 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i7.11409

Research on Intelligent Reflecting Surface Resource Allocation Optimization for 6G Edge Networks

Yao Li Shaodong Zhai Liangsheng Lu Liping Lu Jiaqi Ye

China Mobile Communications Group Guangdong Co., Ltd. Guangzhou Branch Company, Guangzhou, Guangdong, 510308, China

Abstract

During the implementation of 6G edge computing offloading applications, the problem of difficulty in coordination between the network and computing resources is widespread. This situation directly leads to the high overall energy consumption of the network system. In response to the defects of this actual scenario, this paper builds an intelligent reflector-assisted network architecture and proposes a brand-new improved scheme for the joint allocation of communication and computing resources. The research first integrates three core mechanisms: wireless transmission link, edge computing resource scheduling, and intelligent reflector signal regulation, builds a complete scenario-based system framework, relies on the block coordinate descent algorithm to complete problem decomposition, and solves two types of sub-problems step by step through an alternating iterative approach to achieve dynamic and coordinated configuration of multi-dimensional resources.

Keywords

6G edge network; intelligent reflector; resource allocation

面向 6G 边缘网络的智能反射面资源分配优化研究

李摇 翟少东 卢良生 卢利平 叶嘉琦

中国移动通信集团广东有限公司广州分公司，中国 · 广东 广州 510308

摘 要

6G边缘计算卸载落地应用过程中，网络与算力资源难以联动协作的问题普遍存在，这一现状直接造成网络系统整体能耗居高不下。针对该类实际场景缺陷，本文搭建智能反射面辅助的网络架构，提出一套全新的通信与计算资源联合调配改良方案。研究先整合无线传输链路、边缘算力调度以及智能反射面信号调控三大核心机制，搭建完整的场景化系统框架，依托块坐标下降算法完成问题拆解，通过交替迭代的方式分步求解两类子问题，实现多维度资源的动态协同配置。

关键词

6G边缘网络；智能反射面；资源分配

1 引言

传统边缘网络的运行状态，很容易被复杂的户外无线传播环境干扰。信号传输损耗过大、通信资源与计算资源无法高效联动的问题长期存在，这类缺陷已经难以匹配 6G 网络低碳运行、全域高效连接的发展诉求。智能反射面（IRS）是 6G 技术体系中极具应用潜力的关键技术，该设备依靠无源反射原理重塑无线信号的传播路径，能够主动优化网络传播环境 [1]。设备本身功耗极低、部署成本低廉，且可以灵活布置在各类场景中。本文以智能反射面加持的 6G 边缘网络为研究载体，探究多领域资源的协同调配新机制，希望通过针对性研究，找到改善边缘网络运行能效的有效途径。

【作者简介】李摇（1988–），中国湖南岳阳人，本科，工程师，从事通信核心网建设研究。

2 系统模型构建

2.1 IRS 辅助 6G 边缘网络场景

本次研究的核心场景设定为 6G 单小区上行边缘计算卸载场景。小区中心位置布设多天线宏基站，基站配套搭建边缘计算服务器，可灵活调配算力资源，承接辖区内用户设备上传的各类高密度计算任务。小区作业区域内布设单块智能反射面设备，设备集成 N 个无源反射单元，专属控制器可独立调节每个单元的相位偏移参数，以此实现无线传播环境的智能化重塑，完成信号增益与干扰抑制操作。小区内随机布设若干单天线用户终端，受设备体积、电池容量、硬件功耗的硬性限制，终端本地算力储备十分有限。终端运行的 AR/VR 场景渲染、高清图像分析处理、工业工况检测等任务，无法依靠本地设备高效完成，必须通过无线传输链路将任务数据上传至边缘服务器进行集中处理。在该场景架构下，用户终端与基站之间存在两条并行的信号传输通道，分别是

终端直达基站的直射链路，以及经由智能反射面中转的级联反射链路。智能反射面依靠无源信号调控方式，改变无线信道的幅度与相位参数，既能强化目标终端的基站接收信号强度，优化数据传输品质，也能压制小区内其他终端的信号干扰，减少网络资源争抢问题。

2.2 无线信道与传输模型

2.2.1 信道建模

本次研究分别针对直射传输链路、IRS 级联反射链路开展信道建模工作，建模过程全面纳入大尺度路径损耗与小尺度信号衰落两类核心影响因素。用户与基站之间的直射链路，遵循城市宏蜂窝通用信道损耗规则，信号损耗数值随传输距离的对数值递增，远距离通信场景下的信号衰减问题会更为突出。该链路的小尺度衰落特性服从瑞利分布，能够真实还原复杂多径传播场景下，信号幅度随机波动的实际状态。用户经 IRS 中转至基站的级联链路，整体路径损耗由两段传输链路叠加构成，包含用户至 IRS、IRS 至基站两段独立损耗，两段链路的损耗规律均与传输距离密切相关。级联链路的小尺度衰落同样服从独立瑞利分布，各链路的信号波动特性互不干扰、相互独立。IRS 设备的信号反射性能由对角结构的相移矩阵刻画，矩阵内每个对角元素，一一对应单个反射单元的信号反射系数。所有反射单元的系数模值固定为 1，仅相位参数可在 0 至 2π 区间内连续调节，这一固定约束，也是智能反射面无源运行特征的核心体现。

2.2.2 接收信号与传输速率

基站端采用最大比合并技术整合多路接收信号，用户设备的等效信道状态，由直射链路与级联反射链路的信道参数共同叠加形成。等效信道的增益数值，直接决定终端数据的传输稳定性与传输质量。技术人员可通过调节 IRS 各单元的相位参数，修正级联链路的信号相位，让反射信号与直射信号在基站接收端实现同相叠加，以此提升整体信道增益。用户终端的上行数据传输速率，由等效信道增益、终端发射功率、系统基底噪声功率三类参数共同决定，整体规律贴合香农信道容量公式。在系统带宽固定的前提下，基站接收端信噪比越高，终端数据传输速率就越快，而信噪比与终端发射功率、等效信道增益的平方呈正相关，与系统噪声功率呈负相关。

2.3 边缘计算与能耗模型

2.3.1 任务模型

本次研究将所有用户终端的计算任务，提炼为三项核心特征参数，分别是任务输入数据体量、任务计算强度、任务最大容忍时延。输入数据体量指代需要通过无线网络传输的原始任务数据大小；计算强度代表单位比特数据处理所需的 CPU 运行周期，能够直观体现任务的计算密集程度；最大容忍时延是任务从数据传输启动到计算处理完成的最长允许时长，是保障用户服务体验的关键指标。系统运行过程中，所有用户任务的传输、计算全流程，都必须严格控制在各自的最大容忍时延范围内。

2.3.2 计算时延与能耗

边缘服务器采用算力独立分配机制，为每个用户终端单独划分计算资源。单用户任务的计算处理时延，由任务总计算量与分配算力的比值决定。其中任务总计算量为输入数据体量与计算强度的乘积，分配的边缘算力越多，任务处理耗时就越短。在能耗表现上，参照 CMOS 电路通用能耗特性，边缘服务器的 CPU 运行功耗与工作频率的三次方成正比。结合时延计算公式进一步推导能够发现，单用户任务的计算能耗，与分配算力的平方正相关，同时也随任务总计算量的增加而上升。这就形成了明显的性能权衡关系：提升单用户算力配额可以缩短处理时延，但会大幅增加设备运行能耗，盲目提升算力无法实现系统最优运行状态。

2.3.3 传输能耗与系统能量效率

用户终端的数据传输时延由任务输入数据体量与上行传输速率共同决定，传输速率越高，数据上传耗时就越短。终端传输能耗为发射功率与传输时长的乘积，在任务数据量固定的前提下，更快的传输速率能够有效压缩传输能耗。系统整体能耗由两部分构成，一是所有用户终端的数据传输能耗总和，二是边缘服务器处理全部任务产生的计算能耗总和。本次研究将系统能量效率作为核心评价指标，该指标指代系统消耗单位能量能够处理的任务数据总量，计量单位为比特每焦耳。指标数值越高，说明系统资源利用越充分，更贴合 6G 网络低碳节能的建设理念。

3 联合优化算法设计

3.1 交替优化分解框架

块坐标下降算法在处理多变量耦合优化问题上具备显著优势，算法逻辑清晰、迭代收敛状态稳定，是无线通信资源调度领域的常用优化手段。该算法的核心思路是对多维度变量进行分组拆分，单次迭代过程中固定其余所有变量参数，仅对单一组别变量进行优化求解，通过多轮循环迭代，让目标函数数值逐步趋于稳定，最终得到最优次优解。结合本次研究的变量特征，可将所有可调参数划分为两大组别，第一组别包含用户发射功率、边缘算力配额两类参数，对应通信与计算资源调度；第二组别为 IRS 反射相移矩阵参数，对应无线信道环境调控。基于该分组方式，原复杂耦合问题可拆分为两类独立子问题 [2]。固定 IRS 相位参数时，可单独求解通信与计算资源的最优分配方案；固定通信、计算资源参数时，可单独优化 IRS 相位配置，实现信道状态的最优调控。

3.2 通信 – 计算资源分配子问题求解

当 IRS 反射相位参数保持固定时，系统内各用户的等效信道增益将处于恒定状态，此时终端传输速率仅与自身发射功率相关。参数固定后，通信与计算资源联合优化的子问题将转化为标准凸优化问题，可行解区间为凸集，目标函数

也满足凸函数特征，可依托拉格朗日对偶法快速求解最优闭式解。构建适配场景的拉格朗日函数，将带多约束的原始优化问题转化为无约束优化形式，函数中纳入原始目标函数项与各类约束对应的惩罚项，同时为每一项约束匹配专属的拉格朗日乘子。完成函数构建后，分别针对发射功率、算力配额两类变量求取偏导数，令偏导数数值为零，结合 KKT 最优性条件，推导得出两类资源的最优分配规律。信道传输条件更优的用户，可分配更多发射功率；信道损耗大、传输质量差的用户，适当压缩发射功率，信道条件极差的终端可直接停止功率供给，以此最大化整体传输效率。算力配额的最优分配方案则兼顾时延与能耗双重需求，时延限制更严苛的业务终端，配置更多算力以缩短处理时长；对能耗变化更敏感的终端，适度降低算力配额，平衡时延性能与能耗损耗。借助次梯度迭代法持续更新拉格朗日乘子，多轮迭代后乘子参数趋于稳定，即可得到满足所有约束条件的最优资源分配结果。

3.3 IRS 相移优化子问题求解

在固定用户发射功率与边缘算力分配方案的前提下，系统计算能耗将保持恒定，此时最小化系统总能耗的目标可等价转化为最大化全网用户的总传输速率。由此，IRS 相位优化子问题可明确为：在各反射单元单位模约束下，调整相位参数，实现多用户总传输速率的最大化。可采用半定松弛结合高斯随机化的组合算法完成求解，首先开展变量转换处理，将矩阵形式的相移参数转化为向量形式，同时，重构等效信道的表达式，将其转化为相移向量的线性组合结构，把原始问题转化为带单位模约束的二次优化问题。随后引入半正定矩阵完成松弛变换，将向量维度的二次优化问题升级为矩阵维度优化问题，舍弃原有的秩 1 约束，仅保留半正定约束与单位模对应的对角元素约束。经松弛处理后，原本的非凸问题转化为可高效求解的凸半定规划问题，依托内点法即可快速获取最优矩阵解。

3.4 算法流程与复杂度分析

算法启动初期，先完成基础参数初始化工作，为 IRS 所有反射单元配置随机初始相位，设定迭代初始次数与收敛精度阈值，核算初始状态下的系统总能耗，将其作为迭代优化的基准参照。参数初始化完成后，固定当前 IRS 相位配置参数，通过拉格朗日对偶法求解通信与计算资源最优分配方案，更新各用户终端的发射功率与边缘算力配额。随后锁定最新的资源分配参数，采用半定松弛联合高斯随机化的方式，迭代优化 IRS 相位矩阵，完成无线信道环境的二次优化。每一轮迭代结束后，核算当前系统总能耗，对比前后两轮的能耗差值，计算相对变化比例。若数值变化量小于预设精度阈值，判定算法已达到收敛状态，直接输出最优资源分配方案与 IRS 相位配置参数；若未满足收敛条件，则迭代次数加一，重复上述优化流程，直至算法收敛 [3]。通信与计算资源分配子问题的复杂度仅与用户数量线性相关，运算增量平缓；IRS 相位优化子问题是整体复杂度的核心来源，半定规划求解的复杂度与反射单元数量的 4.5 次方相关，高斯随机化环节的复杂度则随反射单元数量二次增长。整体算法复杂度由迭代次数、两类子问题复杂度共同决定，对比传统全局穷搜算法的指数级复杂度，优化后的算法大幅降低了运算成本。

4 结语

本文聚焦 6G 边缘网络计算卸载的实际应用场景，针对智能反射面辅助架构下的资源调度难题开展系统性研究。研究搭建了融合无线传输、边缘算力运算、IRS 信号调控的全维度系统模型，以提升系统能量利用效率为核心目标，构建多约束联合优化数学模型，同时设计出基于块坐标下降法的交替迭代优化算法，解决了多变量耦合非凸问题的求解难题。本次设计的联合优化算法，能够在控制计算复杂度的基础上，完成通信资源与计算资源的协同调配，化解了传统调度模式下资源割裂、能耗偏高的问题，有效拔高了 6G 边缘网络的资源利用水平，可为后续绿色边缘网络的资源调度技术研发提供实用的理论参考。

参考文献

[1] 郑旺.智能反射面辅助SWIPT系统的资源分配优化问题研究[D].东华大学，2023.

[2] 陈嘉悦，庞海舰，裘康，等.双IRS辅助的NOMA无线携能通信网络优化[J].计算机应用研究，2023，40（01）：249-256.

[3] 周磊.可重构智能反射面辅助的无线通信系统资源分配算法研究[D].杭州电子科技大学，2024.