践, 网络重建时间不大于2 s为合格, 路由节点数达到40个时, 路由重建时间合格率为98%, 路由节点数达到50个时, 路由重建时间合格率为100%。

表2 路由重建时间

Tab.2 Reconstruction time of route

路由节点数/ 个	平均重建 时间/s	最大重建 时间/s	最小重建 时间/s	合格率/% ( $\leq 2$ s)
30	18.30	62.30	0.41	22
40	0.89	2.95	0.36	98
50	0.52	0.72	0.36	100

若断开或者失效的节点数相同且均为30%, 对路由寻路成功率进行分析, 如图7所示, 由图7可知, 路由节点数越多, 寻路成功率越高。路由节点数较少时, 源节点要到达目的节点可选择的路径越少, 同时还可能出现路由环路情况, 故路由寻路成功率较低。

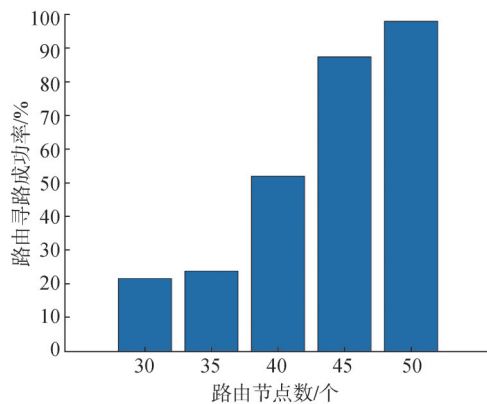


图7 路由寻路成功率

Fig. 7 Success rate of route finding

## 4 结束语

无线通信网络是无人飞行器编队节点间信息交互的唯一手段。为减少节点毁伤、强电子对抗带来的影响, 提出了分层管控的混合路由架构, 通过低开销、轻量级拓扑感知和网络重构技术增强了网络的鲁棒性和抗毁伤能力, 经路由重建时间分析, 能够在短时间内实现网络重构, 在工程应用上具有一定的参考价值。基于各簇自适应融合与拆分的低延时智能化无线组网是未来研究的方向。

### 参 考 文 献

- [1] 牛钊, 马涛. 美国陆军战场无线网络发展分析[J]. 飞航导弹, 2019 (7): 63-68.  
NIU Zhao, MA Tao. Analysis of battlefield wireless network development in the US army[J]. Areodynamic Missile Journal, 2019 (7): 63-68.
- [2] QIU C, HU Y, CHEN Y, et al. Deep deterministic policy gradient (DDPG)-based energy harvesting wireless communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 8577-8588.
- [3] 赵子懿, 赵长见, 马奥家. 跨介质飞行器发展现状与未来展望[J]. 导弹与航天运载技术(中英文), 2024(2): 17-24.  
ZHAO Ziyi, ZHAO Changjian, MA Aojia. Development status and future prospects of trans-media aircraft[J]. Missiles and Space Vehicles, 2024(2): 17-24.
- [4] 姜孟磊. 面向无人机群的网络的高效路由选择算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.  
JIANG Menglei. Research on efficient routing algorithm for UAV swarm network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [5] 邓波, 肖俊聪, 潘莉丽. 窄带无线网络安全路由技术[J]. 通信技术, 2022, 55(8): 1026-1030.  
DENG Bo, XIAO Juncong, PAN Lili. Research on secure routing technology of narrowband wireless network[J]. Communications Technology, 2022, 55(8): 1026-1030.
- [6] PATHAK I, VIDYARTHI D P. A model for virtual network embedding across multiple infrastructure providers using genetic algorithm[J]. Science China Information Sciences, 2017(60): 1-12.
- [7] 徐继伟. 多无人机编队抗毁性优化方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2020.  
XU Jiwei. Research on optimization method of invulnerability of multi-UAV formation[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2020.
- [8] 孔凌辉, 饶哲恒, 徐彦彦, 等. 基于深度强化学习的无线网络智能路由算法[J]. 计算机工程, 2023, 49(9): 199-207.  
KONG Linghui, RAO Zheheng, XU Yanyan, et al. Intelligent routing algorithm for wireless networks based on deep reinforcement learning[J]. Computer Engineering, 2023, 49(9): 199-207.
- [9] 燕贺云, 蒯小燕. 基于循环谱的隐蔽通信性能分析[J]. 宇航总体技术, 2023, 7(3): 27-34.

- YAN Heyun, KUAI Xiaoyan. Performance analysis of covert communication based on cyclic spectrum[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(3): 27-34.
- [10] CHOI H K, YOON C B, HONG S J. Design of airborne terminal system for joint tactical data link system complete data-link[J]. Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 2020(9): 257-263.
- [11] WEI P, SPIERS G, SUN D F. Algebraic connectivity maximization for air transportation networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(2): 685-698.
- [12] LI G, HAO Z F, HUANG H. Maximizing algebraic connectivity via minimum degree and maximum distance[J]. IEEE Access, 2018(6): 41249-41255.
- [13] KADA B, KHALID M, SHAIKH M S. Distributed cooperative control of autonomous multi-agent UAV systems using smooth control[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2020, 31(6): 1297-1307.
- [14] 陈明德, 王群. 数据链多域联合抗扰抗毁技术[J]. 通信技术, 2022, 55(9): 1171-1177.  
CHEN Mingde, WANG Qun. The anti-jamming and invulnerability of multi-domain technology for data link[J]. Communications Technology, 2022, 55(9): 1171-1177.
- [15] 毛建兵, 邓伟华. 一种分布式无线网络自适应拓扑抗毁性优化机制[J]. 通信技术, 2022, 55(12): 1583-1588.
- MAO Jianbing, DENG Weihua. An adaptive topology invulnerability optimization scheme for distributed wireless networks[J]. Communications Technology, 2022, 55(12): 1583-1588.
- [16] GAO Yingbin, KONG Xiangyu, HU Changhua, et al. A generalized information criterion for generalized minor component extraction[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(4): 947-959.
- [17] 程宇, 闫鑫欣. 无线 Ad hoc 网络路由技术研究与应用分析[J]. 舰船电子工程, 2023(7): 119-122.  
CHENG Yu, YAN Xinxin. Research and application of routing protocols in wireless Ad hoc networks[J]. Ship Electronic Engineering, 2023(7): 119-122.

### 作者简介

韩明 (1989—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为无线通信及组网技术。

王洋 (1984—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为数据链技术。

张金刚 (1984—), 男, 研究员, 主要研究方向为飞行器测控通信技术。

孙雪峰 (1989—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器测控通信技术。

唐舟扬 (1995—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为数据链技术。

(上接第51页)

- [7] SALARI S, CHAN F, CHAN Y T, et al. TDOA estimation with compressive sensing measurements and hadamard matrix[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(6): 3137-3142.
- [8] ARMAGAN A, DUNSON D B, LEE J. Generalized double Pareto shrinkage[J]. Statistica Sinica, 2013, 23(1): 119.
- [9] SUN B, GUO Y, LI N, et al. Multiple target counting and localization using variational bayesian EM algorithm in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(7): 2985-2998.
- [10] WANG Q, YU H, LI J. Sparse bayesian learning using generalized double pareto prior for DOA estimation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2021(28): 1744-1748.
- [11] YIN J, DING W, WU Y. An efficient direct position determination method for multiple strictly noncircular sources[J]. Sensors, 2018, 18(2): 324.
- [12] HU R, XIANG Y, FU Y, et al. An orthogonal matching pursuit with thresholding algorithm for block-sparse signal recovery[C]. Hong Kong: 2015 Second International Conference on Soft Computing and Machine Intelligence (ISCM), 2015.

### 作者简介

宋丽萍 (1996—), 女, 工程师, 主要研究方向为时差定位。

王硕 (1993—), 男, 工程师, 主要研究方向为电子对抗设计。

张杰 (1994—), 男, 工程师, 主要研究方向为电子对抗设计。

赵鹏程 (1995—), 男, 工程师, 主要研究方向为电子对抗设计。

赵毅 (1998—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为捷变频雷达。