

面向异构网络的可重构智能表面辅助资源优化方法

神显豪^{1,2,3}, 曾紫玲^{1,2}, 牛少华³

(1. 桂林理工大学信息科学与工程学院, 广西 桂林 541006;
2. 桂林理工大学广西嵌入式技术与智能系统实验室, 广西 桂林 541006; 3. 北京理工大学机电学院, 北京 100081)

摘要: 针对可重构智能表面 (RIS) 辅助的异构网络切片, 提出了联合资源分配和相移优化的资源优化方法。对于异构网络中的不同业务, 构建了不同目标的联合优化问题。针对增强型移动宽带 (eMBB) 业务, 基于交替优化算法, 联合优化资源块分配、功率分配和 RIS 相移矩阵, 使 eMBB 用户的遍历总容量最大化。针对超可靠低时延通信 (URLLC) 业务, 以最大化 URLLC 数据包接收率和最小化 eMBB 速率损失为目标, 提出基于预配置 RIS 的启发式 URLLC 分配算法。仿真结果表明, 与未部署 RIS 时 95.95% 的 URLLC 数据包接收率相比, 所提算法仅使用 80 个 RIS, 实现了约 99.99% 的 URLLC 数据包接收率, 同时提高了约 86.24% 的 eMBB 速率总和。

关键词: 异构网络; URLLC; eMBB; 资源优化; 可重构智能表面

中图分类号: TP302

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022217

Reconfigurable intelligent surface assisted resource optimization method for heterogeneous network

SHEN Xianhao^{1,2,3}, ZENG Ziling^{1,2}, NIU Shaohua³

1. College of Information Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China
2. Guangxi Laboratory of Embedded Technology and Intelligent System, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China
3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract: For reconfigurable intelligent surface (RIS)-assisted heterogeneous network slicing, a resource optimization method with joint resource allocation and phase shift optimization was proposed. A joint optimization problem with different objectives was constructed for different services in heterogeneous networks. For enhanced mobile broadband (eMBB) services, the resource block allocation, power allocation and RIS phase shift matrix were jointly optimized based on the alternating optimization algorithm to maximize the total traversal capacity of eMBB users. For ultra-reliable low-latency communication (URLLC) services, a pre-configured RIS-based heuristic URLLC allocation algorithm was proposed with the objectives of maximizing the URLLC packet reception rate and minimizing the amount of eMBB rate loss. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm achieves about 99.99% URLLC packet reception rate using only 80 RISs compared to 95.95% URLLC packet reception rate when no RISs are deployed, while the total eMBB rate is increased by 86.24%.

Keywords: heterogeneous network, URLLC, eMBB, resource optimization, reconfigurable intelligent surface

0 引言

5G 的三类服务应用场景包括增强型移动宽带

(eMBB, enhanced mobile broadband)、超可靠低时延通信 (URLLC, ultra-reliable and low-latency communication) 和海量机器类通信 (mMTC, massive

收稿日期: 2022-06-06; 修回日期: 2022-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62262011, No.61961010); 广西自然科学基金资助项目 (No.2020GXNSFAA297255)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62262011, No.61961010), Guangxi Natural Science Foundation (No.2020GXNSFAA297255)

machine type communication)^[1]。5G 新空口 (NR, new radio) 演进的一个重要目标是使这 3 种不同应用场景的服务在同一频段内有效复用^[2], 这是 5G 网络中存在的一个重大挑战, 并在即将到来的 6G 网络中升级。这主要是由每个服务的异构服务质量 (QoS, quality of service) 需求导致的, 例如, eMBB 业务侧重于以高数据速率传输大数据块, 而 URLLC 业务的目标是传输短数据包, 具有极高的可靠性和较低的端到端时延。

第三代合作伙伴计划 (3GPP) 标准中提出了穿刺技术^[3]解决上述问题, 为之后的相关研究奠定了基础。这项技术赋予 URLLC 业务更高的优先级, 但将影响 eMBB 业务的传输, 并导致整个系统频谱效率的下降。基于此, 研究人员提出了更加高效的资源分配方法以实现异构 QoS 需求与系统频谱效率之间的均衡。Zhang 等^[4]基于穿刺技术提出了一种联合资源分配的迭代算法, 该算法可以同时满足 eMBB 数据速率和 URLLC 中断概率要求。王佳佳等^[5]在用户分簇的基础上, 制定了一个 URLLC 和 eMBB 联合资源调度问题, 为求解该调度问题提出了一个基于连续凸逼近和凸函数差分规划的自适应迭代功率分配算法。Bairagi 等^[6-7]使用启发式算法和单边匹配博弈解决优化问题, 并提出了惩罚连续上界极小化算法和传输模型。此外, 还有许多学者利用深度强化学习 (DRL, deep reinforcement learning) 来解决蜂窝网络中的资源分配和优化问题^[8-11], 如基于深度确定性策略梯度算法、深度 Q 学习算法等。共存场景中的 eMBB 和 URLLC 用户的信道质量直接决定了其性能, 即数据速率、可靠性和时延。上述方法在信道条件良好时能表现出较好的性能。然而, 当面对复杂的无线通信环境时, 它们没有根据 2 种业务的实际穿刺状态和信道条件对终端速率进行准确推导; 同时, 它们没有考虑提高共存的 eMBB 和 URLLC 业务信道增益。

可重构智能表面 (RIS, reconfigurable intelligent surface) 作为未来无线网络中可能出现的一种范式, 由于其在控制和配置无线传播环境方面的能力, 引起了学术界的广泛关注。RIS 可以有效解决中继通信的能耗高以及 5G 基站的建设难度高的问题, 因此 6G 中引入了对该技术的研究^[12]。现有研究中, RIS 与多项通信前沿技术进行了融合^[13], 包括与多输入多输出 (MIMO, multiple-input multiple-output) 技术、非正交多址 (NOMA, non-orthogonal multiple

access) 技术、移动边缘计算 (MEC, mobile edge computing) 技术和无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 技术的融合。

鉴于 RIS 能够主动修改无线通信环境, 大量研究调查了用于 eMBB 和 URLLC 服务类别的 RIS 辅助无线网络。准确地说, RIS 的部署是为了控制 eMBB 和 URLLC 用户的信道条件来提高其性能。文献^[14-17]仅研究了单一服务类别应用场景, 即只有 eMBB 或 URLLC 服务。Wu 等^[14]验证了 RIS 辅助 MIMO 系统可以实现与大规模 MIMO 系统 (无 RIS 辅助) 相同的速率性能, 同时显著减少有源天线和射频链数量。Ranjha 等^[15]以 UAV 辅助的短数据 URLLC 为例, 指出 RIS 的出现给 UAV 部署策略的构建提供了新思路, 其凭借 RIS 单元的无源波束成形功能和直接搜索法, 在理论模型中确定 UAV 的最佳位置和区块长度, 使总解码误码率降低。Melgarejo 等^[16]提出了一种由 RIS 辅助的免授权访问方案, 以增强 URLLC 的可靠性。Ghanem 等^[17]提出了一种次优迭代算法, 该算法使用一种新的迭代秩最小化方法联合优化每次迭代中的所有变量, 达到简化 URLLC 业务、产生较大性能增益的效果。AL-Mekhlafi 等^[18]进一步研究了 eMBB 和 URLLC 服务在 RIS 辅助下的蜂窝网络中的共存问题。由此可见, 无线网络中针对实现 eMBB 和 URLLC 服务共存的 RIS 技术的相关研究较少。

基于上述分析, 可重塑无线传播环境的 RIS 技术和异构网络中 URLLC 与 eMBB 的共存复用问题都是未来 6G 网络中的重要组成部分。如何将两者联合进行高效运作以充分发挥网络潜力、实现异构服务共存是当前应该关注的重点。本文的主要研究内容如下。

1) 研究了在 RIS 辅助的无线网络中实现异构网络中 URLLC 与 eMBB 高效复用的问题。将共存场景中的资源分配问题表述为 2 个优化问题, 同时考虑了不同服务之间的性能权衡。

2) eMBB 分配问题的解决分为两阶段。第一阶段, 固定功率分配和 RIS 相移矩阵, 确定 RB 分配。第二阶段联合优化功率分配和 RIS 相移矩阵。但由于 RIS 优化所花费的时间较长, 因此对 RIS 相移矩阵进行了预先优化配置。

3) 针对 URLLC 业务, 提出基于预配置 RIS 的启发式 URLLC 分配算法。将预配置的 RIS 相移矩阵依次代入 URLLC 分配问题, 获得最佳功率和频率分配策略, 使 URLLC 数据包接收率最大化。

4) 仿真结果表明, 与其他分配方法相比, 本文提出的基于预配值 RIS 的启发式算法实现了更好的 URLLC 数据包接收率, 同时满足时延要求。其次, 比较了四类不同 RIS 配置的性能, 证明了 RIS 的有效性。

1 系统模型

1.1 RIS 辅助的无线网络模型

本文基于具有单个 5G 基站 gNB 的下行链路无线网络场景构建系统模型, 该 gNB 服务于 E 个 eMBB 用户和 U 个 URLLC 用户。同时部署了一个配备 N 个微小反射元件的 RIS 系统, 基站通过微控制器对 RIS 的每一个单元进行控制调节。令 $e \in \{1, \dots, E\}$ 表示 eMBB 服务切片, $u \in \{1, \dots, U\}$ 表示 URLLC 服务切片, $n \in \{1, \dots, N\}$ 表示 RIS 反射元件, $b \in \{1, \dots, B\}$ 表示网络中的资源块 (RB, resource block), 其中每个 RB 的带宽为 W 。每个时隙 $t \in \{0, \dots, T-1\}$ 的持续时间为 τ 。

假设所有通信节点 (包括 eMBB 和 URLLC 用户以及 RIS) 的信道状态信息 (CSI, channel state information) 在 gNB 处是完全已知的。eMBB 和 URLLC 共存服务的系统模型如图 1 所示, eMBB 用户和 URLLC 用户为接收器 (Rx), 基站为发射器 (Tx), $\theta_n \in [0, 2\pi)$ 表示第 n 个 RIS 反射元件的相移, $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_N]$ 表示 RIS 相移矢量, $\Phi = \text{diag}(e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N})$ 表示 RIS 的相移矩阵。RIS 辅助的端到端信道矩阵为 $C = G\Phi H + D$ 。其中, G 是 RIS 和 Rx 之间的信道系数矩阵, H 是 Tx 和 RIS 之间的信道系数矩阵, D 是 Tx 和 Rx 之间的直接信道

系数矩阵。则 eMBB 用户 e 在 RB b 中的信道增益可表示为 $C_e = |G_{\text{RIS},e} \Phi_e H_{\text{gNB,RIS}} + D_{\text{gNB},e}|^2$, 其中, Φ_e 表示 eMBB 的 RIS 相移矩阵, $G_{\text{RIS},e}$ 表示 RIS 和 eMBB 用户 e 之间的信道系数, $H_{\text{gNB,RIS}}$ 表示 gNB 和 RIS 之间的信道系数, $D_{e,\text{gNB}}$ 表示 eMBB 用户 e 和 gNB 之间的信道系数。同理, URLLC 用户 u 在 RB b 中的信道增益可表示为 $C_u = |G_{\text{RIS},u} \Phi_u H_{\text{gNB,RIS}} + D_{\text{gNB},u}|^2$ 。

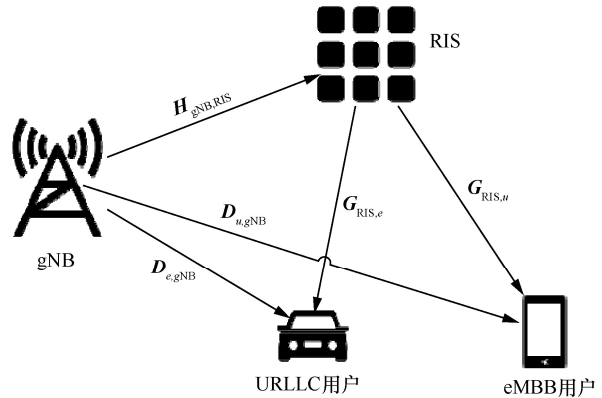


图 1 eMBB 和 URLLC 共存服务的系统模型

1.2 eMBB-URLLC 流量的多路复用模型

通常, 为了提高频谱效率, eMBB 传输允许跨越多个时域。然而, URLLC 传输局限于时域, 但由于其时延要求, 可跨越多个频率通道^[19]。本文设定 URLLC 业务利用短传输时间间隙 mini-short 进行调度, 用来调度 eMBB 用户的传输时间间隙 (TTI, transmission time interval) 则较长, 为 1 ms。eMBB-URLLC 流量的多路复用模型如图 2 所示。当 URLLC 业务传入并抢占 eMBB 用户 2 的第二代码块 (CB2) 和第六代码块 (CB6) 时, 会降低 eMBB 的

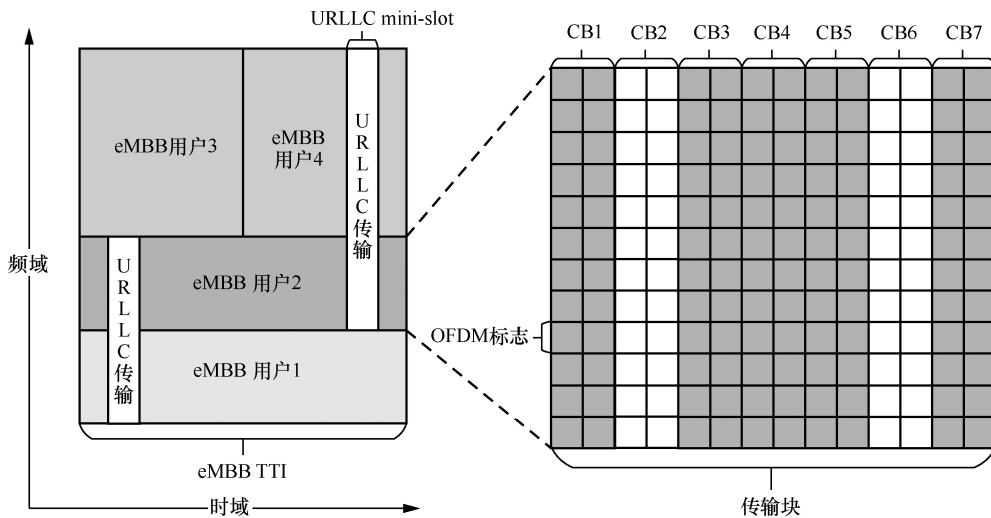


图 2 eMBB-URLLC 流量的多路复用模型

服务质量。这是 eMBB 和 URLLC 共存场景中面临的一个严重问题^[20]，因此应该引入适当的机制来保证正在进行的 eMBB 传输质量。

2 问题表述

2.1 eMBB 分配问题

该问题的目标是在最大传输功率和速率比例等约束下，联合优化 RB 分配、功率分配和 RIS 相移矩阵，使 eMBB 用户的遍历总容量最大化。本文利用正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 技术作为基本的调制解调技术。已知 eMBB 用户 e 在 RB b 中的信道增益 C_e 。假设信道受到加性白高斯噪声 (AWGN, additive white Gaussian noise) 的干扰，表示为 $\sigma^2 = N_0 B$ ，其中 N_0 是噪声功率谱密度。RB b 中 eMBB 用户 e 的相应信噪比 (SNR, signal to noise ratio) 表示为

$$h_{eb} = \frac{C_e}{\sigma^2} \quad (1)$$

则 eMBB 用户 e 在 RB b 上的接收 SNR 为

$$\gamma_{eb} = P_{eb} h_{eb} \quad (2)$$

其中， P_{eb} 是 RB b 中 eMBB 用户 e 的下行链路传输功率。

当使用 M 元正交幅度调制 (M-QAM, M-ary quadrature amplitude modulation) 并且根据符号错误率 (SER, symbol error ratio) 测量错误概率时，每个符号 G 的比特数^[21]可以表示为

$$G = \text{lb} \left(1 + \frac{\gamma_{eb}}{\Gamma} \right) \quad (3)$$

其中， Γ 是信噪比差距，定义为 $\Gamma = \frac{1}{3} \left[Q^{-1} \left(\frac{\text{SER}}{4} \right) \right]^2$ ，

$$\text{其中，} Q(x) = \int_x^\infty \left(\frac{e^{-\frac{u^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}} \right) du。$$

因此，在某个时隙，eMBB 用户 e 在 RB b 上的数据速率可以近似为

$$r_{eb} = W \text{lb} \left(1 + \frac{\gamma_{eb}}{\Gamma} \right) \quad (4)$$

结合式(1)~式(4)，eMBB 用户 e 在所有分配的 RB b 上的数据速率表示为

$$r_e = \sum_{b \in B} x_{eb} W \text{lb} \left(1 + \frac{\gamma_{eb}}{\Gamma} \right) = \sum_{b \in B} x_{eb} W \text{lb} \left(1 + \frac{P_{eb} | \mathbf{G}_{\text{RIS},e} \Phi_e \mathbf{H}_{\text{gNB,RIS}} + \mathbf{D}_{\text{gNB},e} |^2}{\sigma^2 \Gamma} \right) \quad (5)$$

其中，二元变量 x_{eb} 是某时隙中 eMBB 用户 e 的 RB 分配指示符，即

$$x_{eb} = \begin{cases} 1, & \text{如果在该时隙处将RB分配给用户} e \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

因此，某个时隙内所有 eMBB 用户的 gNB 遍历容量为

$$C_{\text{gNB}} = E \left(\sum_{e=1}^E r_e \right) \quad (6)$$

其中，期望 $E(\cdot)$ 覆盖所有衰落信道。

综上，eMBB 资源分配问题可表示为

$$\text{P1: } \max_{\Phi_e, P_{eb}, x_{eb}} C_{\text{gNB}} \quad (7)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq P_{eb} \leq P_{eb}^{\max}, \forall e \in E, \forall b \in B \quad (7a)$$

$$x_{eb} \in \{0, 1\}, \forall e \in E, \forall b \in B \quad (7b)$$

$$r_i : r_j = \varphi_i : \varphi_j, \forall i, j \in \{1, \dots, E\}, i \neq j \quad (7c)$$

$$|\Phi_n| \leq 1, 0 \leq \theta_n \leq 2\pi, \forall n \quad (7d)$$

其中，约束式(7a)中的 P_{eb}^{\max} 是 RB-eMBB 的最大传输功率；约束式(7b)中的 x_{eb} 是 eMBB 用户 e 的 RB 分配指示符；约束式(7c)是比例速率约束， $\sum_{e=1}^E \varphi_e = 1$ ，其中 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_E$ 是归一化比例常数；约束式(7d)是 RIS 的反射系数约束。

2.2 URLLC 分配问题

该问题的目标是在保证 eMBB 用户的 QoS 和 URLLC 数据包速率要求的同时，最大化 URLLC 数据包的接收率，以及最小化 eMBB 速率损失。

设 L^m 为 mini-slot m 处的 URLLC 的数据包数量， $I_{e,l}^m$ 为 eMBB 用户 e 在 mini-slot m 处所屏蔽并分配给 URLLC 数据包 l 的 RB 数量。

不失一般性，假设所有传入的 URLLC 数据包具有相同的大小，用 i 表示。URLLC 的速率阈值 $c_{\text{th}} = \frac{i}{\tau}$ 。在这种情况下，URLLC 业务的可靠性可表述为到达 mini-slot m 的 URLLC 数据包 l 必须全部成功地传输给相关 URLLC 用户。URLLC 的 QoS 约束的表达式为

$$I_l^m r_l(P_l^m, \Phi^m) \geq c_{th} \quad (8)$$

其中, $I_l^m = \sum_{e=1}^E I_{e,l}^m$, r_l 表示 URLLC 数据包 l 的每个 RB 的可实现速率, Φ^m 表示 mini-slot m 处的 RIS 相移矩阵。

此外, 应确保在每个 mini-slot 处, 接入 URLLC 数据包的同时不会降低 eMBB 的 QoS。eMBB 用户 e 的瞬时可实现速率为

$$r_e' = \left(1 - \frac{I_e^m}{\hat{b}_e}\right) r_e \quad (9)$$

其中, $I_e^m = \sum_{l=1}^{L^m} I_{e,l}^m$ 表示 eMBB 用户 e 在 mini-slot m 处所屏蔽的 RB 总数, \hat{b}_e 表示经过 RB 分配后 eMBB 用户 e 具有的 RB 数量。

eMBB 的 QoS 可由最小数据速率 r_{th} 表示^[18], 需保证由于屏蔽 eMBB RB 和设计 RIS 相移矩阵而导致的 eMBB 损耗不会违背 eMBB 速率要求 r_{th} , 表达式为

$$r_e' \geq r_{e,th} \quad (10)$$

其中, $r_{e,th} = \frac{Mr_{th}}{\hat{b}_e} - \left(\sum_i^{m-1} r_e^{r_i} + (M-m)r_e\right)$ 。

在 mini-slot m 处接收的 URLLC 数据包数量可表示为

$$f_1(\mathbf{k}^m) = \sum_{l=1}^{L^m} k_l^m \quad (11)$$

其中, $\mathbf{k}^m = [k_1^m, \dots, k_{L^m}^m]^T$ 是一个 $L^m \times 1$ 的二进制向量。二元变量 $k_l^m \in \{0, 1\}$ 为 URLLC 数据包的接收指示符, 如果接收第 l 个 URLLC 数据包, 则 $k_l^m = 1$,

否则, $k_l^m = 0$ 。基于此, 用 $\eta = \frac{\sum_m \hat{L}^m}{\sum_m L^m}$ 表示 URLLC

负载的接收率, 其中, \hat{L}^m 表示每个 mini-slot m 成功服务的 URLLC 数据包的总数。

另一方面, $\beta_e^m \in \{0, 1\}$ 为 mini-slot m 处分配给 eMBB 用户 e 的 URLLC 负载的权重。同时, 令 $\mathbf{I}^m = (I_{e,l}^m)_{1 \leq e \leq E, 1 \leq l \leq L^m}$ 。

则 eMBB 的总速率损失可以表示为

$$f_2(\mathbf{I}^m) = \sum_{e=1}^E I_e^m \beta_e^m \quad (12)$$

基于以上分析, URLLC 分配问题包括优化功

率和频率资源分配, 以及 RIS 相移矩阵 Φ^m 。URLLC 分配问题在 mini-slot m 处表示如下

$$P2: \max_{\Phi^m, P_L^m, k_l^m, I_l^m} [f_1(\mathbf{k}^m) - f_2(\mathbf{I}^m)] \quad (13)$$

$$\text{s.t. } I_l^m c_l \geq k_l^m c_{th}, \forall l \in L^m \quad (13a)$$

$$r_e' \geq r_{e,th}, \forall e \in E \quad (13b)$$

$$0 \leq P_l^m \leq P_l^{m,max}, \forall l \in L^m, \forall m \in M \quad (13c)$$

$$\sum_{e=1}^E P_{eb} + \sum_{l=1}^{L^m} P_l^m \leq P_{gNB} \quad (13d)$$

$$k_l^m \in \{0, 1\}, \forall l \in L^m \quad (13e)$$

$$\frac{I_l^m}{B} \leq k_l^m \leq I_l^m, \forall l \in L^m \quad (13f)$$

式(7d)

其中, P_l^m 表示在 mini-slot m 处 URLLC 数据包 l 的传输功率, 且 $\mathbf{P}_L^m = [P_1^m, \dots, P_{L^m}^m]^T$; $P_l^{m,max}$ 表示 URLLC 的最大传输功率。约束式(13a)、约束式(13b)分别表示 URLLC 和 eMBB 的 QoS 要求。约束式(13c)表示传输功率不超过最大传输功率。约束式(13d)表示分配的 eMBB 和 URLLC 功率不应超过基站总功率。约束式(13e)表示 URLLC 数据包的接收指示符。约束式(13f)表示若接收 URLLC 数据包 l , 即 $k_l^m = 1$ 时, 分配给 URLLC 数据包 l 的 RB 数量必须大于 0, 即 $I_l^m > 0$ 。

3 问题转换与解决方法

3.1 eMBB 分配算法

由于 P1 中总共有 3 种优化变量, 即 P 、 Φ 和 x_{eb} , 无法直接找到全局最优解, 因此本文提出一种两阶段的交替迭代 eMBB 分配算法。首先, 固定功率分配变量和 RIS 相移矩阵, 并在第一阶段确定 RB 分配。然后, 在第二阶段联合优化功率分配和 RIS 相移矩阵。

3.1.1 第一阶段: RB 分配

对于任何给定的功率分配 P 和 RIS 相移矩阵 Φ , 本文提出一种基于贪婪算法的 RB 分配算法, 完成 RB 的最佳分配。该算法解决了在资源数量相对较低的情况下无法正常完成资源分配的问题。假设所有 eMBB 用户具有相同的发射功率, 并且满足约束式(7a)。每个 eMBB 用户根据信道条件及其比例选择并确定 RB 分配。在每轮次的 RB 分配中, 比例容量最小的 eMBB 用户拥有优先权。

算法 1 基于贪婪算法的 RB 分配算法

步骤 1 确定最初分配给用户的 RB 数量

- 1) 初始化每个用户的 RB 数量 R_e , 使其满足 $R_1 : R_2 : \dots : R_E = \varphi_1 : \varphi_2 : \dots : \varphi_E$, 并且记 $\xi = [\varphi_1 : \varphi_2 : \dots : \varphi_E]$

2) for $e = 1: E$

3) $R_e = \lfloor \varphi_e R \rfloor$

4) $R' = \sum_{e=1}^E R_e$ /*已分配的 RB 数量*/

5) $R'' = R - R'$ /*未分配的 RB 数量*/

6) end for

7) for $e = 1: E$

8) if $R_e = 0$

9) $R_e = 1$

10) $R'' = R'' - 1$

11) end if

12) end for

步骤 2 根据比例将 RB 分配给用户

13) for $e = 1: E$

14) 为用户分配具有最大增益的未分配 RB

15) $R_e = R_e - 1$

16) end for

17) for $e = 1: E \ \& \ R_e \neq 0$

18) R_e 除以 ξ 计算出容量

19) 根据贪婪策略, 在每次迭代中得到最小容量, 并为其选择最佳 RB

20) end for

步骤 3 根据所有用户的有效信道 SNR, 从好到差分配剩余的 RB, 每个用户最多可以得到一个未分配的 RB

3.1.2 第二阶段: 联合优化功率分配和 RIS 相移矩阵

在 RB 分配之后, P1 简化为变量 P_{eb} 的最大化和 RIS 相移矩阵优化, 即

$$\text{P1.1: } \max_{P_{eb}, \Phi_e} E \left(\sum_{e=1}^E \sum_{u \in U} \mathcal{W} \text{lb} \left(1 + \frac{P_{eb} | \mathbf{G}_{\text{RIS},e} \Phi_e \mathbf{H}_{\text{gNB,RIS}} + \mathbf{D}_{\text{gNB},e} |^2}{\sigma^2 \Gamma} \right) \right) \quad (14)$$

$$\text{s.t.} \quad 0 \leq P_{eb} \leq P_{eb}^{\max}, \forall e \in E, \forall b \in B \quad (14a)$$

式(7d)

由于 P1.1 的目标函数及其约束条件是非凸的, 引入松弛变量 S 来处理非凸性, 并且满足

$$S = \left\{ S_{eb} = \frac{P_{eb} | \mathbf{G}_{\text{RIS},e} \Phi_e \mathbf{H}_{\text{gNB,RIS}} + \mathbf{D}_{\text{gNB},e} |^2}{\sigma^2 \Gamma}, \forall e, b \right\}$$

$$\frac{P_{eb} | \mathbf{G}_{\text{RIS},e} \Phi_e \mathbf{H}_{\text{gNB,RIS}} + \mathbf{D}_{\text{gNB},e} |^2}{\sigma^2 \Gamma} \geq S_{eb}, \forall e, b \quad (15)$$

因此, P1.1 可以等价转化为

$$\text{P1.2: } \max_{P_{eb}, \Phi_e, S} E \left(\sum_{e=1}^E \sum_{u \in U} \mathcal{W} \text{lb}(1 + S_{eb}) \right)$$

$$\text{s.t. 式 (14a), 式(14b), 式(15)} \quad (16)$$

由于变量 P_{eb} 和 Φ 相互耦合, 非凸问题 P1.2 仍然无法求解。为了使该问题易于处理, 将其分解为以下 2 个子问题。

$$\text{P1.2.1: } \max_{P_{eb}, S} E \left(\sum_{e=1}^E \sum_{u \in U} \mathcal{W} \text{lb}(1 + S_{eb}) \right)$$

$$\text{s.t. 式(14a), 式(15)} \quad (17)$$

$$\text{P1.2.2: find } \Phi_e$$

$$\text{s.t. 式(14b), 式(15)} \quad (18)$$

P1.2.1 是一个凸优化问题, 可以通过凸优化求解工具 (如 CVX^[22]) 有效获得最优解。

3.1.3 基于交替迭代的 eMBB 分配算法

本文针对 P1 提出了一种基于交替迭代的 eMBB 分配算法。具体来说, 在第 $r+1$ 次迭代中, 首先在第一阶段基于固定的功率分配和 RIS 相移矩阵, 即 $\{P_{eb}^{(r)}, \Phi_e^{(r)}\}$, 实现最佳 RB 分配, 产生 gNB 遍历容量 $C_{\text{gNB}}(P_{eb}^{(r)}, \Phi_e^{(r)}, x_{eb}^{(r+1)})$ 。然后根据上一阶段确定的 $\{x_{eb}^{(r+1)}\}$, 在第二阶段得到 $\{P_{eb}^{(r+1)}, \Phi_e^{(r+1)}\}$ 和伪最优 gNB 遍历容量 $C_{\text{gNB}}(P_{eb}^{(r+1)}, \Phi_e^{(r+1)}, x_{eb}^{(r+1)})$ 。当目标值的变化低于阈值 ε 时算法停止迭代, 表示为 $\frac{C_{\text{gNB}}^{(r+1)} - C_{\text{gNB}}^{(r)}}{C_{\text{gNB}}^{(r+1)}} \leq \varepsilon$ 。算法 2 总结了基于交替迭代的

eMBB 分配算法的过程。该算法的复杂性主要来自第二阶段, 解决 P1.1 时会产生 $O((EUB)^{3.5})$ 的复杂度^[23]。同时令 r^{\max} 表示使算法 2 收敛的最大迭代次数, 则算法 2 的复杂度可以表示为 $O(r^{\max} (EUB)^{3.5})$ 。

算法 2 基于交替迭代的 eMBB 分配算法

- 1) 初始化并设 $r=0$ 为迭代次数
- 2) if $\frac{C_{\text{gNB}}^{(r+1)} - C_{\text{gNB}}^{(r)}}{C_{\text{gNB}}^{(r+1)}} > \varepsilon$ then
- 3) /*第一阶段*/
- 4) 固定 $\{P_{eb}^{(r)}, \Phi_e^{(r)}\}$, 根据算法 1 确定 RB 分配
- 5) 得到 $C_{\text{gNB}}(P_{eb}^{(r)}, \Phi_e^{(r)}, x_{eb}^{(r+1)})$

- 6) /*第二阶段*/
- 7) 根据确定的 $\{x_{eb}^{(r+1)}\}$ 解决 P1.1
- 8) 得到 $C_{\text{gNB}}(P_{eb}^{(r+1)}, \Phi_e^{(r+1)}, x_{eb}^{(r+1)})$
- 9) $r=r+1$
- 10) end if

3.2 RIS 相移矩阵的优化

借助 RIS 可以控制 eMBB 和 URLLC 用户的信道条件从而提高其性能。为满足每个 mini-slot 处现有的 eMBB 和即将到来的 URLLC 业务要求，本文提出了 3 种不同的标准对相移矩阵进行优化。然而，RIS 相移矩阵设计可能会增加时延。为解决这一问题，本文对 RIS 相移矩阵进行预配置。同时，为了不产生额外的时延影响，三类相移矩阵的优化设计是并行执行的。

3.2.1 eMBB 的 RIS 相移矩阵 Φ_e^*

问题表述见 P1.2.2，为解决问题引入以下松弛变量 $\kappa_e = \text{Re}(\mathbf{G}_{\text{RIS},e} \Phi_e \mathbf{H}_{\text{gNB,RIS}} + \mathbf{D}_{\text{gNB},e})$, $\forall e$ ， $\varepsilon_e = \text{Im}(\mathbf{G}_{\text{RIS},e} \Phi_e \mathbf{H}_{\text{gNB,RIS}} + \mathbf{D}_{\text{gNB},e})$, $\forall e$ 。并且， $\kappa_e^2 + \varepsilon_e^2 = \left| \mathbf{G}_{\text{RIS},e} \Phi_e \mathbf{H}_{\text{gNB,RIS}} + \mathbf{D}_{\text{gNB},e} \right|^2$ 。则 P1.2.2 可以表示为一个可行性检查问题，即

$$\begin{aligned} \text{P1.2.3: find } \Phi_e & \quad (19) \\ \text{s.t. 式(14b)} & \\ \kappa_e &= \text{Re}(\mathbf{G}_{\text{RIS},e} \Phi_e \mathbf{H}_{\text{gNB,RIS}} + \mathbf{D}_{\text{gNB},e}), \forall e \\ \varepsilon_e &= \text{Im}(\mathbf{G}_{\text{RIS},e} \Phi_e \mathbf{H}_{\text{gNB,RIS}} + \mathbf{D}_{\text{gNB},e}), \forall e \\ \frac{P_{eb}(\gamma_e^2 + \varepsilon_e^2)}{\sigma^2 \Gamma'} &\geq S_{eb}, \forall e, b \end{aligned}$$

为了解决 P1.2.3 的非凸性，在每次迭代中应用逐次凸近似 (SCA, successive convex approximation) 技术。对于给定的局部点 $(\gamma_e^{(r)} + \varepsilon_e^{(r)})$ ，可以根据一阶泰勒展开^[22]找到 $(\gamma_e^2 + \varepsilon_e^2)$ 的下界，并用 ψ_e 表示。

$$\begin{aligned} \gamma_e^2 + \varepsilon_e^2 &\geq (\gamma_e^{(r)})^2 + (\varepsilon_e^{(r)})^2 + 2\gamma_e^{(r)}(\gamma_e - \gamma_e^{(r)}) + 2\varepsilon_e^{(r)} \\ &(\varepsilon_e - \varepsilon_e^{(r)}) = \psi_e \end{aligned}$$

因此，P1.2.3 可以进一步化为

$$\begin{aligned} \text{P1.2.4: find } \Phi_e & \quad (20) \\ \text{s.t. 式(14b), 式(19b), 式(19c)} & \end{aligned}$$

$$\frac{P_{eb}\psi_e}{\sigma^2 \Gamma'} \geq S_{eb}, \forall e, b$$

此时，P1.2.4 是一个凸优化问题，可以使用 CVX

有效求解。

3.2.2 URLLC 的 RIS 相移矩阵 Φ_u^*

P1.2.2 得到的相移矩阵 Φ_e^* 没有考虑 URLLC 业务的到来。RIS 相移矩阵 Φ_u^* 旨在提高网络中所有 URLLC 用户的信道增益。因此，RIS 相移矩阵 Φ_u^* 优化问题的目标是最大化最小 URLLC 信道增益，即

$$\begin{aligned} \text{P3: } \max_{\Phi_u} \min_{1 \leq u \leq U} C_u & \quad (21) \\ \text{s.t. } C &= \left| \mathbf{G}_{\text{RIS},u} \Phi_u \mathbf{H}_{\text{gNB,RIS}} + \mathbf{D}_{\text{gNB},u} \right|^2 \\ & \text{式(7d)} \end{aligned}$$

令 $\mathbf{v}^H = [v_1, \dots, v_N]^H$ ，其中 $v_n = e^{j\phi_n}$ 。由此可得， $\left| \mathbf{G}_{\text{RIS},u} \Phi_u \mathbf{H}_{\text{gNB,RIS}} + \mathbf{D}_{\text{gNB},u} \right|^2 = \left| \mathbf{v}^H \Theta + \mathbf{D}_{\text{gNB},u} \right|^2$ ，其中 $\Theta = \text{diag}(\mathbf{G}_{\text{RIS},u}) \mathbf{H}_{\text{gNB,RIS}}$ 。

因此，P3 等价于

$$\begin{aligned} \text{P3.1: } \max_{\mathbf{v}} \min_{1 \leq u \leq U} \mathbf{v}^H \Theta \Theta^H \mathbf{v} + \mathbf{D}_{\text{gNB},u} \Theta^H \mathbf{v} + & \\ \mathbf{v}^H \Theta \mathbf{D}_{\text{gNB},u} + \left| \mathbf{D}_{\text{gNB},u} \right|^2 & \quad (22) \\ \text{s.t. } |v_n|^2 &= 1, \forall n \end{aligned}$$

此时，P3.1 是一个非凸二次约束二次规划 (QCQP, quadratic constrained quadratic programming) 问题，可以将其转化为齐次 QCQP。具体来说，通过引入辅助变量 δ ，P3.1 等价于

$$\begin{aligned} \text{P3.2: } \max_{\bar{\mathbf{v}}} \min_{1 \leq u \leq U} \bar{\mathbf{v}}^H \mathbf{A}_u \bar{\mathbf{v}} + \left| \mathbf{D}_{\text{gNB},u} \right|^2 & \quad (23) \\ \text{s.t. } |\bar{v}_n|^2 &= 1, n = 1, \dots, N+1 \end{aligned}$$

其中， $\mathbf{A}_u = \begin{bmatrix} \Theta \Theta^H & \Theta \mathbf{D}_{\text{gNB},u} \\ \mathbf{D}_{\text{gNB},u} \Theta^H & 0 \end{bmatrix}$, $\bar{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \delta \end{bmatrix}$ 。记 $\bar{\mathbf{v}}^H \mathbf{A}_u \bar{\mathbf{v}} = \text{tr}(\mathbf{A}_u \bar{\mathbf{v}} \bar{\mathbf{v}}^H)$ ，并设 $\mathbf{V} = \bar{\mathbf{v}} \bar{\mathbf{v}}^H$ ，它需要满足 $\mathbf{V} \succ 0, \text{rank}(\mathbf{V}) = 1$ 。由于秩-1 约束是非凸的，可利用半正定松弛法 (SDR, semi-definite relaxation) 来松弛该约束。因此，P3.2 可简化为

$$\begin{aligned} \text{P3.3: } \max_{\mathbf{V}} \min_{1 \leq u \leq U} \text{tr}(\mathbf{A}_u \mathbf{V}) + \left| \mathbf{D}_{\text{gNB},u} \right|^2 & \quad (24) \\ \text{s.t. } \mathbf{V}_{n,n} &= 1, n = 1, \dots, N+1 \\ \mathbf{V} &\succ 0 \end{aligned}$$

显然，P3.3 是一个半定规划 (SDP, semi-definite programming) 问题，同样使用 CVX 有效求解。通常，求解 P3.3 所获得的最优 $\bar{\mathbf{v}}$ 不满足秩-1 约束，可应用高斯随机化技术获得秩-1 解^[14]。

3.2.3 联合 eMBB 和 URLLC 的 RIS 相移矩阵 $\Phi_{e,u}^*$

RIS 相移矩阵 Φ_u^* 提高了 URLLC 性能, 但这可能会严重影响 eMBB 性能。因此, 需要一种统一的 RIS 相移矩阵, 该相移矩阵既可以提高 URLLC 负载的性能, 又能减少 eMBB 流量的损耗。与 P3 类似, 在时隙开始时设计了一个相移矩阵 $\Phi_{e,u}^*$, 其目的是提高网络中所有共存 eMBB 和 URLLC 用户的信道增益。因此, 将问题表述为最大化所有共存 eMBB 和 URLLC 用户的最小信道增益, 即

$$P4: \max_{\Phi_{e,u}} \min_{1 \leq x \leq E+U} |C|^2 \quad (25)$$

s.t. if $x \in E$

$$C = C_e = \mathbf{G}_{\text{RIS},x}^e \Phi_{e,u} \mathbf{H}_{\text{RIS,gNB}} + \mathbf{D}_{x,\text{gNB}}^e \quad (25a)$$

if $x \in \{E+1, \dots, E+U\}$

$$C = C_u = \mathbf{G}_{\text{RIS},x}^u \Phi_{e,u} \mathbf{H}_{\text{RIS,gNB}} + \mathbf{D}_{x,\text{gNB}}^u \quad (25b)$$

式(7d)

其中, 约束式(25a)表示当 $x \in E$, 即 x 为 eMBB 业务时的信道增益; 约束式 (25b) 表示当 $x \in \{E+1, \dots, E+U\}$, 即 x 为 URLLC 业务时的信道增益。P4 的求解与 P3 类似。

3.3 URLLC 分配问题方案

在每个 mini-slot 开始时, 便开始获取上述的三类预配置 RIS 相移矩阵, 并将它们传送并存储至 RIS 控制器。当 RIS 相移矩阵 Φ^m 为预配置 RIS 相移矩阵之一时, 即 $\Phi^m \in \{\Phi_e^*, \Phi_u^*, \Phi_{e,u}^*\}$, 代入式(13)求解 P2。换句话说, 当 RIS 相移矩阵确定后, 原问题变成解决 URLLC 业务的最佳频率和功率分配问题, 即

$$P2.1: \max_{P_L^m, k^m, I_L^m, I_E^m} [f_1(k^m) - f_2(I_E^m)] \quad (26)$$

s.t. 式(13a)~式(13e) (26a)

$$\sum_{l=1}^{L^m} I_l^m = \sum_{e=1}^E I_e^m \quad (26b)$$

其中, 约束式(26b)保证屏蔽 eMBB 资源的数量等于分配给 URLLC 流量的资源数量。

根据约束式(13b)可得, 在 mini-slot m 处, eMBB 用户 e 分配给 URLLC 数据包的最大可用 RB 数量为

$$I_e^{\max,m} = \min \left[\hat{b}_e \left(1 - \frac{r_{e,\text{th}}}{r_e} \right), \hat{b}_e \right] \quad (27)$$

确定 URLLC 数据包 l 的 RB 分配数量后, 其最优功率分配表达式为

$$P_l^{m*} = \frac{\frac{k_l^m c_{\text{th}}}{(\log 2) I_l^m} - 1}{h_l} \quad (28)$$

其中, $h_l = \frac{C_l}{\sigma^2}$ 。

基于此, P2.1 可简化为

$$P2.2: \max_{k^m, I_L^m, I_E^m} [f_1(k^m) - f_2(I_E^m)] \quad (29)$$

s.t. 式(13e), 式(13f), 式(26b) (29a)

$$\sum_{l=1}^{L^m} I_l^m P_l^{m*} \leq \sum_{e=1}^E I_e^m P_e \quad (29b)$$

鉴于 URLLC 业务有严格的时延要求, 低复杂度的分配算法对于传入的 URLLC 数据包至关重要, 而普通迭代方法通常需要较长的计算时间, 本文提出低复杂度的启发式算法。

首先, 为提高 URLLC 数据包接纳率, 本文考虑优先分配具有较好信道条件的 URLLC。已知 C_{ub} 表示 URLLC 用户 u 的信道增益, 则其降序排序可表示为 $\mathbf{C}_{ub} = \{C_{ub}^{(1)}, \dots, C_{ub}^{(U)}\}$ 。同理, $\beta_e^m = \{\beta_e^{m(1)}, \dots, \beta_e^{m(E)}\}$ 表示 eMBB 用户根据其 URLLC 负载分配权重的升序排序。其次, 考虑到约束式(26b), 该算法通过迭代有序的 eMBB 用户将资源分配给 URLLC 用户 u 。迭代过程中保证给定的 eMBB 用户上 URLLC 数据包的累积数据速率低于速率阈值。最后, 若满足 eMBB 的 QoS, 对所有 URLLC 数据包重复上述步骤; 否则, URLLC 数据包将被丢弃。算法 3 给出了基于预配置 RIS 的启发式分配算法的详细步骤。该算法的时间复杂度与 URLLC 数据包 L^m 的个数有关, 且最坏情况下的时间复杂度为 $O(L^m E)$ 。

算法 3 基于预配置 RIS 的启发式 URLLC 分配算法

- 1) for $\Phi^m \in \{\Phi_e^*, \Phi_u^*, \Phi_{e,u}^*\}$
- 2) /*解决 P2*/
- 3) 初始化 I^m 和 P_L^m , 并计算 $I^{\max,m}$
- 4) $\mathbf{C}_{ub} = \{C_{ub}^{(1)}, \dots, C_{ub}^{(U)}\}$ /*降序排序*/
- 5) $\beta_e^m = \{\beta_e^{m(1)}, \dots, \beta_e^{m(E)}\}$ /*升序排序*/
- 6) for $l = 1 : L^m$
- 7) $c_l^{\text{temp}} = 0$
- 8) boolean = 0
- 9) for $e = 1 : E$

- 10)
$$I_{e,l}^{\text{temp}} = \left\lceil \frac{c_{\text{th}} - c_l^{\text{temp}}}{c_l(P_{eb})} \right\rceil$$
- 11) if $I_{e,l}^{\text{temp}} \leq I_e^{\text{max},m}$ then
- 12)
$$I_{e,l}^m = I_{e,l}^{\text{temp}}$$
- 13) boolean = 1, break
- 14) else
- 15)
$$I_{e,l}^m = I_e^{\text{max},m}$$
- 16)
$$c_l^{\text{temp}} = c_l^{\text{temp}} + I_{e,l}^m c_l(P_{eb})$$
- 17) end if
- 18) end for
- 19) if boolean = 1 then
- 20)
$$P_l^m = \frac{\sum_{e=1}^E I_{e,l} P_{eb}}{\sum_{e=1}^E I_{e,l}}$$
- 21) update $I^{\text{max},m}$
- 22) end if
- 23) end for
- 24) 得到最优解 $P_L^m(\Phi^m)$, $I^m(\Phi^m)$, $k^m(\Phi^m)$
- 25) end for

4 仿真结果与分析

4.1 仿真实验

本节使用 MATLAB 软件评估所提系统模型和网络切片资源分配算法的有效性。本文考虑一个 RIS 辅助的无线网络，其中一个 gNB 部署在覆盖区域的中心；同时，考虑了所有通信链路的大规模衰落和小规模衰落。直联链路和级联链路的大规模衰落分别建模为 $P_0 = \alpha_0 (d_{\text{gNB},e/u})^{-\beta_0}$ 和 $P_1 = \alpha_1 (d_{\text{gNB},\text{RIS}})^{-\beta_1} (d_{\text{RIS},e/u})^{-\beta_2}$ ，其中， $d_{\text{gNB},e/u}$ 、 $d_{\text{gNB},\text{RIS}}$ 和 $d_{\text{RIS},e/u}$ 分别表示 gNB-用户、gNB-RIS 和 RIS-用户链路的距离。 $\beta_0 = 3.5$ 、 $\beta_1 = 2.2$ 和 $\beta_2 = 2.8$ 分别是 gNB-用户、gNB-RIS 和 RIS-用户链路的路径损耗指数。此外， $\alpha_0 = -30$ dB 和 $\alpha_1 = -40$ dB 分别是直联链路和级联链路在参考距离处的路径损耗。另一方面，所有信道的小尺度衰落建模为 $f = \sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} f^{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} f^{\text{NLoS}}$ 。其中， κ 是 Rician 因子， f^{LoS} 是视线分量， f^{NLoS} 是非线性视线分量，遵循瑞利分布，尺度参数等于 1。eMBB 用户在覆盖区域内随机分布，URLLC 流量模型被建模为满足参数 λ 的 Poisson 分布。其他相关仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 参数设置

参数	值
蜂窝小区半径/ m	300
总带宽/ MHz	20
RB 的带宽/ kHz	180
基站发射功率/ dBm	46
URLLC 用户最大发射功率/ dBm	23
eMBB 用户最大发射功率/ dBm	23
每个 RB 的子载波/个	12
URLLC 传输时间间隔/ ms	0.144 3
eMBB 传输时间间隔/ ms	1
噪声功率/ dBm	-97.5
URLLC 数据包大小/bit	256
eMBB 速率阈值/(Mbit·s ⁻¹)	1

4.2 URLLC 分配策略的性能评估

本文将基于 RIS 预配置的启发式 URLLC 分配算法与以下两类算法进行仿真对比。

比例公平 (PF, proportional fair) 调度算法。该算法的基本思想是在选择用户时考虑瞬时速率和长期平均速率的比值，同时利用权重值对不同用户进行调整，达到兼顾系统性能和用户体验的目的。

联合资源分配的迭代算法^[4]。计算 URLLC 用户的传输功率以确保可靠性约束，并以迭代的方式完成 URLLC 用户的资源分配。

改变 URLLC 用户个数，即 URLLC 业务负载，比较不同算法下的 URLLC 数据包接收率，如图 3 所示。随着 URLLC 业务负载的增加，URLLC 数据包接收率明显降低。这是因为随着到达的 URLLC 数据包越来越多，屏蔽所得的可用资源不足以接纳所有 URLLC 数据包。因此，为保证 eMBB 的 QoS，一些 URLLC 数据包被拒绝，导致算法性能衰减。当 URLLC 用户数量较少时（少于 20 个），本文所提启发式算法和文献[4]算法得到的 URLLC 数据包接收率相当，差距仅为 0.12%。但随着 URLLC 数量的增加（多于 20 个），本文所提算法较其他 2 个算法的优越性突出。当 URLLC 用户个数为 180 时，对比其他 2 个算法，本文算法的 URLLC 数据包接收率提高了 2.18% 和 1.3%。这是因为 PF 调度算法通过对低数据率的 eMBB 用户进行穿刺，可用于穿刺的 eMBB 资源变得有限，导致其无法适应高负载的 URLLC。文献[4]算法使用的是一般迭代方式，随着迭代次

数的增加性能会明显下降。而本文算法是基于直观或经验构造的算法，其特点是在可接受的计算时间内给出待解决组合优化问题每一个实例的一个可行解。更重要的是，本文算法还结合了 RIS 技术，可以控制 eMBB 和 URLLC 用户的信道条件从而提高其性能。

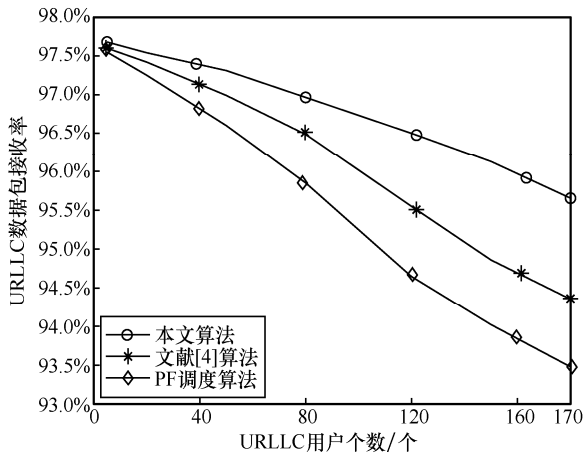


图 3 不同 URLLC 分配策略下的数据包接收率

不同 URLLC 分配策略的时间复杂度如图 4 所示。本文算法进行目标优化能够在一个 mini-slot 内完成分配任务，而 PF 调度算法和文献[4]算法的时间随着 URLLC 个数增加而明显上升，这极有可能不满足 URLLC 时延要求。结合图 3 和图 4 可知，PF 调度算法的 URLLC 数据包接收率和时间复杂度都显逊色，而文献[4]所提算法随着 URLLC 负载的增加，性能明显降低，时延明显增加。本文算法所花费的时间更少，具有更低的时间复杂度，更符合 eMBB 与 URLLC 共存场景应用。

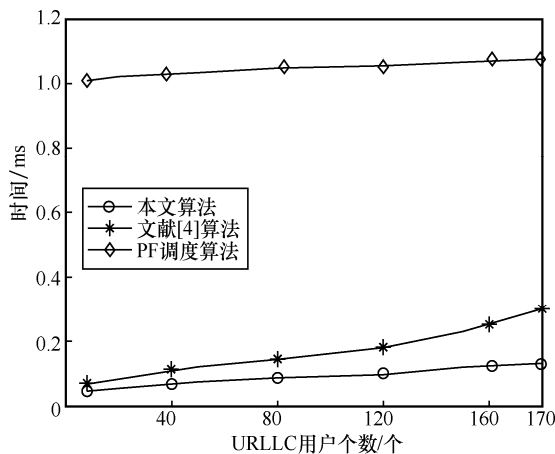


图 4 不同 URLLC 分配策略的时间复杂度

4.3 RIS 配置的影响

为了展示不同 RIS 相移矩阵对 URLLC 和 eMBB 流量性能的影响，预设以下 4 种方案。方案 1：在整个时段利用 RIS 相移矩阵 Φ_e^* 为 eMBB 和 URLLC 提供服务。方案 2：在每个 mini-slot 中，如果存在 URLLC 数据包，则使用 RIS 配置 Φ_u^* ，否则使用 RIS 配置 Φ_e^* 。方案 3：在每个 mini-slot 中，如果存在 URLLC 数据包，则使用 RIS 配置 $\Phi_{e,u}^*$ ，否则使用 RIS 配置 Φ_e^* 。方案 4（本文方案）：根据算法 3，在每个 mini-slot 中，gNB 选择能够最大化 URLLC 数据包接收率和最小化 eMBB 速率损失的相移矩阵 $\Phi^m \in \{\Phi_e^*, \Phi_u^*, \Phi_{e,u}^*\}$ 。

图 5~图 7 描述了在 5 种不同 RIS 相移矩阵配置下的 URLLC 数据包接收率、eMBB 速率的总损失率和 eMBB 速率总和随 RIS 反射元件数量的变化曲线。结果表明，本文方案在 URLLC 数据包接收率和 eMBB 速率总和方面都优于无 RIS 方案。如图 5 所示，当 $N=80$ 个时，与未部署 RIS 时 95.95% 的 URLLC 数据包接收率相比，方案 1~方案 4 的 URLLC 数据包接收率分别达到 96.89%、99.79%、99.80% 和 99.99%。

如图 6 所示，方案 4 的 eMBB 速率的总损失率保持在 6% 以下。而其他方案中，当 $N>40$ 个时，eMBB 速率的总损失率都接近甚至超过 10%，尤其是未部署 RIS 的情况下 eMBB 速率的总损失率接近 16%。同样，在图 7 中，当 $N=80$ 个时，对比无 RIS 方案，方案 1~方案 4 在 eMBB 速率总和上分别提高了约 40.3%、34.46%、52.18% 和 86.24%。

综合来说，RIS 的辅助有效提高了相关性能。这是因为 RIS 的辅助使 gNB 能够根据 URLLC 流量及其信道条件，从 $\Phi^m \in \{\Phi_e^*, \Phi_u^*, \Phi_{e,u}^*\}$ 中选择相移矩阵来配置 RIS，从而很好地权衡 URLLC 数据包接收率最大化和 eMBB 速率损失最小化。

另一方面，结合图 5~图 7 可以观察到方案 1 和方案 2 在 URLLC 数据包接收率和 eMBB 速率总和之间的权衡。通过增强 URLLC 的信道条件，方案 2 赋予 URLLC 比 eMBB 更高的优先级，这意味着 URLLC 数据包接收率更好，eMBB 速率损失更多。相反，方案 1 通过使用为提高 eMBB 速率而优化的 eMBB 相移矩阵 Φ_e^* ，赋予 eMBB 比 URLLC 更高的优先级。这导致了更高的 eMBB 速率总和和更低的 URLLC 数据包接收率。相比之下，方案 3 和方案 4 在这两方面做到了更好的平衡，方案 4 的优越性更突出。

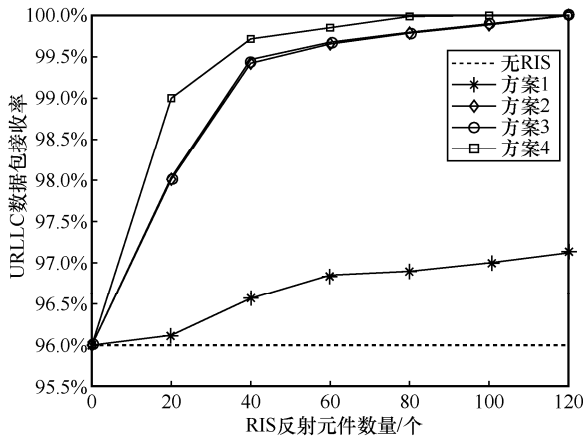


图 5 不同 RIS 相移矩阵的 URLLC 数据接收率

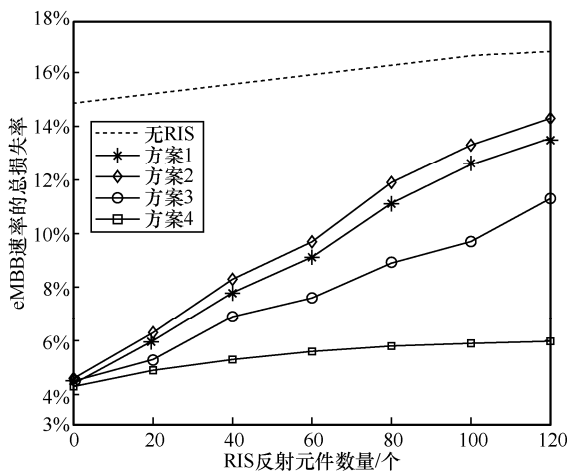


图 6 不同 RIS 相移矩阵的 eMBB 速率的总损失率

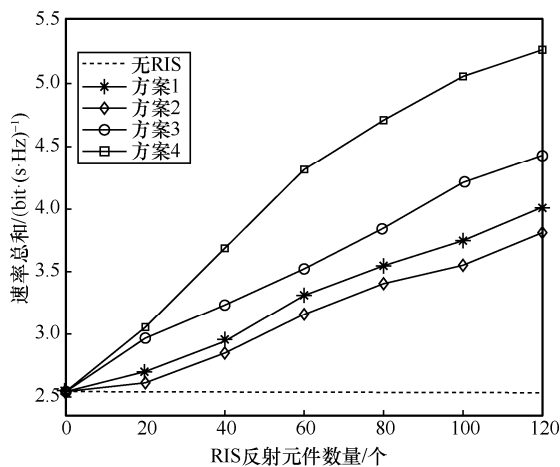


图 7 不同 RIS 相移矩阵的 eMBB 速率总和

5 结束语

本文旨在结合 RIS 技术解决异构网络中 eMBB 和 URLLC 业务共存情景下的资源分配问题。该问题具体描述为 eMBB 分配问题和 URLLC 分配问题

2 个优化问题，为了克服这些问题的非凸性，分别提出了基于交替迭代的两阶段 eMBB 分配算法和基于预配置 RIS 相移矩阵的启发式 URLLC 分配算法。仿真结果表明，与其他调度方法相比，在 URLLC 数据包接收率达到 95.5% 左右时，本文算法的时间复杂度更低，并且 URLLC 负载越大，其优越性越突出。同时，随着网络规模的扩大，与未部署 RIS 方案相比，所提 RIS 方案能很好地实现 URLLC 接收率最大化和 eMBB 速率损失最小化之间的权衡。未来可尝试将该算法应用于异构车辆网络的资源分配问题、电力资源规划分配问题等。

参考文献：

- [1] IMT-2020 (5G) 推进组发布 5G 技术白皮书[J]. 中国无线电, 2015. IMT-2020 (5G) Advancement group releases white paper on 5G technology[J]. China Radio, 2015(5):6.
- [2] PARK J, SAMARAKOON S, SHIRI H, et al. Extreme URLLC: vision, challenges, and key enablers[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2001.09683, 2020.
- [3] POPOVSKI P, TRILLINGSGAARD K F, SIMEONE O, et al. 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: a communication-theoretic view[J]. IEEE Access, 2018, 6: 55765-55779.
- [4] ZHANG X F, GUO X D, ZHANG H. RB allocation scheme for eMBB and URLLC coexistence in 5G and beyond[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2021, 2021: 6644323.
- [5] 王佳佳, 陈琪美, 江昊. MIMO-NOMA 系统下的 URLLC 与 eMBB 混合业务场景的共存调度研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021(5):1-8. WANG J J, CHEN Q M, JIANG H. Co-existence scheduling of URLLC and eMBB hybrid Service Scenarios in MIMO-NOMA System [J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2021(5): 1-8.
- [6] BAIRAGI A K, MUNIR M S, ALSENWI M, et al. A matching based coexistence mechanism between eMBB and URLLC in 5G wireless networks[C]//The 34th ACM/SIGAPP Symposium On Applied Computing. New York: ACM Press, 2019: 2377-2384.
- [7] BAIRAGI A K, MUNIR M S, ALSENWI M, et al. Coexistence mechanism between eMBB and URLLC in 5G wireless networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(3): 1736-1749.
- [8] FU Y, WANG S, WANG C X, et al. Artificial Intelligence to Manage network traffic of 5G wireless networks[J]. IEEE Network, 2018, 32(6): 58-64.
- [9] HUANG Y, LI S R, LI C Z, et al. A deep-reinforcement-learning-based approach to dynamic eMBB/URLLC multiplexing in 5G NR[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(7): 6439-6456.
- [10] 罗志强, 王伟, 朱晓荣. 基于 A3C 的无线异构网络自适应视频流传输控制方法[J]. 电信科学, 2020, 36(12): 65-76. LUO Z Q, WANG W, ZHU X R, et al. An adaptive video stream transmission control method for wireless heterogeneous networks based on A3C[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(12): 65-76.
- [11] ALSENWI M, TRAN N H, BENNIS M, et al. Intelligent resource

- slicing for eMBB and URLLC coexistence in 5G and beyond: a deep reinforcement learning based approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(7): 4585-4600.
- [12] YOUNG J, SON W, JUNG B C. Physical-layer security improvement with reconfigurable intelligent surfaces for 6G wireless communication systems[J]. Sensors, 2021, 21(4): 1439.
- [13] LIU Y W, LIU X, MU X D, et al. Reconfigurable intelligent surfaces: principles and opportunities[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(3): 1546-1577.
- [14] WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(11): 5394-5409.
- [15] RANJHA A, KADDOUM G. URLLC facilitated by mobile UAV relay and RIS: a joint design of passive beamforming, blocklength, and UAV positioning[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(6): 4618-4627.
- [16] MELGAREJO D C, KALALAS C, SENA A, et al. Reconfigurable intelligent surface-aided grant-free access for uplink URLLC[C]//Proceedings of the 2nd 6G Wireless Summit. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [17] GHANEM W R, JAMALI V, SCHÖBER R. Joint beamforming and phase shift optimization for multicell IRS-aided OFDMA-URLLC systems[C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.
- [18] AL-MEKHLAFI M, ARFAOUI M A, ELHATTAB M, et al. Joint resource allocation and phase shift optimization for RIS-aided eMBB/URLLC traffic multiplexing[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(2): 1304-1319.
- [19] KORRAI P, LAGUNAS E, SHARMA S K, et al. A RAN resource slicing mechanism for multiplexing of eMBB and URLLC services in OFDMA based 5G wireless networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 45674-45688.
- [20] PASTUSHOK I A, BOIKOV N A. Investigation of methods for multiplexing EMBB and URLLC streams in a downlink[C]//Proceedings of Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [21] GARCIA-ARMADA A. SNR gap approximation for M-PSK-Based bit loading[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(1): 57-60.
- [22] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [23] CHEN Y B, WANG Y, LIU M, et al. Network slicing enabled resource management for service-oriented ultra-reliable and low-latency vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(7): 7847-7862.

[作者简介]



神显豪 (1980-), 男, 广西南宁人, 博士, 桂林理工大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为物联网、智能信息处理系统。



曾紫玲 (1998-), 女, 湖南衡阳人, 桂林理工大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络、网络切片。



牛少华 (1975-), 男, 河南安阳人, 博士, 北京理工大学讲师, 主要研究方向为机电控制及 MEMS 技术。