

文章编号: 2095-4980(2025)05-0453-08

电力物联网中基于远端射频头协作的 QoS 保障策略

李星南, 刘元杰, 吴赞红

(广东电网有限责任公司 电力调度控制中心, 广东 广州 510080)

摘要: 针对电力物联网的下行协作传输过程中, 在保证低时延通信的同时需对系统有效容量进行优化, 以便为用户持续提供高质量的服务, 提出基于远端射频头(RRH)协作的服务质量(QoS)保障策略(QG-RRHC)。设计了一种基于正交频分多址(OFDMA)的两层电力物联网网络模型, 通过引入有效容量理论研究 QoS 保障的分布式 RRH 协作传输方案, 在不同子载波上协同服务其下行链路数据传输; 提出一个基于拉格朗日对偶的启发式优化算法解决联合优化问题。仿真结果证明, 与其他基准算法相比, 所提策略可显著提高系统的有效容量且接近最优性能。

关键词: 电力物联网; 有效容量; 协作传输; 资源分配

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2024061

Quality of Service guarantee strategy based on Remote Radio Head collaboration in power Internet of Things

LI Xingnan, LIU Yuanjie, WU Zanhong

(Guangdong Power Dispatching Center of Guangdong Power Grid Company, Guangzhou Guangdong 510080, China)

Abstract: In the downlink collaborative transmission process of the power Internet of Things(IoT), it is necessary to optimize the effective capacity of the system while ensuring low-latency communication, in order to continuously provide high-quality services to users. A Quality of Service(QoS)-Guaranteed strategy is proposed based on Remote Radio Heads(RRH) Collaboration(QG-RRHC). A two-layer power IoT network model based on Orthogonal Frequency Division Multiple Access(OFDMA) is designed. By introducing the theory of effective capacity, a distributed RRH collaborative transmission scheme for QoS guarantee is studied, which collaboratively serves the downlink data transmission on different subcarriers. Additionally, a heuristic optimization algorithm based on Lagrange duality is proposed to solve the joint optimization problem. Simulation results demonstrate that compared with other benchmark algorithms, the proposed strategy can significantly enhance the system's effective capacity and achieve the performance close to the optimal.

Keywords: power Internet of Things; effective capacity; cooperative transmission; resource allocation

电力物联网是物联网技术在电力系统中的具体应用形式^[1], 它能够整合和利用电力系统与通信系统的基础设施资源^[2], 实现生产数据和管理信息的传输^[3]。随着电力物联网新应用的迅速发展, 为满足移动数据需求的增长, 要求高频谱效率和低时延, 网络提供商将提供更有效的无线网络管理和运营方案^[4]。5G 云无线接入网(Cloud Radio Access Network, C-RAN)为新型网络架构之一, 可降低电力物联网的资本支出和运营费用。C-RAN

收稿日期: 2024-01-25; 修回日期: 2024-04-02

基金项目: 南方电网公司科技项目资助项目(036000KK52220016(GDKJXM20220247))

引用格式: 李星南, 刘元杰, 吴赞红. 电力物联网中基于远端射频头协作的 QoS 保障策略[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(5): 453-460. DOI: 10.11805/TKYDA2024061.

Citation format: LI Xingnan, LIU Yuanjie, WU Zanhong. Quality of service guarantee strategy based on Remote Radio Head collaboration in power Internet of Things[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(5): 453-460. DOI: 10.11805/TKYDA2024061.

通过协调多点传输 (Cooperative Multiple Point Transmission, CoMP) 将资源集中分配到基带单元池 (Building Baseband Unit, BBU) 中, 实现网络的致密化, 提高能源效率和频谱效率。远端射频头 (RRH) 由 BBU 池调节, 与 BBU 池协同服务用户, 为其提供联合信号处理^[5]。RRH 通过高速有线/无线前传链路与 BBU 池交换信息, 并将信息转发给 BBU 池和用户, 基带信号处理任务由 BBU 池集中完成。此外, C-RAN 架构还具备高灵活性、大容量、广覆盖和低成本的运营特点^[6]。

在电力物联网建设过程中, 常运用通信技术、人工智能技术、大数据技术等新型技术, 增强供电系统的信息处理量、接收能力, 进而提升供电系统的便捷性^[7]。其中 5G 技术做为现阶段通信技术领域内的顶级技术, 也为电力物联网注入强劲助力, 使用 5G 技术建造电力物联网市场前景广阔^[8]。为提高电力物联网的网络性能, 目前大量的研究工作致力于将 5G 技术运用在电力物联网中。文献[9]提出面向电力物联网异构信息安全服务的多任务调度方法, 该方法利用脉冲编码调制 (Pulse Code Modulation, PCM) 高安全性和高效率的计算特性, 优化了任务到运算节点的映射过程, 提高了任务执行的安全性和效率。文献[10]提出了电力物联网 5G “云-边-端” 协同框架与资源调度方法, 该方法通过全电力业务信息感知、全电力环节数据交互、全调度过程智能决策, 实现电力物联网多维异构资源调度优化。将 C-RAN 与电力物联网相融合, 可提升电力物联网的性能, 降低成本。由于用户和业务在空间上的分布差异, 导致 C-RAN 网络负载不均, 从而使用户服务质量 (QoS) 和资源利用率过低^[11]。文献[12]研究了基于时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA) 的超密集无线网和 C-RAN 架构中的上行链路波束赋形及无线传输的联合资源分配, 以最大化所有用户的加权和速率, 虽然该文献为基于 OFDMA 的 C-RAN 中的性能分析提供了有价值的结果, 但未考虑将有效容量引入 C-RAN 架构进行时延分析。文献[13]调用有效容量理论为 C-RAN 提供统计时延有界的 QoS 服务, 通过复杂的功率分配方案, 最大化单用户和多用户场景的有效容量。

目前, 面向电力物联网的 C-RAN 架构仍面临一些挑战: 首先是用户和业务在空间上的分布差异会导致 C-RAN 网络中个别 RRH 的负载过大, 难以满足用户的服务需求; 同时因为负载不均, 导致网络资源利用率低。其次, 由于无线信道实时变化, 如何同时确保下行协作传输中的 QoS 和资源的联合优化仍是一个待解决的问题。鉴于此, 本文提出了基于远端协作的 QoS 保障策略 (QG-RRHC), 旨在实现对电力物联网资源的联合优化。首先, 设计了一个基于 OFDMA 的 2 层下行 5G C-RAN 网络架构; 然后, 引入以用户为中心的聚类方法, 用户根据应用对时延的严格要求选择 RRH, 并协同服务其下行链路数据传输, 通过联合优化 CoMP 选择、子载波分配和功率分配, 最大化系统的有效容量, 并同时满足平均峰值功率和时延违反概率的约束。最后, 采用基于拉格朗日对偶的启发式算法, 解决了原始非凸混合整数非线性规划问题。

1 系统模型

1.1 网络模型

图 1 为面向电力物联网的 2 层下行 5G C-RAN 网络模型, 该网络模型包含 I 个 RRH 和 M 个用户, 分别用 $\mathcal{I} = \{1, 2, \dots, I\}$ 和 $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$ 表示 RRHs 和用户集合。此外, 集中式单元 (Centralized Unit, CU) 通过光纤通信的方式与 I 个分布式单元 (Distributed Unit, DU) 建立连接, 其中每个 DU 只连接到一个 RRH。

1.2 有效容量模型

将网络频谱资源平均划分为 N 个正交子载波 $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$, 每个子载波最多被分配给一个用户。为增强用户 QoS, 考虑 RRHs 之间通过不同子载波为用户提供协作内容分发。由于每个子载波 $n \in \mathcal{N}$ 最多被分配给一个用户, 因此有:

$$\sum_{m=1}^M x_{m,n} = 1, \forall n \in \mathcal{N} \quad (1)$$

式中 $x_{m,n}$ 为二进制变量, $x_{m,n} = 1$ 表示子载波 n 被分配给用户 m 。

以 $\mathcal{N}_m = \{n | x_{m,n} = 1\}$ 表示分配给用户 m 的子载波集合, 则 $\mathcal{N} = \{\mathcal{N}_1 \cup \mathcal{N}_2 \cup \dots \cup \mathcal{N}_M\}$, $\mathcal{N}_j \cap \mathcal{N}_M = \emptyset, \forall j, m \in \mathcal{N}$. $y_{i,n}$

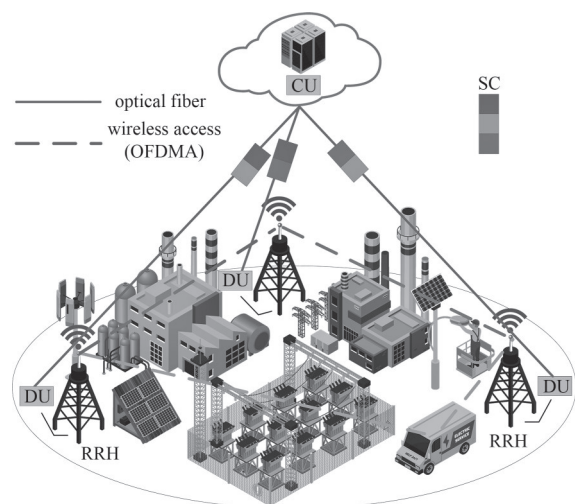


Fig.1 Two-layer downlink 5G C-RAN network for power IoT
图1 面向电力物联网的两层下行 5G C-RAN 网络

为二进制变量, $y_{i,n}=1$ 表示RRH $i \in \mathcal{I}$ 利用子载波 $n \in \mathcal{N}$ 传输为用户分发内容; $\mathcal{A}_n=\{i|y_{i,n}=1\}$ 为通过子载波 n 为用户提供协作传输的RRH子集。因此, 用户 m 在子载波 n 上的接收信噪比可表示为:

$$R_{\text{SIN},m,n} = \frac{\sum_{i=1}^I y_{i,n} p_{m,i,n} h_{m,i,n}}{\sigma^2} \quad (2)$$

式中: $h_{m,i,n}$ 为信道功率增益, 在不同的时隙取值服从独立同分布; $p_{m,i,n}$ 为RRH i 在子载波 n 的发射功率; σ^2 为高斯白噪声功率。因此, C-RAN对用户 m 总的服务速率可表示为:

$$R_m = \frac{B}{N} \sum_{n \in \mathcal{N}_m} \log_2(1 + R_{\text{SIN},m,n}) \quad (3)$$

式中 B 为网络总的带宽。

因此, 网络对用户 m 服务能力的有效容量为:

$$C_E = -\frac{1}{\mu} \ln(E[e^{-\mu R}]) \quad (4)$$

式中: $E[\cdot]$ 为关于服务速率 $R = \log_2(1 + R_{\text{SIN}})$ 的统计期望; μ 为时延参数。

而有效容量是对传统香农容量的概括, 它同时考虑了通信时延和系统可靠性。因此, 用户 m 支持的源端速率可表示为:

$$C_{E,m} = -\frac{1}{\mu_m} \ln E_h \left[e^{-\mu_m \sum_{n \in \mathcal{N}_m} \frac{B}{N} \log_2(1 + R_{\text{SIN},m,n})} \right] = -\frac{1}{\mu_m} \ln E_h \left[\prod_{n \in \mathcal{N}_m} (1 + R_{\text{SIN},m,n})^{\frac{-\alpha_m}{N}} \right] \quad (5)$$

式中: μ_m 为时延参数; $\alpha_m = \mu_m B / \ln 2$ 。

1.3 中断时延违反概率模型

为满足每个用户的时延需求, 考虑中断时延违反概率(Latency Violation Probability, LVP)约束的限制。文献[14]证明了有效容量 $C_{E,m}$ 随时延指数 μ_m 的增加而单调递减, 即:

$$\begin{cases} C_{E,m}(\mu_m=0) = E_h \left[\frac{B}{N} \sum_{n \in \mathcal{N}_m} \ln(1 + R_{\text{SIN},m,n}) \right] \\ C_{E,m}(\mu_m=\infty) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

由有效容量表达式可知, 当 $\mu_m=0$ 时, 网络不需要保证LVP。此外, 更严格的LVP需要更大的 μ_m 。具体而言, 对于应用的最大容忍时延 d_m , 其LVP定义如下:

$$P_{\text{LV}}(d_m) = \Pr\{d > d_m\} \quad (7)$$

式中 d 为完成应用的实际处理时延。对于任意的 μ_m , 若 $\lambda_m \leq C_{E,m}(\mu_m)$, 用户 m 的LVP满足:

$$P_{\text{LV},m}(d_m) \leq \Pr\{Q_m > 0\} e^{-\mu_m C_{E,m}(\mu_m) d_m} \quad (8)$$

式中: λ_m 为到达用户 m 的数据量; $\Pr\{Q_m > 0\}$ 表示稳定状态下第 m 个用户的缓冲区 Q_m 为非空的概率。

本文更关注系统忙时的情况, 因此假设缓冲区 Q_m 始终是非空状态, 即 $\Pr\{Q_m > 0\} = 1$ 。第 m 个用户可支持的最大源数据速率表示为 $R_m = C_E^m(\mu_m)$, 故用户 m 服务请求时延违反概率满足:

$$P_{\text{LV},m}(d_m) \leq e^{-\mu_m C_{E,m} d_m} = E_h \left[\prod_{n \in \mathcal{N}_m} (1 + R_{\text{SIN},m,n})^{\frac{-\alpha_m}{N}} \right] \quad (9)$$

由于服务内容由CU分发到用户, 为保障业务的连续性, 对于RRH i , 其总体平均服务能力不能超过光纤的平均前传速率 R_i^{ave} , 因此可构建无线链路与光纤前传链路之间的约束关系:

$$\sum_{n=1}^N y_{i,n} \sum_{m=1}^M x_{m,n} E_h \left[\frac{B}{N} \log_2(1 + R_{\text{SIN},m,n}) \right] \leq R_i^{\text{ave}} \quad (10)$$

对于每个参与多点协作的RRH, 其总的最大可用发射功率还会受最大可容忍功率的限制, 可将该约束表

示为:

$$E_h \left[\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p_{m,i,n} \right] \leq P_i^{\max}, \forall i \in \mathcal{I} \quad (11)$$

式中 $P_i^{\max}$ 为 RRH i 的最大发射功率。

1.4 优化问题

由于信道状态的时变特性, 本文综合考虑不同用户的差异化 QoS 需求, 通过联合优化 CoMP 选择、子载波分配和功率分配来提升整体有效容量, 具体优化问题如式(12)所示。

$$\begin{cases} \max_{\{x_{m,n}, p_{m,i,n}, y_{i,n}\}} \sum_{m=1}^M C_{E,m} \\ \text{s.t. } C_1: P_{LV,m}(d_m) \leq \varepsilon_m, \forall m \in \mathcal{M} \\ C_2: \sum_{n=1}^N y_{i,n} \sum_{m=1}^M x_{m,n} E_h \left[\frac{B}{N} \log_2(1 + R_{\text{SIN},m,n}) \right] \leq R_i^{\text{ave}}, \forall i \in \mathcal{I} \\ C_3: E_h \left[\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p_{m,i,n} \right] \leq P_i^{\max}, \forall i \in \mathcal{I} \\ C_4: \sum_{m=1}^M x_{m,n} = 1, \forall n \in \mathcal{N} \\ C_5: x_{m,n} \in \{0, 1\}, \forall m \in \mathcal{M}, \forall n \in \mathcal{N} \\ C_6: y_{i,n} \in \{0, 1\}, \forall i \in \mathcal{I}, \forall n \in \mathcal{N} \end{cases} \quad (12)$$

式中: C_1 为用户 m 的业务 LVP 需求约束; C_2 为 C-RAN 的前传链路约束; C_3 为 RRH 的可用发射功率峰值约束; C_4 与 C_5 为子载波分配约束; C_6 为 CoMP 传输约束。

由于优化问题(12)是一个混合整数规划问题, 且约束条件 C_1 不可直接求导, 因此传统的凸优化工具无法直接用于求解。本文先探索约束条件 C_1 的等价约束, 并基于松弛法求解优化问题(12)。

2 网络有效容量优化方案

2.1 功率与子载波分配优化

将 $P_{LV,m}(d_m) \leq \varepsilon_m$ 代入式(9), 得

$$e^{-\mu_m C_{E,m} d_m} \leq \varepsilon_m \Leftrightarrow C_{E,m} \geq -\frac{\ln \varepsilon_m}{\mu_m d_m} \quad (13)$$

因此, 问题(12)可等价于:

$$\begin{cases} \max_{\{x_{m,n}, p_{m,i,n}, y_{i,n}\}} \sum_{m=1}^M C_{E,m} \\ \text{s.t. } C_1: C_{E,m} \geq -\frac{\ln \varepsilon_m}{\mu_m d_m}, \forall m \in \mathcal{M} \\ C_2 \sim C_6 \end{cases} \quad (14)$$

对于问题(14), 先在固定的 CoMP 选择 $y_{i,n}$ 下, 求出子载波分配 $x_{m,n}$ 和功率分配 $p_{m,i,n}$, 然后通过所提启发式算法对 CoMP 选择的 $y_{i,n}$ 进行更新。根据上述两步优化过程将问题(14)拆分为 2 个子问题。针对子问题 1, 采用松弛法处理整数变量 $x_{m,n}$, 将其变成联合凸优化问题, 再利用对偶法进行求解。其对应的拉格朗日函数为:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(p_{m,i,n}, x_{m,n}, \eta_m, \zeta_i, \mathcal{X}_i, \varpi_n) = & \sum_{m=1}^M C_{E,m} + \sum_{m=1}^M \eta_m \left(C_{E,m} + \frac{\ln \varepsilon_m}{\mu_m d_m} \right) + \sum_{i=1}^I \zeta_i \left(R_i^{\text{ave}} - \sum_{n=1}^N y_{i,n} \sum_{m=1}^M x_{m,n} E_h \left[\frac{B}{N} \log_2(1 + R_{\text{SIN},m,n}) \right] \right) + \\ & \sum_{i=1}^I \mathcal{X}_i \left(P_i^{\max} - E_h \left[\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p_{m,i,n} \right] \right) - \sum_{n=1}^N \varpi_n \left(\sum_{m=1}^M x_{m,n} - 1 \right) \end{aligned} \quad (15)$$

式中 η_m 、 ζ_i 、 $\mathcal{X}_i$ 、 ϖ_n 均为拉格朗日乘子。对于给定的一组拉格朗日乘子, 最优发射功率分配为:

$$p_{m,i,n} = \left[\frac{\sigma^2}{\Psi_{m,i,n} y_{i,n} h_{m,i,n}} \prod_{n \in \mathcal{N}_m} \left(\frac{1}{\Psi_{m,i,n}} \right)^{\frac{-\alpha_m}{N(1+\alpha_m)}} - \frac{\sigma^2 \left(1 + \sum_{j=1, j \neq m}^M y_{j,n} h_{m,j,n} p_{k,j,n} \right)}{y_{i,n} h_{m,i,n}} \right]^+ \quad (16)$$

式中 $\Psi_{m,i,n} = \frac{N \mathcal{X}_i \sigma^2 \theta_2 \ln 2 + \sum_{j=1}^M B \zeta_j y_{j,n} x_{m,n} y_{i,n} h_{m,i,n}}{B \theta_2 (1 + \eta_m) y_{i,n} h_{m,i,n} (\ln 2 \theta_1)^{(-1)}}$ 。其中， $\theta_1 = E_h \left[\prod_{n \in \mathcal{N}_m} (1 + R_{\text{SIN},m,n})^{\frac{-\alpha_m}{N}} \right]$ ； $\theta_2 = E_h \left[\frac{B}{N} (1 + R_{\text{SIN},m,n}) \right]$ 。

同理，对于给定的一组拉格朗日乘子，最优子载波分配为：

$$x_{m,n} = \begin{cases} 1, & \text{if } m = \max_j \Phi_{n,j} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

式中 $\Phi_{n,j}$ 为将子载波 n 分配给用户的边际效益引入。

因此，可在给定拉格朗日乘子 η_m 、 ζ_i 、 $\mathcal{X}_i$ 、 ϖ_n 的情况下，求得基于固定 CoMP 选择 $y_{i,n}$ 的子载波分配 $x_{m,n}$ 和功率分配 $p_{m,i,n}$ ，具体流程如算法 1(功率-子载波分配算法)所示。

algorithm 1: power-subcarrier allocation algorithm

- 1: input: Lagrange multiplier ϖ_n , $\eta_{m,i}$, $\mathcal{X}_i$, ζ_i , δ_m and $y_{i,n}$
- 2: output: $p_{m,i,n}^*$ and $x_{m,n}^*$
- 3: while $\{\varpi_n, \eta_{m,i}, \mathcal{X}_i, \zeta_i, \delta_m\}$ converges do
- 4: repeat
- 5: calculate the value of $p_{m,i,n}^*$ by equation (16);
- 6: calculate the value of $x_{m,n}^*$ by equation (17);
- 7: until $\{y_{i,n}\}$ converges in tolerance ε
- 8: end while
- 9: end

2.2 协作多点传输优化

将用户 m 在所选 RRHs 集合 A_n 上的信噪比定义为：

$$\hat{R}_{\text{SIN},m,n}(A_n) = \frac{\sum_{i \in A_n} y_{i,n} p_{m,i,n} h_{m,i,n}}{\sigma^2} \quad (18)$$

将所选 RRHs 集合 A_n 上的拉格朗日函数 $\mathcal{L}_n(p_{m,i,n}, A_n)$ 表示为：

$$\mathcal{L}_n(p_{m,i,n}, A_n) = \sum_{m=1}^M \hat{C}_{E,m} + \sum_{m=1}^M \eta_m \left(\hat{C}_{E,m} + \frac{\ln \varepsilon_m}{\mu_m d_m} \right) + \sum_{i \in A_n} \zeta_i \left\{ R_i^{\text{ave}} - \sum_{n=1}^N y_{i,n} \sum_{m=1}^M x_{m,n} E_h \left[\frac{B}{N} \log_2 (1 + R_{\text{SIN},m,n}) \right] \right\} + \sum_{i \in A_n} \mathcal{X}_i \left[P_i^{\text{max}} - E_h \left(\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p_{m,i,n} \right) \right] \quad (19)$$

式中： $\hat{C}_{E,m} = \frac{-1}{\mu_m} \log E_h \left\{ \prod_{n \in \mathcal{N}_m} \left[1 + \hat{R}_{\text{SIN},m,n}(A_n) \right]^{\frac{\alpha_m}{N}} \right\}$ 。

将所提启发式算法的效益函数 $F(A_n)$ 表示为：

$$F(A_n) = \max_{A_n} \mathcal{L}_n(p_{m,i,n}, A_n) \quad (20)$$

由于 $p_{m,i,n}$ 是固定的，因此每个用户 m 倾向于关联满足效益函数的 RRH 的一个子集。若满足 $F(A_n \cup \{i\}) > F(A_n)$ ，则用户选择 RRH i 为其提供服务。CoMP 选择算法如算法 2 所示。

algorithm 2: CoMP selection algorithm

- 1: input: Lagrange multiplier ϖ_n , $\eta_{m,i}$, $\mathcal{X}_i$, ζ_i , δ_m and $\varepsilon > 0$
- 2: output: optimal CoMP selection $y_{i,n}^*$
- 3: while $\{\varpi_n, \eta_{m,i}, \mathcal{X}_i, \zeta_i, \delta_m\}$ converges do

```

4: repeat
5:   initialize  $A_n = \emptyset$ ,  $F^l = 0$ , and arrange the channel gain  $g_{m,i,n}$  in descending order;
6:   for  $l = 1:L$  do
7:     select RRH  $i_l$  according to channel gain sort;
8:     if  $i_l$  satisfies equation (20) then
9:       the selected RRH collection  $A_n$  is updated by formula  $A_n = A_n \cup \{i_l\}$ ;
10:      the benefit value  $F^{l+1}$  is updated by formula  $F^{l+1} = F(A_n \cup \{i_l\})$ ;
11:    else
12:      keep the RRH set  $A_n$  unchanged and  $F^{l+1} = F^l$ ;
13:    end if
14:  end for
15:  update CoMP selection result  $y_{i,n}$ ;
16:  until  $\{y_{i,n}\}$  converges in tolerance  $\varepsilon$ 
17: end while
18: end

```

基于拉格朗日对偶的启发式优化算法的具体流程如算法 3 所示。

algorithm 3: find the optimal Lagrange multiplier $\eta_m, \zeta_i, \chi_i, \varpi_n$

```

1: input: Lagrange multiplier  $\varpi_n, \eta_{m,i}, \chi_i, \zeta_i, \delta_m$  and  $\varepsilon > 0$ 
2: output: optimal CoMP selection  $y_{i,n}^*$ , subcarrier allocation  $x_{m,n}^*$ , power distribution  $p_{m,i,n}^*$  and Lagrange multiplier  $\eta_m, \zeta_i, \chi_i, \varpi_m$ 
3: while  $\{\eta_m, \zeta_i, \chi_i, \varpi_n\}$  converges do
4:   repeat
5:     the power allocation  $p_{m,i,n}^*$  and subcarrier allocation  $x_{m,n}^*$  are solved by algorithm 1;
6:     CoMP selection  $y_{i,n}^*$  is solved by algorithm 2;
7:   until  $\{y\}$  converges in tolerance  $\varepsilon$ 
8:   update the Lagrange multiplier  $\eta_m, \zeta_i, \chi_i, \varpi_m$ ;
9: end while
10: end

```

3 数值仿真与结果分析

使用 Matlab 进行仿真，比较不同功率阈值下 RRH 数量和不同时延需求下用户数量对有效容量的影响，仿真固定参数的设置如表 1 所示^[14]；此外，比较在不同时延要求、时延违反概率和功率阈值下，QG-RRHC 算法与平均功率算法、固定时延指数算法、最近 RRH 选择算法和子载波随机分配算法性能，结果如图 2~5 所示，表明本文算法能更有效地提升网络性能。

从图 2 可看出，随着 RRH 数量增加，有效容量呈现递增趋势。这是因为 RRH 数量的增加扩大了 CoMP 选择的空域，从而增强了网络灵活性。此外，随着 RRH 的最大发射功率增加，有效容量也在增加。这是因为发射功率直接影响传输速率大小，进而影响了有效容量。

从图 3 可看出，随着用户数量增加，有效容量呈现递增趋势。表明本文提出的算法能有效分配资源，并且在用户数量增加时具有更好的优化性能。此外，当时延需求增加时，有效容量也会增加。这是因为更大的时延需求意味着网络性能要求更宽松，从而提升了有效容量。

从图 4 可看出，随着时延需求增加，所有算法的有效容量都呈现递增趋势，但在相同的时延需求下，QG-RRHC 算法性能明显优于其他算法。此外，平均功率算法的性能优于子载波随机分配算法和最近 RRH 选择算法，说明在本文系统模型中，相较于针对 RRH 发射功率进行优化，对 CoMP 选择和子载波分配优化对系统的贡献更高。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting

parameter setting	numerical value
subcarrier number N	64
number of users M	8
number of RRHs I	8
delay requirement d_m/ms	1
RRH maximum transmit power $P_i^{\max}/\text{W}$	1
total wireless access bandwidth B/MHz	20
average speed of the forward link $R_i^{\text{ave}}/\text{Mbps}$	1
delay default probability threshold ε_m	10^{-2}

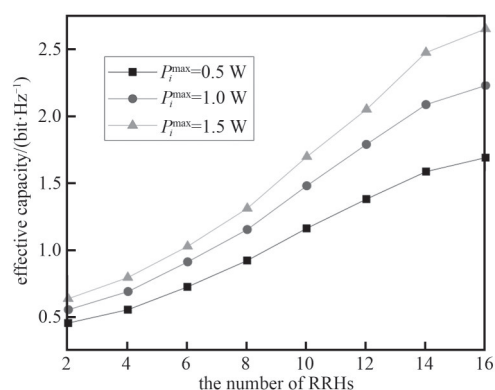


Fig.2 Relationship between RRH quantity and effective capacity
图2 RRH数量与有效容量的关系图

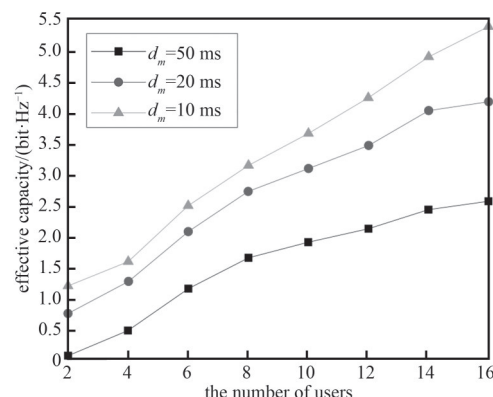


Fig.3 Relationship between the number of users and the effective capacity
图3 用户数量与有效容量的关系图

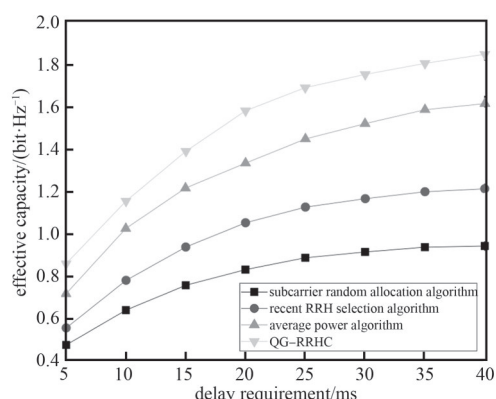


Fig.4 Relationship between delay demand and effective capacity under different algorithms
图4 不同算法下时延需求与有效容量的关系图

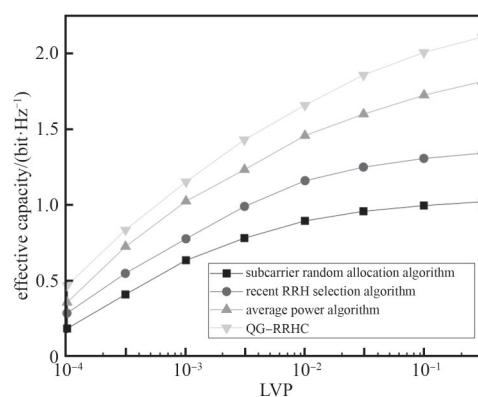


Fig.5 Relationship between LVP and effective capacity under different algorithms
图5 不同算法下时延违反概率与有效容量的关系图

如图5所示,随着时延违反概率的增加,有效容量也会增加。放宽目标时延违反概率实质上扩大了优化问题可行域,使目标函数有效容量具有更大的优化空间。这是因为在可接受的时延违反概率条件下,较大的概率对应着宽松的条件,从而使有效容量在概率范围内变得更大。此外,相同的时延违反概率下,所提算法的性能明显优于其他算法。

4 结论

本文提出了一种电力物联网中基于RRH协作的QoS保障策略,该策略在考虑电力业务LVP需求、前传链路约束、RRH峰值功率约束、子载波分配约束和CoMP传输约束的情况下,建立了有效容量优化问题,并针对此问题提出了一种面向有效容量最大化的CoMP传输、子载波分配和功率分配的联合优化算法。此外,还提出了一种基于拉格朗日对偶的启发式优化算法,对所提出的联合资源分配方案进行了评估。仿真结果表明,本文所提出的策略可显著提高系统的有效容量,且接近于近似最优性能。

参考文献:

- [1] 黄彦钦,余浩,尹钧毅,等. 电力物联网数据传输方案:现状与基于5G技术的展望[J]. 电工技术学报, 2021,36(17):3581-3593. (HUANG Yanqin, YU Hao, YIN Junyi, et al. Data transmission schemes of power internet of things: present and outlook based on 5G technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021,36(17):3581-3593.) DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201464.
- [2] 姚楠,刘子全,秦剑华,等. 基于电力物联网的边缘计算任务卸载优化[J]. 科学技术与工程, 2022,22(16):6577-6584. (YAO Nan, LIU Ziquan, QIN Jianhua, et al. Offloading optimization of the edge computing task based on the power internet of things[J]. Science Technology and Engineering, 2022,22(16):6577-6584.) DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2022.16.025.

- [3] 王晶,王琼,周永博,等. 面向电力物联网调度任务的分布式知识图谱[J]. 无线电通信技术, 2023,49(3):432–437. (WANG Jing, WANG Qiong,ZHOU Yongbo,et al. Union of distributed knowledge maps for power internet of things[J]. Radio Communications Technology, 2023,49(3):432–437.) DOI:10.3969/j.issn.1003–3114.2023.03.007.
- [4] SINAIE M,LIN P H,ZAPPONE A,et al. Delay-aware resource allocation for 5G wireless networks with wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018,67(7):5841–5855. DOI:10.1109/TVT.2018.2800646.
- [5] 吴波,庄莉,骆建华,等. 云无线接入网络的下行链路能效的优化[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(6):1110–1116. (WU Bo,ZHUANG Li,LUO Jianhua,et al. Energy efficient based design for downlink cloud radio access networks[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(6):1110–1116.) DOI:10.11805/TKYDA2019114.
- [6] PENG M G,WANG C G,LAU V,et al. Fronthaul-constrained cloud radio access networks:insights and challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2015,22(2):152–160. DOI:10.1109/MWC.2015.7096298.
- [7] 王毅,陈启鑫,张宁,等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合:应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019,43(5):1575–1585. (WANG Yi,CHEN Qixin,ZHANG Ning,et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric internet of things: application analysis and research prospects[J]. Power System Technology, 2019,43(5):1575–1585.) DOI:10.13335/j.1000–3673.pst.2019.0635.
- [8] 黄义皓,施玉彬,黄世杰. 5G 技术在电力物联网中的应用[J]. 电子通信与计算机科学, 2023,5(2):22–24. (HUANG Yihao,SHI Yubin,HUANG Shijie. Application of 5G technology in power internet of things[J]. Electronic Communication and Computer Science, 2023,5(2):22–24.) DOI:10.37155/2717–5170–0502–8.
- [9] 杨挺,蔡绍堂,闫鹏,等. 面向电力物联网异构信息安全的多任务调度算法[J]. 电力系统自动化, 2022,46(15):162–170. (YANG Ting,CAI Shaotang,YAN Peng,et al. Multi-task scheduling algorithm for heterogeneous information security of power internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(15):162–170.) DOI:10.7500/AEPS20210707005.
- [10] 周振宇,王墨,廖海君,等. 电力物联网 5G 云-边-端协同框架与资源调度方法[J]. 电网技术, 2022,46(5):1641–1651. (ZHOU Zhenyu,WANG Zhao,LIAO Haijun,et al. 5G cloud-edge-end collaboration framework and resource scheduling method in power internet of things[J]. Power System Technology, 2022,46(5):1641–1651.) DOI:10.13335/j.1000–3673.pst.2021.2427.
- [11] LIN Zehong,LIU Yuan. Joint uplink and downlink transmissions in user-centric OFDMA cloud-RAN[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019,68(8):7776–7788. DOI:10.1109/TVT.2019.2924437.
- [12] ZHANG Yu,HE Xuanxuan,ZHONG Caijun,et al. Fronthaul compression and beamforming optimization for uplink C-RAN with intelligent reflecting surface-enhanced wireless fronthauling[J]. IEEE Communications Letters, 2021,25(6):1979–1983. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3062861.
- [13] REN Hong,LIU Nan,PAN Cunhua,et al. Low-latency C-RAN: an next-generation wireless approach[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2018,13(2):48–56. DOI:10.1109/MVT.2018.2811244.
- [14] ZHANG Hong,WANG Hui,LI Zhidu,et al. Latency guarantee for task computation in wireless-powered cloud radio access networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023,10(21):19199–19207. DOI:10.1109/JIOT.2023.3281360.

作者简介:

李星南(1985–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力通信 .email:lxn403@163.com.

吴赞红(1973–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力通信、光网络传输技术等.

刘元杰(1997–), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电力通信、光传输网络、电力通信网络管控技术等.