DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.03.004

基于 NS-3 的无人机自组网跨层能源优化路由

陈不了1,冯 熳1,马海波2

(1. 东南大学 信息科学与工程学院,南京 211189;2. 网络通信安全紫金山实验室,南京 211189)

摘 要: 无人机 Ad hoc 网络是一种拓扑变化频繁的特殊能量受限网络, 为平衡网络中各节点的通信能耗, 降低传输总能耗, 从网络分层优化的角度入手, 提出了一种综合考量物理层能源消耗率与网络层跳数最小化的预期寿命路由度量, 保证跳数较少的前提下, 分组沿预期寿命较大的路径传输, 并给出了改进路由算法在 NS-3 中的具体实现。仿真结果显示, 引入新度量后, 网络的总能耗相比经典协议降低了 12%, 各节点剩余能量分布方差降低了 17%, 较长仿真时间内节点存活率提升了 18%。结果表明改进协议均衡了无人机网络中各节点的能耗分布, 降低了网络的总能耗, 在一定程度上降低了节点死亡率, 延长了网络寿命。

关键词: 无人机自组织网络; 能量优化; 路由协议; 802.11; 物理层 中图分类号: V443 文献标志码: A 文章编号: 1674-7135(2022) 03-0021-08

Flying Ad hoc networks's cross-layer energy optimization routing protocol based on NS-3

CHEN Buliao¹, FENG Man¹, MA Haibo²

(1. School of Information Sicense and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211189, China)

Abstract: The flying Ad hoc network is a special kind of energy-constrained network with frequent topology changes. In order to balance the communication energy consumption of network nodes and reduce total energy consumption of transmission, this paper begins with the perspective of network layering optimization, and then proposes a comprehensive consideration between the energy consumption rate of the physical layer and the minimum network hop count, aiming at the characteristics of FANETs. Under the premise of ensuring fewer hops, packets are transmitted along the path with the longest life expectancy. The concrete implement uses NS-3. As simulation results show, after the introduction of the new routing metric, the total energy consumption of the network is reduced by 12%, the variance of the remaining energy distribution of each node is reduced by 17%, and the survival rate of nodes is increased by 18% during a long simulation time. The results indicate that the improved protocol equalizes the energy consumption distribution of each node in FANETs, and reduces the total energy consumption of the network. Meanwhile, the refactoring protocol reduces the node mortality to a certain extent, and prolongs the whole network lifetime.

Key words: flying Ad hoc networks; energy optimization; routing protocol; 802. 11; physical layer

0 引言

随着无线通信技术的发展,无人机集群之间可 以形成一种高动态无线通信网络,即飞行自组网 (flying Ad hoc network, FANET)。飞行自组网是移动自组网的子集,出于便携性考虑,无人机节点将受到功率,重量和尺寸的限制,其内置电源所提供

收稿日期:2021-05-25; 修回日期:2021-11-26

引用格式:陈不了,冯嫚,马海波.基于 NS-3 的无人机自组网跨层能源优化路由[J]. 空间电子技术,2022,19(3):21-28. CHEN B L,FENG M, MA H B. Flying Ad hoc networks's cross-layer energy optimization routing protocol based on NS-3[J]. Space Electronic Technology, 2022,19(3):21-28.

的支持十分有限。此外,在 FANET 中,每个无人机 节点都将作为中继,承担着路由转发的任务,这意 味着相比无人机-基站架构,每个数据包到达目的节 点将会消耗更多的能量,对网络性能是一个巨大的 挑战^[1]。

Ad hoc 网络的性能与网络节点的能量消耗密 切相关,节点过低的能量利用率和各节点间不平衡 的能量消耗都将导致网络中过早的出现节点死亡, 使整个网络的寿命缩短、性能下降。无人机节点的 能量消耗主要分为移动能耗和通信能耗,随着移动 计算的发展,无人机终端拥有更大的计算能力,以 完成更多与通信有关的活动,使得无线通信所导致 的能量消耗可占总功率的一半以上。因此,从组网 通信的各层出发,研究节能路由协议是无人机 Ad hoc 网络能量优化的重点^[2]。

针对 Ad hoc 网络中应用最广泛的按需路由协 议,前人已经提出了很多能量优化的变体。文献 [3] 是在考虑了路由算法、移动性和无线电传播模 型的现实环境中探索平衡能耗的第一项工作,提 出的本地能量感知路由 LEAR 针对每个节点设置 了能量阈值,节点根据其剩余能量与阈值决定路 由请求是否被转发,当源节点的路由请求全部失 效时会动态调整阈值。文献[4]采用备份路由机 制,根据动态优先级权重选择路由,通过综合分析 选择消耗较少能量并具有较大容量的路径。文献 [5]引入了节点剩余能量能级概念,在选择节点进 行路由之前,计算节点能级,并且仅当其能量级别 高于某阈值时,才考虑将节点用于路由。文献[6] 通过计算网络中不同路径的稳定性和寿命来获取 路由度量,在一定程度上降低了能耗,提升了服务 质量。上述文章中提出的改进协议,针对 Ad hoc 路由协议的能量优化给出了相对简单的能量度量 选择与路由算法实现,但大多度量选择并未考虑 到信道频繁变化导致的节点通信能耗变化,并不 适用于 FANET 的高移动性节点与快速变化的 拓扑。

本文从分层优化的角度出发,提出了一种综合 飞行自组网物理层实时能量消耗率与网络层快速 变化拓扑特性的特殊 Ad hoc 网络路由算法,该方法 考虑了数据包传输跳数和链路中各节点的能量状 态,提出了一种全新的路由度量,使无人机组网通 信时各节点的能量消耗分布更加均匀,减少了网络 总能耗,延长了网络寿命。

1 AODV 协议与动态能源模型

1.1 按需平面距离矢量路由 AODV

Ad hoc 网络中节点的能源利用效率可以从多 角度进行优化,除了硬件设备对能源的支持以外, 单从网络数据传输的角度,可以按传输层、网络层、 链路层、物理层这种自上而下的分层模型进行考 虑^[2]。其中,网络层的路由协议是飞行自组网优化 的重点,经典按需距离矢量路由协议(Ad hoc on-demand distance vector routing, AODV)作为 FANET 中 最常用的协议之一,其基本路由算法由路由发现、 路由回复、路由修复与活跃邻居维护4个流程构成。

当源节点(source node, SRC)想要将数据发送 到没有路由的目的地(destination node, DST)时, SRC 通过广播路由请求包(route request, RREQ)启 动路由发现。中间节点接收到 RREQ 后,如果邻居 就是目的节点或具有到目的节点的有效路由,则通 过将路由回复(route reply, RREP)单播到 SRC 进行 响应。如果中间节点没有到达 DST 的路由,会重新 广播 RREQ 到其邻居。若中间节点收到重复的 RREQ,则丢弃该数据包。RREQ 传播同时建立了到 SRC 的反向路由,RREP 传播期间建立了到 DST 的 正向路由,路由发现与路由回复的基本流程如图 1 所示^[7]。



图 1 AODV 协议的路由发现与路由回复基本流程 Fig. 1 Basic route discovery and route reply process of AODV protocol

经典 AODV 协议为了实现通信服务质量的最 大化,以最小跳数为原则,在路由发现流程中表现 为:在相同源节点的一次路由建立请求中,各中间 节点只接收第一次到达的 RREQ 路由控制包,而拒 绝重复的路由请求。最小跳数度量虽然保证了通 信的端到端时延等 QoS 性能,但没有考虑到网络节 点的能量因素,例如:经典路由协议在选择路由路 径时更偏向于选择特定的移动节点。而无人机节 点高速移动的情况下,网络拓扑变化十分频繁,由 拓扑变化而导致的链路断裂迫使源节点不断重新 选路,若重新建立的路径仍然不将能量因素考虑在 内,则会导致这些节点可能在网络中不公平地负担 着中继功能,从而消耗更多的电量,其无线网卡比 其他节点更早停止运行。基于此,本文引入新的度 量,重新构建路由发现和路由回复过程,实现无人 机自组网的跨层能源优化。

1.2 物理层的动态能量消耗模型

移动自组网节点间进行无线通信时,其能量消 耗率的影响因素有很多,其中最关键的是 Wifi 设备 的工作模式,在不同工作模式下,节点之间的无线 信道具有不同物理层状态,分别对应着不同的天线 接收、发射功率。

以组网最常使用的物理层与 MAC 层交互协议 IEEE 802.11 为例,在 CSMA/CA 接入机制下,节点 的物理层会采用物理载波监听进行信道空闲评估 (clear channel assessment, CCA), 在一个 Slot time 内持续监听信道。该过程包含了能量检测(energy detection,ED)与载波检测(carrier sense,CS)两个部 分:当信道空闲时,节点并未收到数据帧,在 ED 流 程中未达到能量检测的阈值,此时802.11设备处于 接收空闲状态(IDLE)。若信道的能量通过了 ED 检测,CCA 会转移到 CS 状态并认为此时信道是繁 忙的(clear channel assessment busy, CCA BUSY),物 理层继续通过载波检测的方式判断该数据帧是否 是 802.11 数据帧。在 CS 过程中,节点若识别数据 帧头符合 802.11 帧格式且是发送给自己的,该节点 会立即转移到接收状态(receive, Rx)进行接收,若 数据帧不符合或不是发送给本节点,CCA 监听的结 果就是忙,然后等待此 Slot time 阶段结束后再进行 新一轮的监听。若节点本身有数据要发送且信道 是空闲的,则转移到发送状态(transport,Tx) 发送^[8]。

此外,802.11 设备还有其他几种工作状态,例 如,节点在多个信道之间切换是一个独立的状态 (Switching)。由于节点真正处于收发数据帧的有效 状态只有 Rx 和 Tx,为保证这两个状态的工作与切 换不产生任何冲突,节点需要长期处于 IDLE 空闲 状态并持续进行监听和 CCA 检测,这将导致节点在 数据传输需求较小时消耗大量无意义的能量。因此,802.11 协议为达到节能的目的,引入了一种单独的休眠模式(Sleep),使节点在通信需求较小时关闭发送和接收模块进行休眠,从而使能耗将到最低。最后,如果完全关闭无线设备,则该设备状态为关闭(Off),不产生任何能量消耗。各工作状态的转换图如图2所示。



802. 11 protocol

综上所述,节点无线通信的能耗基本由 802.11 协议所定义的几种状态来决定,不同的设备状态对 应着不同的工作电流,因此,无线网卡在一定工作 时间 *T*₀ 内消耗的能量 *E*₀ 如式(1)所示。

$$E_0 = \sum_{i=1}^{6} P_{\text{Statusi}} \times T_{\text{Statusi}} = U \times \sum_{i=1}^{6} I_{\text{Statusi}} \times T_{\text{Statusi}}$$
(1)

其中 $i = 1 \sim 6$ 时, Statusi 分别为 IDLE、CCA BUSY、Tx、Rx、Switching、Sleep 状态中的一种, P_{Statusi} 和 I_{Statusi} 分别为该 Statusi 状态对应的功率与工作电 流, U 为无线网卡工作的额定电压, T_{Statusi} 为 T_0 时间 段内该无线网卡处于 Statusi 工作状态的总时 间, 有:

$$T_0 = \sum_{i=1}^{6} T_{\text{Statusi}} \tag{2}$$

2 基于跨层的均衡能量路由算法

2.1 均衡能量的路由度量设计

无人机自组网中各节点的能量消耗率反映了 该节点在网络拓扑中的工作繁忙程度,过大的负载 会使节点过早的耗尽能量,进而影响整个网络的通 信性能。

节点在网络层选择路由转发时,通过跨层对物 理层和链路层的工作状态进行感知,计算出节点的 实时能量消耗情况,将其应用于路由度量的选择, 可以有效避免同一中继节点的过度负载。 设节点的初始能量为 E_1 ,节点开始通信 T_0 时间后的剩余能量为 E_2 ,有:

$$E_{2} = E_{1} - \sum_{i=1}^{6} P_{\text{Statusi}} \times T_{\text{Statusi}}$$
(3)

其中 T_{Statusi} 为 T_0 时刻内无线网卡位于 Statusi 工 作的总时间。

为充分衡量节点在网络中的寿命,不能仅使用 节点的剩余能量或平均剩余能量作为路由度量,因 为剩余能量较低的节点不一定是网络中最早死亡 的。若该节点在最近的 *t* 时刻内的平均能量消耗率 较低,则其预期工作寿命反而可能较长。因此,本 文提出将节点的预期寿命 *L*_p 作为均衡能量协议的 路由度量,其计算方式如式(4)所列:

$$L_{\rm p} = \frac{E_2}{P_{\iota}} \tag{4}$$

其中 P_t 为节点网络设备在最近t时刻内的平均功率:

$$\overline{P}_{t} = \frac{\sum_{i=1}^{6} P_{\text{Statusi}} \times T_{\text{Statusi}}}{t}$$
(5)

t时刻的选取十分重要,因为无人机自组网的 节点移动速度很快,节点在网络拓扑中的地位与其 实时能量消耗状态也变化很快,选取过大或过小的t 都不能准确反映节点近期的能量消耗状况,因此也 无法准确的预测节点寿命。

由于节点在网络中的拓扑变化概率与自身的 移动速度是成正相关的,高速移动的节点所在的通 信链路更容易断裂,导致形成新的拓扑结构,节点 的能量消耗率也会改变。因此,高速节点越久,之 前的能量消耗率就越没有参考价值。相反,低速节 点拓扑比较稳定,其能量消耗率在较长一段时间内 也比较恒定,选取更大的 t 计算出的平均功率可以 更准确的反映该节点的能耗情况。本文选取节点 通信的总时刻 T 作为节点固定(速度为0)时选取 t 的参考基准,考虑到无人机以 10 m/s 及以下速度运 动时网络拓扑较为稳定,本文选取 10 m/s 作为速度 梯度来衡量 t,若当前节点的移动速度为 v,则选取 计算平均功率的时间段 t,如式(6)所示:

$$t = \frac{T}{1 + \frac{v - v \mod 10}{10}}$$
(6)

其中, v mod 10 表示速度 v 对 10 取余。

2.2 改进路由算法

基于 AODV 协议在无人机场景下未考虑节点 能耗,存在网络能耗不均衡的问题,提出一种改进 的无人机自组网跨层能源优化协议,通过引入综合 考量物理层能源消耗率与网络层跳数最小化的预 期寿命路由度量,使协议在路由选择时充分考虑节 点的能量消耗属性,进一步降低网络总能耗,延长 网络寿命。

2.2.1 路由度量的计算

当各节点的无线网卡开始工作后,会不断记录 其工作状态及该状态持续的起止时间戳,并周期地 计算自身的预期寿命度量,其计算流程为:1)节点 通过当前移动速度与网卡工作的总时间根据式(6) 计算出预估平均功率的时间区间 *t*;2)在当前时刻 前 *t* 时间段内,查找并统计各工作状态的持续时间, 根据式(5)计算出该时间段内的平均功率;3)根据 式(3)计算节点的当前剩余能量,再由式(4)计算出 预期寿命度量。

2.2.2 路由发现

重构协议的详细路由发现流程如图3所示。具 体的,在RREQ, RREP 消息包与路由表中, 添加最小 预期寿命字段,记录各节点预期寿命的最小值。当 节点有通信需求却没有到达目的地址的有效路由 时,会开启路由发现过程,洪泛广播带有源节点预 期寿命字段的 RREQ。当中间节点收到 RREQ 请求 时,会进行两个操作:首先计算当前节点的预期寿 命,并与RREQ 记录的最小预期寿命字段比较,按 照图 3(b)的流程更新该字段。其次判断是否转发 RREQ,若节点第一次收到相同源节点同一次路由 请求中广播的 RREQ,则继续转发,并记录更新后的 链路预期寿命最小值到本地路由表中;若非第一次 收到,则比较该 RREQ 的预期寿命最小值字段与当 前节点路由表所记录的预期寿命最小值字段,若 RREQ 字段值较大,则更新该值到路由表中并继续 转发,反之则丢弃。

重构的路由发现流程选择了最小预期寿命值 较大的链路,避免了经典协议选择的路径中存在能 量即将耗尽节点的情况。但需要注意的是,节点在 比较 RREQ 能量字段的时候,来自同一源节点请求 的跳数不能比最小跳数多2跳以上,超出跳数限制 的 RREQ 会被丢弃。若不对跳数做限制,会导致 RREQ 在网络中的大规模洪泛,造成网络拥塞和]开

销增大,这与经典协议的初衷是相违背的。



(b) 更新RREQ预期寿命度量字段的流程

图 3 重构协议的路由发现流程

Fig. 3 Refactor routing discovery process of AODV protocol 2.2.3 路由回复

改进协议的路由回复流程与原来类似,当目的 节点第一次收到源节点发送的 RREQ 后,立刻按其 传播时所建立的反向路由向源节点单播发送路由 回复 RREP。不同的是,若目的节点收到了多条 RREQ,允许其向源节点回复多个 RREP,后接收到 的 RREQ 代表着可能不是最小跳数,但能量度量较 好的路径,因此再次回复的 RREP 可以建立一条均 衡能量的正向路由。

此外,为最小化等待时间,源节点在接收到第 一个 RREP 之后开始发送数据包。如果稍后接收到 具有更好度量的其他 RREP,则使用更好的路由来 更新源节点的路由表,新的路由也将用于后续的数 据包传输^[9]。

3 仿真及结果分析

3.1 仿真环境

本文针对提出的路由度量及完整的路由协议, 在开源网络仿真器(network simulator 3, NS-3)中进 行了实现,所使用的软件版本与实验环境分别为 NS-3.29 和 Ubuntu 18.04。为了验证均衡能量路由 相较于 AODV 协议的性能提升,本文建立了一个由 50 个节点所组成的组网系统,其初始随机分布在一 个 700 m × 700 m 的矩形区域内,如图 4 所示。



图 4 无人机节点初始位置分布

Fig. 4 Initial position distribution of UAV nodes

使用 OnOffApplication 和 PacketSink 分别配置 了应用层的数据收发,使 0~9 号节点持续地向 10 ~19 号节点以恒定的比特流生成数据流量。除了 节点的网络层分别使用经典 AODV 协议与改进协 议以外,其余的协议与仿真参数设置如表 1 所列。

表1 NS-3 仿真平台参数设置

Tab. 1 Parameters o	f NS-3	simulation	platform
---------------------	--------	------------	----------

仿真参数	参数值	
仿真时间	100 s	
仿真流量源	CBR	
分组发送速率	$20480\mathrm{bit/s}$	
分组大小	64 Bytes	
MAC 协议	802. 11b	
传输层协议	UDP	
节点移动模型	随机路点模型	
节点移动速度	$0 \sim 100 \text{ m/s}$	

改进协议重新定义了路由度量,主要在节点开 始组网与路由失效重建时起作用,因此选择在无人 机节点移动速度较大的场景下进行仿真,此时网络 拓扑快速变化,源节点会更加频繁地重新选择剩余 寿命较大的路径,改进协议的优势更加突出。

此外,由于路由控制包的传输也会消耗能量, 应用层要选择较高的数据传输速率以保证节点正 常通信,其消耗能量占总能耗的比重较大,若控制包 的能耗占主导地位,协议即使重新选路,均衡能量的 效果也不明显^[10]。因此,本文选取了 20480 bit/s 的 应用层速率。

各无人机节点的无线网卡能耗功率默认值参 考了文献[11]给出的实验测量结果,不同传输速率 的无线网卡,其相同状态的功耗相似。物理层各状 态对应的功率分别为: $P_{tx} = 1.14$ W(以 0 dbm 发 射), $P_{rx} = 0.94$ W, $P_{idle} = 0.82$ W, $P_{sleep} = 0.10$ W, 默 认信道的 CCA 繁忙状态与空闲状态功率相同,即 $P_{cca} = 0.82$ W。考虑到在 NS-3 的能源模型 BasicEnergySource 中,默认的电源电压为 U = 3.0 V, 因 此在 WifiRadioEnergyModel 中各状态的电流分别初 始化为: $I_{tx} = 380$ mA, $I_{rx} = 313$ mA, $I_{idle} = I_{cca} =$ 273 mA, $I_{sleep} = 33$ mA。在仿真过程中, WifiRadioEnergyModel 会对物理层的状态进行持续监听,对于每 一段能量消耗,该模型都会通知 EnergySource 对象, 在 EnergySource 对象中根据总电流与状态持续时间 计算消耗的能量以及其他度量^[12]。

3.2 仿真结果

为了获得吞吐量、端到端时延、分组投递率、开 销等仿真结果,本文使用了 NS-3 的 pcap 追踪系统, 将整个仿真过程中统计的分组传输信息全部保存 在各节点的 pcap 文件内。仿真结束后,使用 tcpdump 对各节点的 pcap 文件进行抓包,并配合 gawk 进行文本分析处理,统计了使用不同路由协议时的 网络性能^[13]。

为验证改进协议对节点能量消耗情况的影响, 本文设计了以下两组实验:

1)设置所有节点的初始能量为 5000 J, 仿真持续 100 s, 为了在较短的仿真时间内更加清晰地显示 网络节点的能量分布情况, 在配置能量模型时把所 有状态的工作电流都同比例增大了 5 倍, 观察仿真 结束时各节点的剩余能量分布情况, 如图 5 所示, 通 过改变随机数种子进行多次仿真, 节点的剩余能量 均值与方差分布如图 6 所示。从图 5 、图 6 中可以 观察到, 改进协议的节点剩余能量普遍高于原协 议, 仿真时间内 网络的总能耗相比原来降低了 12%。各个节点的剩余能量分布更加平均, 节点剩 余能量的最大值与最小值差距减小,能量分布的方差比原协议降低了17%。其原因为新的动态能源度量充分考虑了链路中各节点的预期寿命,有效避免了个别节点的负载过度,均衡了负载过大与负载过小节点的能量消耗。同时,缓解了网络拥塞,减少了分组丢失与重传,降低了每个通信请求的传输总能耗。











仿真持续时间内,在所有接受节点的套接字端 统计了应用层流量,并计算总和得到了网络吞吐 量,其随时间的变化曲线如图7所示,由于网络吞吐 量波动较大,绘图时采用了 gnuplot 的 bezier 数据平 滑方式进行曲线拟合。仿真起始时各节点开始建 立路由并进行通信,吞吐量不断增大,当趋于稳定 时,改进协议的网络吞吐量约比经典协议提升了 13%,这是因为改进协议避免了能耗较大,可能导致 网络拥塞的节点,从网络层降低了信道竞争和链路 质量较差导致的分组丢失。



图 7 仿真 100 s 内改进协议与原协议的网络吞吐量变化 Fig. 7 Throughput between improved protocol and AODV during 100 s' simulation

此外,本文从10组中选择了3组通信质量有明 显差距的通信链路进行跟踪,分别为3~13,5~15, 7~17号节点构成的链路。使用NS-3的flowmonitor 模块测量了3组链路的端到端时延与丢包率情况, 分别如图8(a)和图8(b)所示。





从仿真结果可看出,无论通信链路的稳定性如 何,改进协议均降低了源节点与目的节点的端到端 时延与丢包率:在链路不稳定时,由于改进协议减 少了网络拥塞节点导致的分组传输延迟,端到端时 延可降低达 30 ms 以上;丢包率平均可降低 10% 左 右,直接导致了网络的总吞吐量提升。

2)设置所有节点初始能量为1000J,仿真持续 100s,观察节点存活率随时间变化,结果如图9所 示。其中,改进协议的节点首次死亡时间较原协议 有所延后,网络的有效寿命得以延长,且改进协议 的节点存活率始终高于原协议,仿真结束时,改进 协议的节点存活率比原协议提升了18%。新的路 由度量在一定程度上对快速拓扑变化网络起到了 节能与能量均衡的作用。



图 9 仿真 100 s 改进协议与原协议的节点存活数曲线 Fig. 9 The node survival curve between improved protocol and AODV during 100 s' simulation

4 结论

本文根据无人机节点物理层的能源消耗率,提 出了一种基于预期寿命路由度量的自组网跨层能 源优化路由协议。改进协议综合考虑了最小跳数 与节点能耗因素,重新定义了路由度量,引入新度 量后节点选择了预期寿命较大的链路,避免了过早 出现能量不足而导致的链路失效与路由修复。仿 真结果表明:在无人机节点高速移动的情况下,网 络各节点负载得到了均衡,能量分布方差降低了 17%。随仿真进行,节点剩余能量分布更加平衡,有 效减缓了个别节点过早能源耗尽的情况,节点最终 存活率提升了18%。此外,新协议对网络的整体性 能也有所提升,其中网络总能耗降低了12%,吞吐 量和分组投递率平均提升了10%左右,当链路不稳 定时,端到端时延可提升30 ms 以上。

参考文献:

 SRIVASTAVA A, PRAKASH J. Future FANET with application and enabling techniques: Anatomization and sustainability issues [J]. Computer Science Review, 2021, 39:100359.

- [2] 余旭涛,毕光国,张在琛.一种均衡流量的 Mobile Ad Hoc 网络能量路由选择方法[J]. 电子与信息学报, 2004,26(12):1965-1971.
- [3] WOO K, YU C S, LEE D M, et al. Non-blocking, localized routing algorithm for balanced energy consumption in mobile ad hoc networks [C]//MASCOTS 2001, Proceedings Ninth International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, 2001:117-124.
- [4] CAO J L,ZHANG Z X, PEI T R, et al. Modified energy-aware AODV routing for ad hoc networks [C]// 2009 International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, 2009:466-468.
- [5] SRIDHAR S, BASKARAN R, CHANDRASEKAR P. Energy supported AODV (EN-AODV) for QoS routing in MANET[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013,73(1):294-301.
- [6] ER-ROUIDI M, MOUDNI H, MOUNCIF H, et al. A balanced energy consumption in mobile ad hoc network [J].
 Procedia Computer Science, 2019, 151(2):1182-1187.
- [7] SAINI T K, SHARMA S C. Recent advancements, review

analysis, and extensions of the AODV with the illustration of the applied concept [J]. Ad Hoc Networks, 2020, 103 (6):102148.

- [8] 王悦. NS-3 802.11 物理层源代码实现原理分析[J]. 计算机科学,2016,43(S1):281-284 + 313.
- [9] JEVTIC N, MALNAR M. Implementation of ETX metric within the AODV protocol in the NS-3 simulator[J]. Telfor Journal, 2018, 10(1):20-25.
- [10] 门涛,洪宇,吴宗清.基于无人机的通信网络组网技术 [J].空间电子技术,2021,18(1):75-79.
- [11] HALPERIN D, GREENSTEIN B, SHETH A, et al. Demystifying 802. 11n power consumption [C]// Proceedings of the 2010 international conference on Power aware computing and systems (HotPower10), 2010.
- [12] SAMO S D, FENDJI J L E K. Evaluation of energy consumption of proactive, reactive, and hybrid routing protocols in wireless mesh networks using 802. 11 standards
 [J]. Journal of Computer and Communications, 2018, 6 (4):1-30.
- [13] 马春光,姚建盛. NS-3 网络模拟器基础与应用[M]. 北 京:人民邮电出版社,2014.

作者简介:陈不了(1997-),硕士研究生,主要研究方向为无线自组织网络。E-mail:624406829@qq.com 通讯作者:冯熳(1979-),副教授,博士,主要研究方向为信号与信息处理。E-mail:fengman@seu.edu.cn