

融合AOEI驱动与数字孪生技术的能量共享经济机制研究

Author Name
Department/School
University Name
City, Country
email@university.edu

Abstract—

Index Terms—无线传感器网络, 能量共享, AOEI, 数字孪生, 经济机制

I. INTRODUCTION

无线传感器网络 (WSN) 广泛部署于环境监测、工业物联网与智慧城市等场景, 但长期运行受制于节点能量约束与信息时效性的双重瓶颈。传统以工程优化为中心的做法 (如仅最小化能量方差或传输损耗) 在固定约束下往往只能在既有的静态帕累托边界上做内部权衡, 难以通过机制性改造拓展系统可达的效率—公平解集。本文转向以经济学为先导的设计路径: 将信息的新鲜度与价值显式纳入资源配置, 利用“能量信息年龄 (Age of Energy Information, AOEI)”作为价格信号驱动能量共享时机与强度, 通过数字孪生化 InfoNode 提升市场透明度与状态可得性, 并辅以传输路由与时长的自适应调控, 从而在不改变物理资源总量的前提下, 实现从静态到动态帕累托边界的外推。

具体而言, 我们建立一套“AOEI 作为价格信号、InfoNode 作为信息孪生账户、机会主义信息上报作为交易规则”的能量共享经济机制: (1) AOEI 驱动的触发机制在信息价值高、紧急性强时优先引发传能行为; (2) InfoNode 以数字孪生方式维护节点多层状态 (当前/历史/预测), 配合信息去重与动态等待, 保障市场的高可得性与低开销透明度; (3) 能量传输专用路由 (如 EETOR) 在效率阈值与多跳损耗间进行抑制性选择, 减少低效路径; (4) 在帕累托视角下给出机制性证据, 表明系统解集由静态边界外移至动态边界, 兼顾效率与公平。

本文的主要贡献包括:

- 提出以 AOEI 为价格信号的能量共享触发机制, 将信息新鲜度—价值—紧急性纳入系统性决策;
- 构建 InfoNode 数字孪生, 以信息去重与动态等待实现高可得性、低冗余的状态透明;
- 结合能量传输专用路由的效率阈值与多跳抑制策略, 降低无效损耗并保护脆弱节点;
- 从帕累托边界视角分析机制带来的动态外移与效率—公平权衡改善。

II. RELATED WORK

相关研究可概括为四类: (i) 面向效率/方差的能量共享优化, 典型目标是降低能量不均衡或传输损耗; (ii)

以 Lyapunov/凸优化为代表的均衡方法, 提供收敛性与稳定性保证; (iii) 基于深度强化学习 (如 DQN/DDPG) 的自适应调度, 在复杂状态下学习近似最优策略; (iv) 围绕市场机制/信息价值/AoI/数字孪生的资源分配思想, 强调机制解释性与状态可得性。

上述路径在不同侧面取得进展, 但仍存在三点不足。其一, 多数方法将“信息新鲜度—价值—紧急性”作为外生变量处理, 触发传能与配给强度缺乏可解释的价格信号; 其二, 系统状态的可得性与透明度不足, 导致策略依赖静态或周期性上报, 时效性与开销难以兼顾; 其三, 路由常以通用通信准则设计, 未充分体现能量传输的效率阈值与多跳抑制规律。本文从经济学机制切入, 以 AOEI 价格信号与 InfoNode 数字孪生为核心, 联合专用路由与自适应等待/时长, 构造“可解释—可获取—低开销”的一体化机制, 并在帕累托视角下讨论动态边界外移的系统性收益。为保证篇幅重点, 本文仅择要对标“无共享、Lyapunov、DurationAware、DQN、DDPG”五类基线, 不展开冗长综述。

III. MODELING

A. Node and Scenario Modeling

本节给出实体与场景建模 (不涉及代码细节)。

节点建模: 网络包含普通传感器节点与物理中心节点 (ID=0, 作为信息汇聚, 不参与传能)。普通节点具备能量存储、采集与消耗三类过程: 感知/计算/通信消耗, 及 (可选的) 太阳能采集补给。节点可为静止或移动, 其位置决定可行邻居与路径损耗。每个节点在信息空间上对应一个 InfoNode (见下一小节), 用于管理多层状态。

场景建模: 考虑多种拓扑与分布 (均匀、随机、含能量空洞等), 规模取典型数量级 (如 10–100 节点)。环境层面, 太阳能采集随日间时刻呈周期性变化, 体现“白天富余、夜间紧缺”的时变供给; 链路层面, 能量传输效率随距离衰减, 存在显著多跳损耗累积; 管理层面, 可配置最大跳数与效率阈值, 避免极低效路径。上述设定为后续机制与实验提供统一语义空间。

B. Economic Interpretation and AOEI

经济学解释以“价格信号—账户—交易规则”三元组展开。首先, AOEI 作为价格信号, 将信息新鲜度与价值显性化: 当某节点的关键信息陈旧且影响系统目标 (寿命/公平/效率) 时, AOEI 升高, 相当于“愿付更高价格”以换取及时能量支持, 触发优先传能。其次, InfoNode 是

节点在信息市场中的“数字孪生账户”，维护多层状态（当前、历史、预测/不确定度），并提供统一查询接口。再次，机会主义信息上报在执行能量传输时“搭载”路径所经节点信息，辅以信息去重与动态等待：信息量小则延迟上报以聚合，信息量大则缩短等待以保新鲜；在不增加通信开销的前提下维持较高透明度与可得性。

在此机制下，价格信号决定“何时/对谁/以多大强度”传输，账户保障“看得见的状态”，交易规则降低“获取状态的边际成本”。结合能量传输专用路由的效率阈值与多跳抑制，可以在局部理性决策下达成全局可解释的资源再分配。

C. Objectives and Constraints

系统目标与约束包括：

- 网络寿命最大化（首个节点死亡时间）；
- 能量均衡与公平（如方差/变异系数 CV 降低、低能节点受保护）；
- 能量效率提升（有效接收能量占比提高、无效损耗降低）；
- 信息新鲜度提升（关键状态的时效性保障）；
- 约束：效率阈值、最大跳数、预算与调度频率等系统性限制。

从帕累托视角，静态边界对应应在给定约束下的最优效率—公平权衡；通过 AOEI 价格信号、数字孪生与交易规则的机制性改造，可获得对可行集的外推，表现为在同等资源条件下实现更优的目标组合（动态边界外移）。本文在实验部分给出相应证据与对标结果。

IV. PROBLEMS AND MECHANISM DESIGN

V. EXPERIMENTS

A. Setup

B. Metrics

C. Baselines

D. Ablation Studies

E. Visualization

VI. CONCLUSION

A. Future Work

REFERENCES

- [1] T. B. Decided, “Placeholder Reference for Compilation,” 2025.