

机会网络中基于博弈论的节能信标控制策略

崔建群^{1,2},余心怡¹,常亚楠¹,张佳宁¹,万钰涵¹

¹(华中师范大学 计算机学院,武汉 430079)

²(华中师范大学 人工智能与智慧学习湖北省重点实验室,武汉 430079)

E-mail:jqcui@126.com

摘要:机会网络中,由于大部分终端设备的可用能源有限,如何在数据传输过程中有效地节省能源成为提升网络性能的关键.本文提出一种基于博弈论的节能信标控制策略 GTEEB (A Game-Theoretic Energy-Efficient Beaconing Strategy). 该策略构建基于节点收益的博弈模型并利用纳什均衡理论动态调整节点的信标频率,推导出节点选择信标频率的能耗阈值,平衡节点在高、低频信标下的能量消耗与通信机会.同时引入节点自主决策机制使节点能够依据周围环境状态自适应地调节信标频率,实现不同信标频率下的能量消耗与通信概率之间的平衡,有效降低整体网络能耗.仿真实验结果表明,与 ST-Prophet、EASE 和 TLEE 等节能方案相比,GTEEB 策略能够在保证网络连通性和数据传输质量的同时降低能耗,延长网络平均寿命.

关键词:机会网络;博弈论;信标控制;节能路由

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-1220(2026)05-1256-08

Game Theory-based Control Strategy for Energy-efficient Beacons in Opportunistic Networks

CUI Jianqun^{1,2}, YU Xinyi¹, CHANG Yanan¹, ZHANG Jianing¹, WAN Yuhuan¹

¹(School of Computer Science, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

²(Hubei Key Laboratory of Artificial Intelligence and Intelligent Learning, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract:In opportunistic networks, due to the limited available energy of most terminal devices, how to effectively conserve energy during data transmission has become key to enhancing network performance. This paper proposes an energy-efficient beaconing strategy based on game theory, named GTEEB (A Game-Theoretic Energy-Efficient Beaconing Strategy). The strategy constructs a game model based on node benefits and dynamically adjusts the beacon frequency of nodes using Nash equilibrium theory, deducing an energy consumption threshold for node beacon frequency selection. This balances the energy consumption and communication opportunities of nodes under high and low beacon frequencies. It also introduces a node autonomous decision-making mechanism, enabling nodes to adaptively adjust their beacon frequency according to the surrounding environmental state. This achieves a balance between energy consumption and communication probability at different beacon frequencies, thereby effectively reducing overall network energy consumption. Simulation results show that compared with energy-saving schemes such as ST-Prophet, EASE, and TLEE, the GTEEB strategy can significantly reduce energy consumption and extend the average network lifetime while ensuring network connectivity and data transmission quality.

Keywords: opportunistic networks; game theory; beacon control; energy-efficient routing

0 引言

随着智能物联网在动态环境中的规模化部署,节点能量约束与通信性能的平衡问题日益凸显.机会网络通过利用节点移动性实现间歇式连接,其自组织特性虽然能够适应网络拓扑变化,但节点持续的信标探测机制导致能量损耗悖论出现:短周期信标(100~500ms)虽能提升邻居发现概率,却使设备续航时间缩短^[1];而长周期信标(2~5s)虽可降低设备能耗,但会造成有效通信机会丢失^[2].在医疗传感网、灾害应急通信等关键场景中,能量效率与传输效率的强耦合关系尤

为突出.

在动态能源管理领域,多类场景已验证自适应策略的有效性.例如,微电网系统通过动态规划算法预测光伏发电与负载需求,全局优化长期能源调度以最小化成本^[3];电动汽车充电站基于智能因子动态分配充电功率,平衡用户需求与电网容量^[4].这些方法表明,动态调整与多目标优化是实现能效提升的关键.然而,机会网络的移动性与资源受限特性要求更轻量化的分布式策略.博弈论通过建模节点间的协作与竞争关系,为动态信标控制提供了新视角:节点间的信标策略博弈可建模为不完全信息下的重复博弈过程^[5],通过设计合理

收稿日期:2025-04-19 收修改稿日期:2025-05-22 基金项目:国家自然科学基金面上项目(62272189,62372206)资助. 作者简介:崔建群,女,1974年生,博士,教授,博士生导师,CCF会员,研究方向为机会网络、物联网、移动网络和应用层组播等;余心怡,女,2001年生,硕士研究生,研究方向为延迟容忍网络、社交网络和无线通信等;常亚楠(通信作者),女,1984年生,博士,副教授,CCF会员,研究方向为无线 mesh 网络、延迟容忍网络和社交网络等;张佳宁,女,2001年生,硕士研究生,研究方向为车联网、社交网络和无线通信;万钰涵,女,2001年生,硕士研究生,研究方向为车联网、社交网络和无线通信等.

的效用函数能够实现纳什均衡状态下的帕累托最优^[6]。但现有博弈模型大部分简化了能量状态转移过程,没有深入研究电池放电非线性特性对策略稳定性的影响^[7],以上为本文研究提供了新的切入点。

本文的主要贡献如下:

1) 提出基于博弈论的节能信标控制策略(GTEEB),该策略构建节点收益模型并利用纳什均衡原理动态调整节点的信标频率。在保证网络连通性的前提下达到能量消耗与通信机会的全局平衡,使网络能效大幅提升。

2) 设计基于环境感知的节点自主决策机制:该机制使节点能够根据剩余能量、邻域密度和移动速度等多维环境信息并自适应调节信标频率。为避免复杂计算带来的额外开销,在能量充足时优先高频信标提升通信概率,在能量不足时降低频率节省能耗。

3) 提出基于纳什均衡的动态能耗阈值推导方法:博弈模型让节点信标频率的选择与全局能效达到稳定的耦合关系,在保证个体能耗可控的同时实现网络整体能效与通信机会的最优权衡。

本文主要分为5个部分,第1部分阐述机会网络相关背景知识,介绍了机会网络领域的相关研究,说明现阶段研究存在的不足,引出本文所提算法对现有缺点的解决思路;第2部分为模型概述,介绍了节点间博弈使用的节点收益模型和通信概率模型;第3部分对所提路由协议进行了详细说明,包括节点博弈阶段和自主决策阶段;第4部分为实验与分析,介绍了评估指标以及仿真实验相关参数设置,对所提路由算法进行仿真实验和对比分析;第5部分对GTEEB算法进行总结并展望后续研究方向。

1 背景及相关工作

1.1 机会网络能耗问题

机会网络利用节点之间的偶遇机会进行数据传输,无需依赖于固定的网络基础设施,适用于应急通信、移动社交网络等多种应用场景。

在大多数机会网络应用场景中,终端节点的能量受到严格限制。例如,在用于野外环境检测和野生动物监测的无线移动传感器网络中,单个终端节点是动物携带的传感器设备。传感器节点之间的数据传输形成机会网络。由于传感器设备大部分时间都无法补充能量,因此节点面临着非常严重的能耗问题。此外,在移动社交网络或袖珍交换网络中,移动用户持有的个人通信设备往往能量有限。因此,无论是基于复制的路由协议,还是基于概率转发的路由协议,都需要考虑能源问题^[8]。一般来说,节能算法的目的是减少传递开销,同时最大限度地提高消息传递率。目前可行的解决方案是在不降低传输效率的情况下降低能耗,从而延长使用寿命,从而最大限度地提高网络在传输方面的性能^[9]。

1.2 相关工作

DTN的能耗主要源自两方面:数据传输和通信机会的发现。近年来,许多学者针对数据传输的能耗问题提出了多种优化策略。多目标优化方法在微电网电源配置中展现出平衡经济性、可靠性与环保性的潜力。例如,鲸鱼算法^[10]通过动态能

源管理策略优化电源配置,启示了节点协作中的多维度指标协同优化可能。DuoJoule框架^[11]通过动态调整频率和批量大小等训练参数,结合DVFS和早期退出机制,实现了计算密集型任务的能效优化。Eshghi等学者^[12]提出动态的、依赖于能量的转发策略,以平衡能量消耗和服务质量。作者证明了在平均场近似下,最佳的动态转发决策可以简化为基于阈值的规则。

Das等学者^[13]提出的SECA算法解决MIA-DTN中的能量消耗问题。SECA采用阈值控制,确保消息仅被转发给剩余能量充足的节点来优化能量使用。

Singh等学者^[14]提出针对DTN的自适应能量感知通信层,自动调整节点的唤醒间隔并计算剩余寿命,根据当前能量消耗率和包转发比率来管理节点的活动与非活动状态。

Zhao等学者^[15]提出灾后矿井物联网网络的DEOR算法。该算法定义转发区域来控制数据包向接收端的定向传输,构建候选转发集合时考虑节点的能量状态和邻近度,优选具有较高能量和更多邻居的节点参与转发。

Sharifi等学者^[16]提出的ACRP自适应集群式路由协议,采用基于成员的动态聚类方法并扩展集群头节点的无线电范围,将间歇性连接的机会网络转换为类似TCP/IP的网络结构,有效改善了数据传输准确程度。

Fu等学者^[17]提出引入基础设施节点如基站和充电站的ST-Prophet算法,基础设施节点能够辅助消息转发和无线能量补给,实现稳定连接和节点能量快速恢复。

文献[18]提出,多GPU系统的能耗优化需结合任务调度与资源分配策略。例如,sBET-mg框架^[19]通过离线任务分配和运行时迁移,减少截止时间错过率并降低能耗。这一思路可映射到机会网络中,通过节点间的协同调度优化整体能效。文献[20]则通过构建GPU任务的能耗预测模型,验证了SM分配优化对能耗的显著影响,表明精准的能耗建模是实现节能策略的关键基础。为此本文提出基于博弈论的节能信标控制策略GTEEB。在该策略中,节点收益博弈模型利用纳什均衡原理动态调整信标频率,解决静态策略适应性不足的缺陷;轻量化的自主决策机制结合节点剩余能量、邻域密度与移动速度等多维环境信息实现动态调节,避免复杂计算带来的额外开销。有望解除现有方法在动态适应性、计算开销与全局协同方面的局限,为机会网络的节能与高效通信提供新思路。下文将从模型设计、算法实现与实验验证3部分展开详细阐述。

2 模型概述

为量化节点信标行为对能耗与通信效率的影响,本文定义了关键参数以描述节点状态、通信概率及博弈策略的数学关系。文中使用的主要符号及其对应的含义如表1所示。

2.1 信标广播模型

图1描述了两个节点之间建立连接的通信过程:节点 n_i 通过定期广播信标来宣布自己的存在,节点 n_j 监听信标以发现附近的节点。节点 n_j 发现了节点 n_i 的信标后,向节点 n_i 发送扫描请求。节点 n_i 收到扫描请求后,发送扫描响应给节点 n_j ,提供更多信息,确认可以建立连接。节点 n_j 发送连接请求,

表1 符号说明
Table 1 Symbol description

符号	意义
H	高频模式下信标频率
L	低频模式下信标频率
T	节点维持当前信标频率的周期时长
λ_e	节点相遇时间间隔服从指数分布参数
N	网络中节点总个数
E_{rem}	节点当前剩余可用能量
ΔE	节点在一个周期选择高频信标比选择低频信标增加的能耗
E_{beacon}	节点发射一次信标消耗的能量
r	低频转到高频带来的额外能耗占比
r_{up}	能耗阈值,若 $r > r_{up}$ 节点切换低频模式
r_{down}	能耗阈值,若 $r < r_{down}$ 节点切换高频模式
p_{high}	节点在自主决策阶段选择高频信标的概率
p_{low}	节点在自主决策阶段选择低频信标的概率
$u(f)$	节点选择信标频率 f 时的期望收益
$P_{enc}(N)$	节点在一个 T 周期内遇到其余 $N-1$ 个节点中至少一个的概率
p_m	两节点 T 周期内的不相遇概率
$p_c(f_i, f_j, N)$	信标频率为 f_i 的节点能与信标频率为 f_j 的 $N-1$ 个节点中的至少一个节点通信的概率
$P(f_1, f_2)$	节点处于 f_1 信标频率时与信标频率为 f_2 的节点通信平均概率
$P(f_1, f_2, N)$	节点处于 f_1 信标频率时与 N 个信标频率为 f_2 的节点通信概率

请求与节点 n_i 建立通信连接. 节点 n_i 接受连接请求, 连接建立, 双方准备进行数据传输. 连接成功建立后, 两节点开始进行数据交换. 以上为信标广播到连接建立再到数据交换的完整流程.

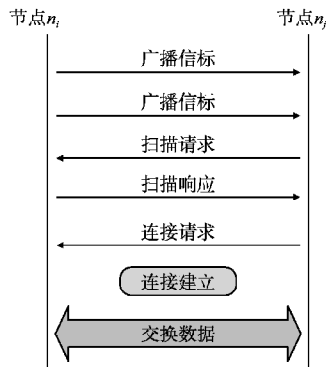


图1 广播信标-连接建立过程

Fig. 1 Broadcast beacon-link building process

2.2 节点收益模型

节点在一个周期内期望获得的收益决定了其在该周期内选择何种信标频率, 在机会网络环境下, 节点的信标频率直接影响其能耗与通信能力. 一方面, 高频信标能够增加节点发现潜在通信伙伴的机会, 从而提高数据包的成功传输率; 另一方面, 频繁的信标发射也会消耗更多的能量, 特别是在电池供电受限的场景下, 这可能导致节点提前耗尽能量而失效. 为此建立数学模型量化节点在不同信标频率下的收益:

定义1. 节点归一化能耗. 节点的归一化能耗是指在此周期节点选择高频信标增加的额外能量消耗占自身剩余可用能量的比值, 记为 r , 如公式(1)所示:

$$r = \begin{cases} \frac{\Delta E}{E_{rem}}, & E_{rem} \geq \Delta E \\ 1, & E_{rem} < \Delta E \end{cases} \quad (1)$$

其中 E_{rem} 表示节点当前剩余能量, ΔE 表示节点在一个周期选择高频信标比选择低频信标多出的能耗, 如公式(2)所示:

$$\Delta E = E_{beacon} \cdot (H - L) \cdot T \quad (2)$$

其中 E_{beacon} 表示一次信标发射消耗的能量.

定义2. 节点期望收益. 节点选择信标频率 f 时的期望收益记为 $u(f)$, 如公式(3)所示:

$$u(f) = \begin{cases} (1-r) \cdot p_c(H), & f=H \\ 1 \cdot p_c(L), & f=L \end{cases} \quad (3)$$

其中 $P_c(f)$ 表示信标频率为 f 的节点与其他节点通信的概率. 当 $f=L$ 时意味着节点选择低频信标, 此时节点收益等于它和其它节点的通信概率; 当 $f=H$ 时意味着节点选择高频信标, 此时节点收益需要扣减高频带来的额外能耗占比, 即减去归一化能耗比 r 乘以节点通信概率 $P_c(H)$ 的积.

当 $E_{rem} < \Delta E$ 时, $r=1, u(H)=0$, 这意味着节点的剩余能量无法承受高频信标, 此时节点收益为0.

2.3 节点通信概率模型

在机会网络中节点的移动和通信行为通常随机且不可预测, 由此建立节点通信概率模型以量化节点在不同信标频率下的相遇和通信机会. 在此模型中, 节点之间的相遇被视为泊松过程, 节点的信标频率直接影响其与其他节点通信的概率^[21].

已知指数分布描述的是独立随机事件之间的时间间隔, 其中 λ 代表事件发生的速率, 即单位时间内事件发生的平均次数. 当一个过程中的事件发生遵循泊松分布时, 事件之间的间隔时间就遵循指数分布^[22].

根据指数分布的无记忆性可知, 每一次两个节点相遇都可以视作泊松过程中的一个事件, 两次相遇之间的过程可视为泊松过程的累加. 因此两个节点的相遇间隔时间被认为服从参数为 λ 的指数分布, 即每次相遇事件发生的速率为 λ .

令网络中节点总数为 N , 且各节点信标周期同步. 首先求得节点在时长为 T 的周期内遇到其余 $N-1$ 个节点中至少一个的概率 $P_{enc}(N)$, 如公式(4)所示:

$$P_{enc}(N) = 1 - p_m^{N-1} = 1 - (e^{-\lambda_e T})^{(N-1)} \quad (4)$$

公式(3)中, $p_m = e^{-\lambda_e T}$ 为 T 时间内两节点彼此不相遇的概率, $(e^{-\lambda_e T})^{(N-1)}$ 为 T 时间内当前节点与其它 $N-1$ 个节点全部不相遇的概率. λ_e 为特定指数分布的参数. 相遇的两个节点 n_i, n_j 的信标频率分别为 f_i 和 f_j , 则它们的通信概率为 $\lambda_e \cdot f_i \cdot f_j$. 基于以上推导, 提出定义3如下:

定义3. 节点通信概率. 信标频率为 f_i 的节点能与信标频率为 f_j 的 $N-1$ 个节点中的至少一个节点通信的概率, 记为 $p_c(f_i, f_j, N)$, 如公式(5)所示:

$$p_c(f_i, f_j, N) = 1 - (e^{-\lambda_e f_i f_j T})^{(N-1)} \quad (5)$$

节点通信概率 $p_c(f_i, f_j, N)$ 通过量化信标频率与网络拓扑动态性的关联, 揭示了节点在不同信标策略下的通信能力.

指数项 $e^{-\lambda \delta f_j T}$ 表示信标频率分别为 f_i 和 f_j 的两个节点在周期 T 内不相遇的概率,而 $(e^{-\lambda \delta f_j T})^{(N-1)}$ 则进一步扩展为当前节点与全部 $N-1$ 个邻节点均不相遇的概率.因此, p_c 的取值直接反映了节点在特定信标频率下至少与一个邻节点建立通信的可能性.

3 基于博弈信标策略的机会网络节能路由

3.1 节点博弈阶段

节点信标博弈产生的原因是,当节点认为其它节点会选择高频信标时会更愿意切换到低频信标.因此每个节点 n_i 都会与其它 $N-1$ 个节点进行博弈,形成集合 $n_{-i} = \{n_1, n_2, \dots, n_{i-1}, n_{i+1}, \dots, n_N\}$.在此前提下,其余所有节点 n_{-i} 切换到低频的概率为 p_i^{N-1} ,至少有一个节点选择高频信标的概率为 $1 - p_i^{N-1}$.

3.1.1 不同情况下的节点通信概率

首先讨论节点 n_i 选择高频 H 的情况.假设其余 $N-1$ 个节点中有 k 个选择高频, $0 \leq k \leq N-1$. n_i 在其信标周期,与 k 个 H 节点中的至少一个进行通信的概率: $P(H, H, k) = 1 - (e^{-\lambda e^{HHT}})^{(k)}$.同理可得 n_i 与 $N-1-k$ 个 L 节点中的至少一个进行通信的概率: $P(H, L, N-1-k) = 1 - (e^{-\lambda e^{HLT}})^{(N-1-k)}$.

由于信标博弈对称,且全部节点所处频率状态均为自主决策.可以得到,在其余 $N-1$ 个节点中,处于高频的节点数量是一个均匀分布在 $[1, N-1]$ 上的随机变量,可计算平均概率如公式(6)和公式(7)所示:

$$P(H, H) = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} P(H, H, k)}{N-1} \quad (6)$$

$$P(H, L) = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} P(H, L, N-1-k)}{N-1} \quad (7)$$

存在特殊情况 $k=0$,此时其它 $N-1$ 个节点都在 L 中.因此,当 n_i 选择 H 时,在信标期间内与 $N-1$ 个低频节点进行通信的概率如公式(8)所示:

$$P(H, L, N) = 1 - (e^{-\lambda e^{HLT}})^{(N-1)} \quad (8)$$

同理可得节点 n_i 选择低频 L 时,在信标周期内与节点通信的平均概率如公式(9)和公式(10)所示:

$$P(L, H) = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} P(L, H, k)}{N-1} \quad (9)$$

$$P(L, L) = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} P(L, L, N-1-k)}{N-1} \quad (10)$$

与上述情况相同, $k=0$ 时,在信标期间内与 $N-1$ 个低频节点进行通信的概率如公式(11)所示:

$$P(L, L, N) = 1 - (e^{-\lambda e^{LLT}})^{(N-1)} \quad (11)$$

3.1.2 不同情况下的节点收益

1) n_i 选择高频 H ,其余 $N-1$ 个节点全部选择低频, n_i 的报酬为 $(1-r) \cdot P(H, L, N) \cdot p_i^{N-1}$:其中 $(1-r)$ 为扣减高频带来的额外能耗, $P(H, L, N)$ 为 n_i 选择高频 H 时与其余 $N-1$ 个低频节点通信的概率, p_i^{N-1} 为其余 $N-1$ 个节点全部选择低频的概率;

2) n_i 选择高频 H ,且至少存在一个节点选择高频时,其报酬为 $(1-r) \cdot (P(H, H) + P(H, L)) \cdot (1 - p_i^{N-1})$:其中 $(1-r)$ 为扣减高频带来的额外能耗, $(P(H, H) + P(H, L))$ 为 n_i

选择高频 H 时与其它节点的平均通信概率之和, $(1 - p_i^{N-1})$ 为至少存在一个节点选择高频的概率.

3) n_i 选择低频 L ,其它节点全部切换到低频时,其报酬为 $1 \cdot P(L, L, N) \cdot p_i^{N-1}$,由于节点选择低频,所以无需承担额外能量造成的收益损失.

4) n_i 选择低频 L ,且存在至少一个节点选择高频时,其报酬为 $1 \cdot (P(L, H) + P(L, L)) \cdot (1 - p_i^{N-1})$.表2展示了4种情况下的收益.

表2 节点收益

Table 2 Nodal gain

节点状态	$N-1$ 个节点选择 L	存在至少1个节点选择 H
高频 H	$(1-r) \cdot P(H, L, N) \cdot p_i^{N-1}$	$(1-r) \cdot (P(H, H) + P(H, L)) \cdot (1 - p_i^{N-1})$
低频 L	$1 \cdot P(L, L, N) \cdot p_i^{N-1}$	$1 \cdot (P(L, H) + P(L, L)) \cdot (1 - p_i^{N-1})$

当节点选择高频和低频信标带来的收益相同时,各节点收益存在纳什均衡,此时 $N-1$ 个节点都选择 L 时的归一化能耗 r_1 和存在至少一个节点选择 H 时的归一化能耗 r_2 满足如下等式:

$$\frac{(1-r_1) \cdot P(H, L, N) \cdot p_i^{N-1}}{1 \cdot P(L, L, N) \cdot p_i^{N-1}} = 1 \quad (12)$$

$$\frac{(1-r_2) \cdot (P(H, H) + P(H, L)) \cdot (1 - p_i^{N-1})}{1 \cdot (P(L, H) + P(L, L)) \cdot (1 - p_i^{N-1})} = 1 \quad (13)$$

由式(12)和式(13)解得 r_1, r_2 如下:

$$r_1 = 1 - \frac{P(L, L, N)}{P(H, L, N)}$$

$$r_2 = 1 - \frac{P(L, H) + P(L, L)}{P(H, L) + P(H, H)}$$

如果 $r < r_{down} = \min\{r_1, r_2\}$:

那么,节点 n_i 倾向于选择高频信标,因为能量充足,此时无论其他节点如何选择, n_i 都会获得固定收益.否则,如果 $r > r_{up} = \max\{r_1, r_2\}$:

此时,节点 n_i 更喜欢选择低频信标,因为能量即将枯竭,无论其它节点作何选择当前节点都无法得到更高收益.

r_{up} 和 r_{down} 是启动移动节点信标博弈的能量阈值.当 $r_{up} < r < r_{down}$ 时,节点收益不再仅仅与自身能耗有关,而且受到周围节点移动状态的影响,因此节点进入自主决策阶段.

3.2 自主决策阶段

节点的信标频率选择直接影响其能量消耗以及和其他节点的通信概率.节点在能量充足时倾向于选择较高的信标频率,以增加与其他节点通信的机会;而在能量不足时,节点为节省能量会选择较低的信标频率.但节点处于能量介于高低阈值之间的自主决策阶段时,单纯依赖能量消耗的策略已不再适用.此时节点需要综合考虑周围环境因素,动态调整信标频率从而在能量和通信需求之间寻找平衡.以下将详细探讨节点在自主决策阶段如何根据网络环境进行频率选择和调整策略.

3.2.1 不同环境感知与动态调节机制

在自主决策阶段,节点通过量化局部网络密度与动态性特征,自适应调整信标频率.关键参数及设计依据如下:

1) 节点分布密度(ρ)与密度阈值(ρ_{thre})

节点分布密度由当前通信半径内活跃节点数 N_{active} 与覆盖面积 $A_{cover} = \pi R^2$ ($R = 10$ m 为传输半径) 的比值确定, 即:

$$\rho = \frac{N_{active}}{A_{cover}}$$

该参数反映局部网络的拓扑密集程度. 当 $\rho > \rho_{thre}$ (密度阈值) 时, 判定当前区域为高密度状态, 需抑制高频信标以减少因高密度导致的信标冗余与信道冲突.

2) 邻域平均移动速度(ν)与速度阈值(ν_{thre})

邻域平均速度通过滑动窗口均值法实时更新, 统计通信范围内 k 个邻节点的瞬时速度 $\{v_1, v_2, \dots, v_k\}$:

$$\nu = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k v_i$$

该参数表征局部网络的拓扑变化速率. 当 $\nu > \nu_{thre}$ (速度阈值) 时, 判定邻域节点处于高速移动状态, 需提高信标频率以捕捉快速变化的通信机会.

定义 4. 信标切换概率. 节点决定切换到高频信标的概率记为 p_h , 如公式 (14) 所示:

$$p_h = \alpha \cdot f(\nu) + (1 - \alpha) \cdot g(\rho) \quad (14)$$

其中, 权重系数 $\alpha \in [0, 1]$, $f(\nu)$ 是移动速度函数, 描述周围节点平均移动速度对切换概率的影响, 如公式 (15) 所示:

$$f(\nu) = \begin{cases} \frac{\nu}{\nu_{thre}}, & \nu \leq \nu_{thre} \\ 1, & \nu > \nu_{thre} \end{cases} \quad (15)$$

$g(\rho)$ 是节点密度函数, 描述节点密度对切换概率的影响, 如公式 (16) 所示:

$$g(\rho) = \begin{cases} 1, & \rho \leq \rho_{thre} \\ \frac{\rho_{thre}}{\rho}, & \rho > \rho_{thre} \end{cases} \quad (16)$$

p_h 的计算综合考虑了附近节点移动速度和区域节点密度对选择信标频率的影响. 附近节点平均移速越大, 选择高频信标的概率越大, 因为节点移速过大时, 较低的信标频率会导致节点错过移速较大的节点的存在, 使双方失去宝贵的通信机会. 当前区域节点密度越大, 选择高频信标的概率越低, 因为节点密度较大时频繁广播信标会造成信标消息的大量重复, 此时选择较低的信标频率可以减少节点间的通信碰撞和信标的冗余广播, 如图 2 所示. 通过调整 α 的值, 可以平衡两者在切换概率中的权重.

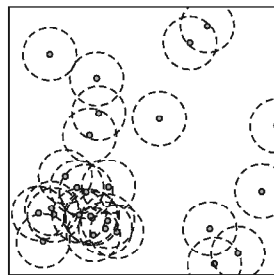


图 2 信标广播示意图

Fig. 2 Beacon broadcasting diagram

由于节点选择高频或低频信标互为对立事件, 所以选择低频信标的概率为: $p_l = 1 - p_h$.

3.2.2 GTEEB 信标控制策略

信标控制策略算法流程图如图 3 所示. 每个周期开始时, 根据节点当前的能耗比 $r = \frac{\Delta E}{E_{rem}}$ 和博弈纳什均衡求解出 r_{up} 、 r_{down} 将节点在当前周期的操作分为 3 种情况: 高频信标阶段 ($r < r_{down}$)、自主决策阶段 ($r_{down} < r < r_{up}$) 或低频信标阶段 ($r > r_{up}$). 当 $r < r_{down}$ 时, 说明节点当前剩余能量充足, 可以承担高频信标带来的额外能量消耗, 所以节点进入高频信标状态. 当 $r > r_{up}$ 时, 说明节点当前剩余能量不足以支撑高频信标带来的额外能量消耗, 所以节点进入低频信标状态. 当节点处于自主决策阶段时, 计算自身周围节点的平均移速与区域密度, 从而计算当前阶段节点选择高频或低频信标的概率 p_h 、 p_l . 由于低频节点大概率能量紧张且联通能力较弱, 所以优先让高频节点承担消息转发任务, 即无论节点当前处于何种状态, 都优先将消息转发给周围的高频节点. GTEEB 伪代码如算法 1 所示.

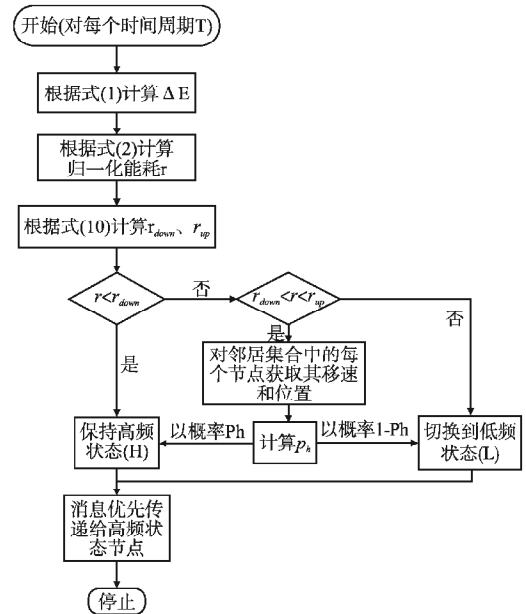


图 3 GTEEB 算法流程图

Fig. 3 Flowchart of the GTEEB algorithm

算法 1. GTEEB 信标策略

输入: 高频信标频率: H

低频信标频率: L

时间单位周期长度: T

单次信标发射能耗: E_b

节点当前剩余能量: E_c

网络中节点集合: $V = \{v_i | 1 \leq i \leq n\}$

节点 v_i 的邻居节点集合: NE

输出: 节点应切换的信标频率

1. Calculate the r_{up} and r_{down} for each node
2. for each node in V do
3. for each timeslot duration T do
4. Calculate ΔE by Eq. (2)
5. Calculate r by Eq. (1)

6. Calculate r_{up}, r_{down} by Eq. (12,13)
7. if $r < r_{down}$ then
8. else if $r_{down} < r < r_{up}$ then
9. for each node in NE do
10. Get information about their movement speed and position
11. Calculate p_h by Eq. (14)
12. switch to H with the probability of p_h
13. switch to L with the probability of $1 - p_h$
14. else if $r > r_{up}$ then
15. switch to L

在算法1中,1~6行表示在周期开始时计算 r, r_{up}, r_{down} 的值,7~8行表示 $r < r_{down}$ 节点进入高频信标阶段,14~15行表示 $r > r_{up}$ 时节点能源告急,进入低频信标阶段,9~13行表示 $r_{down} < r < r_{up}$ 时节点进入自主决策阶段,根据周围节点的移动与分布密度判断自己采用何种信标频率。

4 仿真结果及分析

为了验证 GTEEB 策略的高效性,本文实验采用 ONE 仿真平台,分别将 GTEEB 策略应用在经典的 Spray and Wait 路由与 Epidemic 路由,在相同实验环境下对路由能耗以及不同节点缓存空间下的消息投递率等性能进行了对比。为了充分说明 GTEEB 策略和相关算法的差异,选取原本的 Spray and Wait 算法、基于连接稳定性和节点相遇类型的能量回收算法 ST-Prophet、结合休眠机制的改进 Epidemic 节能路由算法 EASE 以及基于节点状态感知的交通灯路由算法 TLEE 作为比较对象,在结果方面选取节点平均能耗、消息投递率、平均时延、负载率等4个指标进行评估与分析。

4.1 仿真参数设置

仿真使用赫尔辛基市地图场景,节点之间通过蓝牙进行消息传输,实验所使用的仿真环境参数配置如表3所示。

仿真时间步长为0.1秒,即仿真中事件更新的频率。仿真的总时间为43200秒(12小时),覆盖典型城市交通的昼夜周期,包含高峰与低谷时段。消息的实际负载大小为500KB至1MB。节点间的通信距离为10米。消息在网络中的最大生存时间为300分钟。

移动模型选用 the ONE 仿真中基于地图的最短路径移动模型 ShortestPathMapBasedMovement,使用 Dijkstra 最短路径算法寻地图中到达目的的路径^[23]。

节点缓存消息的最大容量为5MB~30MB。参与仿真的节点数量 N 为126个。广播信标信息的频率包括高频10Hz和低频2Hz;信标周期即每轮博弈信标策略的时间单位 T ,设置为60秒。

指数分布参数 λ_e 经过多次实验收集节点相遇间隔时间数据,使用指数分布对统计得到数据进行建模并拟合得到, $\lambda_e = 0.5034$ 。

密度阈值 ρ_{thre} 用来判定节点当前所处是否为高密度区域。通过蒙特卡洛仿真优化,设定密度阈值范围 ($\rho_{thre} \in [0.05, 0.30] \text{ nodes/m}^2$),在高密度区间 ($\rho_{thre} \in [0.1, 0.25] \text{ nodes/m}^2$) 增加仿真次数,仿真不同密度阈值下的网络性能。通过大量随机实验,统计各密度下的平均投递率(如图4(a)所示)。当密度阈值等于 0.2 nodes/m^2 时,实验得到最高的平均

投递率,因此在仿真实验中设定密度阈值 $\rho_{thre} = 0.2 \text{ nodes/m}^2$ 。

表3 仿真环境参数设置

Table 3 Simulation environment parameterization

参数名称	参数值
时间间隔	0.1 s
仿真时间	43200s
消息传输速度	250kbps
节点移动速度	0.05m/s ~ 0.15m/s
消息大小	500KB ~ 1MB
传输半径	10m
消息生存周期	300min
移动模型	ShortestPathMapBasedMovement
场地大小	$4500 \times 3400 \text{m}^2$
消息缓存大小	5MB ~ 30MB
节点个数 N	126
指数分布参数 λ_e	0.5034
高频	10 Hz
低频	2 Hz
信标周期	60s
节点初始能量	4800J
信标发送消耗能量	0.1 J/s
信标接收消耗能量	0.1 J/s
消息传输消耗能量	0.2 J/s
待量机消耗能	0.01 J/s
ρ_{thre}	0.2 nodes/m^2
ν_{thre}	0.11 m/s
α	0.5

速度阈值 ν_{thre} 用来判定相邻节点是否处于高速移动状态。设定速度阈值范围 ($\nu_{thre} \in [0.05, 0.15] \text{ m/s}$),仿真不同速度阈值下的网络性能。通过大量随机实验,统计不同速度阈值下的平均投递率(如图4(b)所示)。当速度阈值等于 0.11 m/s

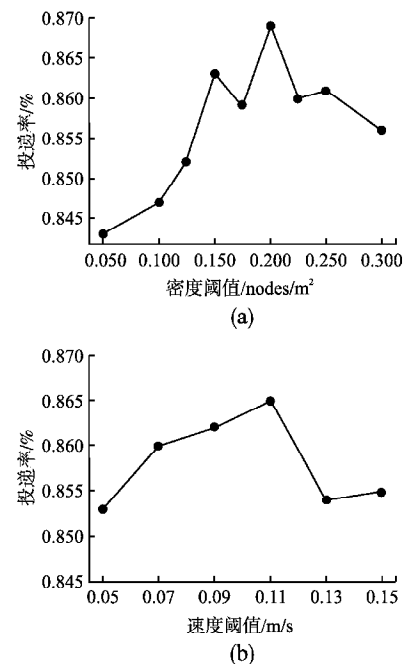


图4 不同条件阈值下算法性能比较

Fig.4 Performance comparison of algorithms under different threshold conditions

时,实验得到最高的平均投递率,因此在仿真实验中设定速度

阈值 $v_{thre} = 0.11 \text{ m/s}$. 为平衡节点分布密度和邻域节点移动速度对信标切换概率的影响, 权重系数 α 取值 0.5.

节点初始能量, 即节点在仿真开始时的能量储备, 参考主流物联网设备(如 LoRa 模组)的电池容量设为 4800J. 能量消耗参数包括信标发送消耗能量 0.1J/s; 信标接收消耗能量 0.1J/s; 消息传输消耗能量 0.2J/s; 待机消耗能量 0.01J/s, 这反映了节点处于待机状态时的能量消耗.

除了上述仿真环境参数, GTEEB 策略还需设置用于计算节点相遇间隔的概率分布参数 λ_e , 代表节点相遇的频率.

4.2 对比试验与分析

4.2.1 不同路由能量消耗对比

图 5 展示了 6 种算法节点的平均能耗随时间变化的表现. 其中使用 GTEEB 策略的 Spray and Wait 路由和 Epidemic 路由, 节点能量消耗速度大幅降低. 与同为节能路由的 ST-Prophet、EASE 和 TLEE 相比, 使用 GTEEB 策略的路由节点能量消耗速度降低了 43.85% ~ 50.64%, 有效延长了网络的

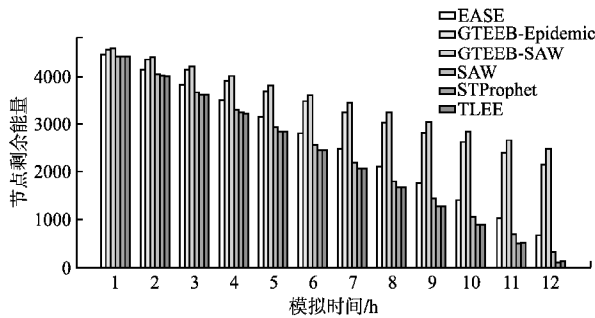


图 5 不同算法能量消耗对比

Fig. 5 Comparison of energy consumption of different algorithms

平均寿命. 因为 GTEEB 根据节点的剩余能量动态调整信标频率. 当节点能量较低时, 会选择较低频率的信标, 从而减少能量消耗. 这种智能化的能量管理机制确保节点不会在能量

不足时仍然消耗大量资源来发射高频信标, 避免了过早的电池耗尽. 在密集网络环境中, 高频信标广播可能导致大量的冗余消息. 该算法允许节点根据当前的网络环境动态调整信标频率. 当节点处于高密度区域时, 会选择较低频率的信标, 减少了节点在同一区域内重复发现邻居的次数, 从而降低了整体信标发送的频率和能耗.

实验还发现, 在同等条件下, Spray and Wait 路由的能量消耗速率相较 Epidemic 路由减少近 13%. 原因是 Spray and Wait 路由在等待阶段不再进行消息的复制和扩散, 而 Epidemic 路由在整个传递过程中大量进行消息副本的复制和传递, 增加了消息传输部分的能量消耗.

4.2.2 不同路由投递性能对比

图 6(a) 为投递率对比. 其中使用 GTEEB 策略的 Spray and Wait 算法比原始 Spray and Wait 算法的投递率平均提高 15.12%, 相比 ST-Prophet、EASE 和 TLEE 分别提高 21.67%、35.48% 和 12.74%. 原因是 GTEEB 策略通过博弈推测其他节点的行为, 避免所有节点同时选择高信标频率导致的能耗过大, 以及所有节点同时选择低信标频率导致的通信机会减少的情况. 通过合理的策略选择, 节点可以实现通信和能耗之间的最佳平衡, 进而提升投递率. 引入节点根据能量、周围节点密度以及移动速度等信息, 动态选择信标频率的机制. 当节点处于高密度区域或者周围节点移动速度较快时, 节点会自主选择较高的信标频率. 这增加了节点发现潜在通信伙伴的机会, 进而提高数据包的成功传输率.

图 6(b) 为负载率对比. 其中使用 GTEEB 策略的 Spray and Wait 路由负载率相比原始路由平均降低 2.23%, 相比 ST-Prophet、EASE 和 TLEE 分别降低 31.07%、26.82% 和 18.95%. 因为信标博弈机制让高频状态节点承担主要消息转发任务, 保证消息尽快安全到达目的节点. 通过合理降低节点的信标频率, 减少了节点发现彼此的次数, 从而避免了网络中大量的重复通信请求和数据包冲突. 减轻了网络的通信负担, 使负载率降低.

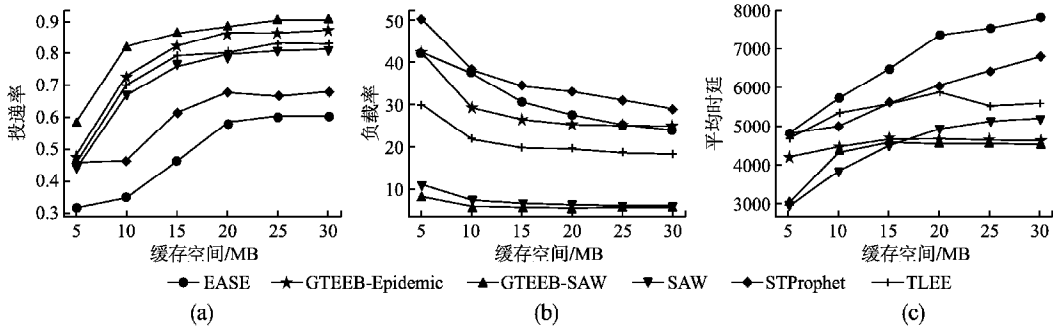


图 6 不同缓存大小下算法性能比较

Fig. 6 Performance comparison of different cache sizes

图 6(c) 为平均时延对比. 其中使用 GTEEB 策略的 Spray and Wait 路由平均时延相比原始路由降低 3.40%, 相比 ST-Prophet、EASE 和 TLEE 分别降低 26.08%、35.52% 和 21.67%. 因为消息转发任务主要由高频节点承担, 而高频信标频率意味着能够快速发现周围是否存在可用中继节点, 从而将消息快速送达目的节点, 降低了平均时延.

5 总结

本文主要研究机会网络的节点能耗和投递性能问题, 具体结论如下:

1) 本文提出基于博弈论的节能信标控制策略 GTEEB, 利用博弈论中的纳什均衡原理来动态调整节点的信标频率, 实

现节能. 考虑节点在高信标频率和低信标频率下的能量消耗和通信概率定义节点的收益模型, 该模型兼顾节点在不同状态下的行为推导出了节点选择高频或低频信标的依据, 即能耗阈值. 此策略允许节点根据周围环境状态决定是否提高信标频率, 使节点能够在能量充足时承担更多的通信任务, 在能量不足时减少不必要的能量消耗.

2) 通过仿真实验验证了 GTEEB 策略的有效性和优越性. 实验结果表明, 应用 GTEEB 策略的路由算法与传统路由算法相比在保证通信性能的同时能够降低节点的能量消耗并延长网络的平均寿命. 对于 Spray and Wait 路由和 Epidemic 路由, 应用 GTEEB 策略后节点能量消耗速度大大降低, 在仿真结束时节点平均剩余约 40% 的能量, 远远高于其他节能路由算法.

综上所述, GTEEB 策略在保证传统路由算法优点的基础上, 通过博弈机制动态调整节点的信标频率, 确保节点不错过大部分通信机会的同时, 减少额外的能量消耗. 关于机会网络节能机制, 未来工作是结合 DPM 技术动态管理传感器或通信模块的待机状态, 实现从局部到全局的能耗平衡.

References:

- [1] Pozza R, Nati M, Georgoulas S, et al. Neighbor discovery for opportunistic networking in internet of things scenarios; a survey [J]. IEEE Access, 2015, 3: 1101-1131, doi: 10. 1109/ACCESS. 2015. 2457031.
- [2] Loreti P, Bracciale L. Optimized Neighbor discovery for opportunistic networks of energy constrained IoT devices [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2020, 19 (6): 1387-1400, doi: 10. 1109/TMC. 2019. 2908402.
- [3] Chouaf W, Abbou A, Agga A. Optimal energy management for a connected microgrid using dynamic programming method [C] // 8th International Conference on Optimization and Applications (ICOA), IEEE, 2022: 1-6.
- [4] Yuan S, Li S, Guo S, et al. Research on dynamic adjustment strategy of charging power in station area based on intelligent energy control [C] // International Conference on Artificial Intelligence and Power Systems (AIPS), IEEE, 2024: 326-329.
- [5] Nash J F. Non-cooperative games [M] // The Foundations of Price Theory Vol 4, Routledge, 2024: 329-340.
- [6] Yan X, Huang C, Gan J, et al. Game theory-based energy-efficient clustering algorithm for wireless sensor networks [J]. Sensors, 2022, 22 (2): 478, doi: 10. 3390/s22020478.
- [7] González I, Calderón A J, Folgado F J. IoT real time system for monitoring lithiumion battery long-term operation in microgrids [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 51: 104596, doi: 10. 1016/j. est. 2022. 104596.
- [8] Basu S, Roy S, Bandyopadhyay S, et al. A utility driven post disaster emergency resource allocation system using DTN [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2020, 50 (7): 2338-2350, doi: 10. 1109/TSMC. 2018. 2813008.
- [9] Liu Y, Wang Y, Shen Y. Demand-aware distributed link allocation in a multilayer heterogeneous satellite network; a game theory approach [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11 (10): 17629-17641, doi: 10. 1109/IIOT. 2024. 3358388.
- [10] Hao J, Su Y, Zhang D, et al. Optimal allocation of microgrid power supply considering dynamic energy management control strategies [C] // 5th International Conference on Clean Energy and Electric Power Engineering (ICCEPE), IEEE, 2024: 869-873.
- [11] Shirvani S, Samanta A, Li Z, et al. DuoJoule; accurate on-device deep reinforcement learning for energy and timeliness [C] // IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS), 2024: 109-122.
- [12] Eshghi S, Khouzani M H R, Sarkar S, et al. Optimal energy-aware epidemic routing in DTNs [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60 (6): 1554-1569, doi: 10. 1109/TAC. 2015. 2396641.
- [13] Das P, Nishantkar P, De T. SECA on MIA-DTN; tackling the energy issue in monitor incorporated adaptive delay tolerant network using a simplistic energy conscious approach [J]. Journal of Network and Systems Management, 2019, 27 (1): 121-148, doi: 10. 1007/s10922-018-9461-4.
- [14] Singh A K, Pamula R, Srivastava G. An adaptive energy aware DTN-based communication layer for cyber-physical systems [J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2022, 35: 100657, doi: 10. 1016/j. suscom. 2022. 100657.
- [15] Zhao Q, Yang W, Zhang L. Energy-efficient opportunistic routing algorithm for post-disaster mine internet of things networks [J]. Sensors, 2023, 23 (16): 7213, doi: 10. 3390/s23167213.
- [16] Sharifi Sani M, Iranmanesh S, Salarian H, et al. Optimizing energy efficiency in opportunistic networks; a heuristic approach to adaptive cluster-based routing protocol [J]. Information, 2024, 15 (5): 283, doi: 10. 3390/info15050283.
- [17] Fu Y, Zhou B, Xu G, et al. An energy recovery routing algorithm for opportunistic networks based on connection stability and node encounter type [J]. Ad Hoc Networks, 2024, 157: 103455, doi: 10. 1016/j. adhoc. 2024. 103455.
- [18] Wang Y, Karimi M, Kim H. Towards energy-efficient real-time scheduling of heterogeneous multi-GPU systems [C] // IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS), 2022: 409-421.
- [19] Wang Y, Karimi M, Xiang Y, et al. Balancing energy efficiency and real-time performance in GPU scheduling [C] // IEEE Real-Time Systems Symposium, 2021: 110-122.
- [20] Reghenzani F, Bhuiyan A, Fornaciari W, et al. A multi-level DPM approach for real-time DAG tasks in heterogeneous processors [C] // IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS), 2021: 14-26.
- [21] Airlangga G, Sihombing D J C, Bata J, et al. Optimizing femtocell networks; a novel game theory based power management model for enhanced SINR and energy efficiency [J]. IEEE Access, 2024, 12: 74444-74455, doi: 10. 1109/ACCESS. 2024. 3405534.
- [22] Yang Y, Liu W, Wang E, et al. Beaconing control strategy based on game theory in mobile crowdsensing [J]. Future Generation Computer Systems, 2018, 86: 222-233, doi: 10. 1016/j. future. 2018. 04. 013.
- [23] De Rango F, Amelio S. Geographic and energy aware epidemic strategy for mobile opportunistic DTN [C] // 29th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), 2020: 1-8.