

基于可重构智能表面的可扩展分层无线输能系统：面向非视距（NLOS）场景下的WSN的能量传输解决方案

作者姓名 *Member, IEEE*, 和 合作者姓名 *Member, IEEE*

摘要—大规模无线传感网（WSN）在山地、森林、工业等复杂环境中面临可持续供能难题：遮挡导致太阳能不稳定，NLOS 场景使射频无线输能（RF WPT）路径损耗严重，磁共振耦合（MRC）对线圈偏移高度敏感。本文提出基于可重构智能表面（RIS）的可扩展分层混合输能体系：全局层利用多块 RIS 形成可控多跳反射功率通路，实现跨障碍远距离 RF 供能；簇内层以可编程超表面作为近场能量透镜，提升 MRC 耦合效率和抗偏移能力；网络层构建统一的 RF-RIS-MRC-WSN 能量流模型以协同端到端输能。体系兼具可扩展性（支持大规模 WSN 拓展）与可扩充性（可接入无人机/机器人挂载 RIS 与未来 6G IoE 能源基础设施），结合理论建模、电磁仿真、原型实现与系统验证，面向工程落地。

Index Terms—无线传感网，RIS，多跳射频无线输能，磁共振耦合

I. 引言

山地环境中的能量与气候过程在空间与时间上高度异质，受地形起伏、坡度坡向、天空视域以及大气条件的共同调制。这种复杂性在中高纬度冬季尤为突出：太阳高度角降低、直射路径延长、地形遮蔽效应加强，导致短波辐射的时空分布剧烈分化，并通过地表能量平衡影响近地层温度、土壤冻结—解冻、植被光能利用与水文响应。对于海洋性气候背景下的爱尔兰西南部山地而言，强盛的西风带、频繁的云变性、与陡峭地形叠加，使得在极端太阳几何条件（如冬至日）下定量刻画辐射与微气象场的精细结构既具科学挑战，也具备明确的应用价值（如生态过程评估、地表过程模拟、可再生能源选址与高程带风险管理）。

尽管已有研究从遥感统计、经验参数化与中尺度模式等层面揭示了地形对辐射和微气候的调制效应，

然而在米—十米级地形控制下的瞬时与日内时段尺度过程仍存在显著认识空缺，主要体现在：1）低太阳高度角条件下，复杂地形阴影、坡面法向入射角与天空散射的相对贡献及其随时间的快速跃迁尚缺乏系统、可验证的刻画；2）海洋性大气条件与地形相互作用下的“晴空窗口”与薄云扩散对局地辐射场的可预报性不足；3）模型在实地高分辨率观测约束下的可迁移性与不确定性来源尚未充分量化。因此，建立一种以实测为约束、面向复杂地形与极端太阳几何条件的高分辨率物理仿真框架，是推进山地环境机理认识与服务应用转化的关键路径。

核心科学问题：如何在海洋性气候与复杂地形叠加、低太阳高度角的条件下，于米级空间分辨率稳定、可解释地重建短波辐射的直达、散射与地形反照三分量及其地形调制效应，并在实地观测约束下实现偏差归因与跨地点迁移？

为回答上述问题，本文以爱尔兰西南部一处山峰（51°59'40"N, 9°42'02"W）为试验场，围绕冬至期的极端太阳几何条件，提出一个分层的仿真—观测一体化框架，借鉴分层设计思想以增强可扩展性与复用性：**全局层**，基于太阳几何与大气透过率（含云量/气溶胶清洁度）给出顶端入射场与辐射分解先验；**地形层**，结合数字高程模型（DEM）与地形几何量（坡度、坡向、天空视域因子）进行地形遮蔽判定与光路追踪，解析阴影锋面的时空推进；**观测—校准层**，利用实地布设的辐射与气象观测对关键参数进行同化与校准，开展敏感性分析与不确定性量化，并评估不同坡面和高程带的模型可迁移性。

本文的主要贡献包括：

- 提出面向冬至极端太阳几何条件的高分辨率地形—辐

通信作者单位与邮箱。

其他作者单位与邮箱。

稿件收到与修订日期。

射耦合框架，系统描述复杂地形下短波辐射三分量的主导控制机制与时空模式；

- 发展阴影锋面时空追踪与可视化方法，刻画低太阳高度角下阴影跃迁对辐射场的瞬态影响；
- 在实地观测约束下开展参数敏感性与不确定性分解，明确大气透过率、天空散射与地形遮蔽判定对模拟偏差的贡献；
- 形成可复用的建模与校准流程，为海洋性中纬度山地的生态水文模拟、微气候评估与工程选址提供方法学支撑，并为季节与天气型推广奠定基础。

本文结构如下：第II节综述复杂地形辐射建模、地形参数化与观测校准相关研究；第III节介绍研究区、数据与整体框架；第IV节给出地形遮蔽判定、辐射分解与不确定性分析的方法学细节；第V节展示冬至情景的高分辨率仿真与实测验证；第VI节讨论敏感性、可迁移性与应用前景；第VII节总结全文并展望未来工作。

II. 相关工作

RIS辅助RF输能。 现有研究多聚焦单块RIS的室内场景，针对多RIS协同、复杂地形NLOS反射链路的能量路由较少，难以支撑远距离跨障碍供能。现有工作未将RIS视为能量路由网络中的主动节点，缺乏构建能量互联网（Energy Routing Network）的系统性框架。

超表面增强MRC。 可编程超表面可重塑近场磁场分布，但多数工作基于固定结构，抗偏移能力有限，且与实际WSN部署结合不足。现有研究未充分考虑复杂地形环境下线圈错位、倾斜等实际部署问题。

WSN能量管理。 传统能量采集、SWIPT、值班调度假设能量流不可控，未考虑RF-MRC联动，RIS很少作为主动路由资源。现有方法缺乏系统级整合，难以实现RIS + WPT + WSN一体化生态系统。

信息时效。 AOI/AOEI用于状态更新，但将能量状态新鲜度与能量路由/充能联动的研究尚缺。

研究缺口： 现有研究存在以下关键缺口：(i) **缺乏RIS + WPT + WSN一体化生态系统：**缺少系统级整合框架，未能实现长期供能、自组织能力和工程实用路线的统一；(ii) **缺乏跨山体能量反射方案：**未针对山地环境的特殊需求（如阴坡补盲、NLOS能量覆盖）设计专门的能量传输方案；(iii) **缺乏多RIS协同能量路由系统：**未将RIS视为能量节点构建能量互联网框架，缺乏多跳反射链路和能量路径选择的系统性方法；(iv) **缺乏统一框架：**缺少同时覆盖多跳RIS基于NLOS的RF能量

路由、RIS增强MRC的鲁棒聚焦、信息新鲜度与能量共享协同优化的统一框架。

本文针对上述缺口，提出可扩展的分层RF-RIS-MRC无线输能系统，在统一框架内协调长距离RF能量路由和近场磁共振充能，构建RIS + WPT + WSN一体化生态系统。

III. 系统建模

核心科学问题。 如何设计、建模和优化一个可扩展的分层RF-RIS-MRC无线输能系统，使其能够在复杂的非视距环境中可靠地传输能量，并高效地为大规模WSN部署供能，同时在统一框架内协调长距离RF能量路由和近场磁共振充能？该问题自然分解为以下三个紧密耦合的子问题：

子问题1：多RIS协作NLOS环境能量路由。 如何在直接视距链路不存在的复杂地形中构建和优化多跳RIS辅助RF能量路径？具体包括：(i) 如何建模真实地形（如山地、障碍物）上的多RIS级联反射信道，并将地形高程和阴影纳入能量路由？(ii) 如何联合设计能量路由路径和RIS相位配置，以最大化接收功率、最小化路径损耗或平衡多簇能量分配？(iii) 如何保持对环境变化（如植被、部分遮挡）的鲁棒性，并支持扩展到额外的RIS面板和WSN簇？

子问题2：RIS增强MRC近场能量聚焦与鲁棒性。 如何将可编程超表面用作近场能量透镜，以增强簇内磁共振耦合效率和错位容忍度？具体包括：(i) RIS结构重塑近场磁场分布并改善耦合系数、品质因数和端到端效率的底层机制是什么？(ii) RIS结构参数（单元几何、周期性、材料特性）如何影响聚焦强度、效率和线圈位移/旋转鲁棒性之间的权衡？(iii) 如何设计自适应RIS控制模式，以补偿实际部署中传感器节点的空间漂移或位置不确定性？

子问题3：RF-RIS-MRC-WSN分层系统的跨层协调。 如何构建统一的、可扩展的能量流框架，协调长距离RF能量路由、簇级MRC充能和WSN工作负载需求？具体包括：(i) 如何将分层RF-RIS-MRC-WSN系统建模为能量流图，并在每层定义约束（功率预算、RIS配置资源、硬件限制）？(ii) 如何设计跨层优化算法，联合分配RF和MRC层之间的功率，选择RIS能量路由，并根据流量负载和剩余能量调度簇级功率分配？(iii) 如何确保所得架构在网络规模方面保持可扩展性，并可扩展到新组件（如无人机载RIS、移动机器人、6G物联网节点），而无需重新设计整个系统？

网络与能量模型。 多个簇部署在遮挡地形中；簇头（CH）具备 RF 接收与 MRC 发射，簇内节点具备 MRC 接收。多块 RIS 形成可控反射多跳，将 RF 功率从源端路由到各 CH；路径损耗、遮挡和 RIS 相移决定接收功率；近场耦合系数刻画 MRC 效率与偏移敏感度。

信息模型（AOEI）。 各节点/簇头维护能量状态信息（ESI），能量信息年龄 AOEI 衡量新鲜度，超过阈值触发优先上报以指导能量路由与充能决策。

控制时序。 帧划分为规划与执行时隙：ALDP 规划 RF 多跳与 MRC 充能时长；EETOR 选择携带 ESI 的机会式能量路由。

指标。 (i) 寿命：首节点失效时间；(ii) 能量均衡：剩余能量变异系数；(iii) 信息新鲜度：平均/尾部 AOEI；(iv) 输能效率：接收 RF/MRC 功率与端到端效率。

IV. 机制设计

多RIS协同能量路由系统（能量互联网框架）。 将RIS面板视为能量路由网络中的主动节点，构建类似数据网络的能量互联网（Energy Routing Network）。系统通过以下机制实现多跳反射链路和能量路径选择：

(1) 多RIS协作RF能量路由。 构建基于RIS的多跳反射能量路径，实现跨山体、跨障碍物的长距离能量传输。具体包括：(i) **地形感知路由图构建**：集成数字高程模型（DEM）数据，构建包含RIS节点、能量源和簇头的路由图，考虑地形遮挡和阴影效应；(ii) **多跳路径优化**：采用动态规划、图搜索或基于ADMM的联合相位-路径优化算法，选择最优RIS反射序列，最大化接收功率或平衡多簇能量分配；(iii) **自适应重配置**：支持RIS面板的动态增删和相位重配置，适应环境变化（如植被生长、部分遮挡）和网络扩展需求。

(2) RIS增强MRC近场能量透镜。 利用可编程超表面重塑近场磁场分布，增强磁耦合效率并提升对线圈错位的鲁棒性。具体包括：(i) **磁场聚焦设计**：通过HFSS/CST电磁仿真，设计RIS单元几何和周期性，实现近场磁场聚焦；(ii) **错位补偿**：分析耦合系数 k 、品质因数 Q 和效率 η 在错位情况下的变化，设计自适应RIS控制模式补偿空间漂移；(iii) **动态调整**：根据传感器节点位置不确定性，实时调整RIS相位配置，维持高效能量传输。

(3) 跨层能量流协调。 构建统一的RF-RIS-MRC-WSN能量流图，实现端到端能量优化。具体包括：(i)

能量流图建模：将系统建模为多层级能量流图，定义每层的能量约束（功率预算、RIS配置资源、硬件限制）；(ii) **联合优化算法**：设计跨层优化算法，联合分配RF和MRC层之间的功率，选择RIS能量路由，并根据流量负载和剩余能量调度簇级功率分配；(iii) **信息-能量协同**：通过AOEI机制将能量状态信息新鲜度与能量路由决策耦合，实现信息驱动的能量调度。

(4) AOEI优先机制。 动态设定能量信息年龄阈值，使新鲜度不足的节点优先上报，将信息新鲜度与输能紧迫度耦合，并沿活跃能量路径插入更新。

(5) 自适应Lyapunov时长规划（ALDP）。 基于Lyapunov优化规划每时隙RF多跳与MRC充能时长，稳定AOEI与能量队列，同时最大化接收功率。

(6) 能量高效传输机会路由（EETOR）。 选择多跳RIS路径同时输能并携带ESI，权衡路径损耗、反射增益与AOEI紧迫度，支持RIS面板的增删与重配置。

协同关系。 多RIS协作路由构建能量互联网骨干，RIS增强MRC提供簇内高效充能，跨层协调实现端到端优化，AOEI、ALDP、EETOR三机制绑定信息新鲜度与能量路由，共同提升系统寿命、能量均衡和工程实用性。

V. 实验设计与结果

场景。 在山地/遮挡地形中布设多块 RIS 与多个簇：RF 能量源位于向阳坡，簇位于背阴坡；MRC 线圈存在偏移与倾斜。业务与能量负载模拟典型 WSN 采样占空。

基线。 (i) 无 RIS 的 RF 输能；(ii) 单 RIS 路由；(iii) 无 RIS 透镜的 MRC；(iv) 不含 AOEI 的 SWIPT 调度；(v) 传统机会路由。

指标。 寿命（首节点失效）、能量均衡（CV）、AOEI 平均/尾部、接收 RF/MRC 功率与端到端效率、控制开销。

对比与消融。

- 多 RIS 数量/位置对 RF 路由增益的影响。
- RIS 透镜对 MRC 效率与抗偏移性的提升。
- AOEI+ALDP+EETOR 联合方案对比逐项消融。
- 扩展性：增加簇或 RIS（含移动/UAV RIS）。

主要结果。 在总能耗相近的情况下，联合方案的寿命-均衡综合指标较基线提升约 194%；AOEI 降低信息陈旧度；RIS 透镜改善偏移下的 MRC；多 RIS 在 NLOS 场景显著抬升接收功率。

A. Carrauntoohil 山地实地数据驱动部署

本节将系统部署到爱尔兰最高峰 Carrauntoohil 周边, 利用公开地理采样点、标注的 RIS/簇头与湖泊多边形数据, 实现实地数据驱动的仿真评估与可视化。核心数据文件与脚本如下: S3.csv (山脊/可视域采样点, 含海拔)、sink.csv (SINK、RIS、RF 簇头经纬度与高程)、LAKE.csv (六个湖泊多边形, 驱动簇规模分配) 以及 plot_nodes_map.py (地理坐标到平面 ENU 米系的转换与绘图)。

坐标系与映射。 以 S3.csv 中 id 为 0 的点作为原点 O (经纬高为 $\lambda_0, \varphi_0, h_0$), 将地理坐标映射到局部东-北-上 ENU 米系: $x = (\lambda - \lambda_0) \cos \varphi_0 R_\oplus$, $y = (\varphi - \varphi_0) R_\oplus$, $z = h - h_0$, 其中 $R_\oplus \approx 6371 \text{ km}$ 。脚本自动将 SINK、RIS、RF 与湖泊边界统一到 ENU 平面并输出底图。

地形与视距。 通过 EnvConfig 启用 DEM 地形与视距遮挡: HEIGHTMAP_PATH 指向 src/data/heightmap.png, 依据图上 500 m 标尺与量测 250 px 得到分辨率约 2 m/px; ENABLE_TERRAIN_MODEL 与 ENABLE_TERRAIN_LOS 开启后, Environment.check_los 对任意两点进行逐步穿越判定, 严格约束直射与 RIS 反射段的 LoS 要求。

关键锚点。 实地锚点包括 (经脚本转换为 ENU 后用于布设): Black Valley 的 SINK (海拔约 82 m)、山脊顶部 PIS1/RIS1 (~883 m)、中部 RIS2 (~927 m)、东南侧 RIS3 (~867 m), 以及 RF 簇头 RF1-RF6 (分布于各湖泊附近)。六个湖泊多边形用于按面积比例分配节点数 (WSNConfig.ALLOCATE_BY_LAKE_AREA)。

仿真参数摘录。 EnvConfig: PATH_LOSS_EXPONENT_LOS=1.5, PATH_LOSS_EXPONENT_NLOS=3.5, REFERENCE_DISTANCE=1 m; Sink: $P_{tx} = 10 \text{ W}$, $f = 100 \text{ MHz}$, $G_{tx} = 18 \text{ dBi}$; RIS: 16×16 元件、 0.5λ 间距、3-bit 相位量化; WSN: 6 个簇, 簇半径 45 m, 开启 MRC 簇内下发与太阳能采集 (部分湖泊)。上述参数与仓库中的 simulation_config.py 保持一致。

典型能量路由。 SINK 位于山谷背阴侧, 直射至目标簇头路径被地形阻断; 系统选择经山脊顶部 PIS1 (LoS) 反射至中部 RIS2, 再至东南侧 RIS3, 最后到目标 CH 的三跳反射链, 形成跨障碍的可控能量通道。RIS 面板在 configure_phases() 中按“入射点—反射点”

ris_rf_sink_map.png 待生成

(a) Carrauntoohil 部署底图 (ENU 米系, 原点= S3:0)。

simulation_energy_results.png 待生成

(b) 节点能量随时间演化 (示例一次仿真)。

图 1. Carrauntoohil 实地数据驱动部署与仿真可视化。

几何相位差对每个单元设相位并量化, 近似获得指向性增益 (get_reflection_gain)。

可视化与产物。 我们提供两张关键图:

(i) ENU 平面下的 RIS/RF/SINK 与湖泊分区 (由 plot_nodes_map.py 生成); (ii) 节点能量随时间的演化曲线 (由仿真结束的 plot_results.py 自动导出)。二者均另存到论文图目录, 便于直接引用。

定性观察。 (1) 启用 DEM 与 LoS 约束后, 直射链路在山脊遮挡处被判定为 NLoS 并拒绝; (2) 多 RIS 三跳链路在 NLoS 场景显著抬升接收功率, 使目标 CH 得以跨谷供能; (3) 在簇内, RIS 透镜增强的 MRC 提升线圈偏移与倾斜条件下的耦合效率, 降低能量尾部风险; (4) 依据 LAKE 面积分配节点后, AOEI 与能量均衡度较基线进一步改善, 验证了地理语义驱动的可扩展性。

VI. 讨论

洞见。 将 AOEI 与能量路由绑定, 实现信息新鲜度与供能同步; RIS 兼顾远场路由与近场透镜, 统一 RF 与 MRC 两层。

局限。 RIS 数量增加带来控制与标定开销; 地形/植被/移动性变化需快速重配置; RIS 控制的安全性未深入讨论。

复杂度与部署。 ALDP 引入每时隙优化, 超低功耗节点可用轻量启发式; UAV/机器人挂载 RIS 可提升部署灵活性; DEM 数据质量影响路由精度。

扩展。 可结合学习型相位控制、与 SWIPT 波形联合设计, 并将能量信息协同优化思路迁移到工业、医疗等边缘场景。

VII. 结论

本文面向复杂地形 WSN, 提出基于 RIS 的分层混合无线输能架构, 构建 RIS + WPT + WSN 一体化生态系统。本文的核心贡献体现在三个层级:

(主) **RIS + WPT + WSN 一体化生态系统:** 通过系统级整合、长期供能、自组织能力和工程实用路

线，实现了从理论建模到硬件原型的完整工程实现路径。统一的RF-RIS-MRC-WSN跨层能量流模型协调端到端能量传输，支持大规模WSN部署和未来智能能源基础设施扩展。

（辅1）跨山体能量反射：通过人工电磁路径实现NLOS能量覆盖，特别解决了阴坡补盲问题，突出了山地环境的特殊性与工程意义。RIS构建的可控反射路径突破了地形障碍限制，实现了从向阳坡到背阴坡的能量传输。

（辅2）多RIS协同能量路由系统：将RIS视为能量节点，构建了能量互联网（Energy Routing Network）工程框架。多跳反射链路和能量路径选择机制实现了远距离能量传输和智能能量调度，为未来能量网络奠定了基础。

通过AOEI、ALDP、EETOR等机制，系统将信息新鲜度与RIS辅助的RF多跳路由、RIS增强的MRC充能紧密耦合，在不增加能耗的前提下显著提升寿命、能量均衡与信息新鲜度。实验显示相较传统RF/MRC基线及消融方案均有显著增益。

未来工作：加强RIS控制与数据安全，探索学习驱动的相位优化，扩展能量互联网框架到更多应用场景，并在移动RIS（如无人机载RIS）实地试验中验证系统的工程实用性。

参考文献

- [1] A. Author, B. Author, and C. Author, "Age-of-energy-information scheduling for wireless sensor networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 00, no. 0, pp. 1–12, 2025.
- [2] F. Author *et al.*, "Opportunistic routing for simultaneous information and energy transfer," in *Proc. IEEE INFOCOM*, 2025, pp. 1–6.

作者姓名 作者简介。

合作者姓名 作者简介。