

全国大学生数学建模竞赛论文模板

摘要

摘要

对于问题一,

对于问题二,

对于问题三,

对于问题四,

最后,

关键字: 关键词 关键词 关键词 关键词 关键词

目录

| | | |
|-------|--------------------|----|
| 1 | 问题重述 | 5 |
| 1.1 | 问题背景 | 5 |
| 1.2 | 问题要求 | 5 |
| 1.3 | 我们的工作 | 6 |
| 2 | 模型假设 | 6 |
| 3 | 符号说明 | 6 |
| 4 | 问题一的模型的建立和求解 | 6 |
| 4.1 | 问题一的描述与分析 | 6 |
| 4.2 | 预备工作 | 7 |
| 4.2.1 | 关键参数补充 | 7 |
| 4.3 | 模型建立 | 7 |
| 4.3.1 | 传输速率计算 | 7 |
| 4.3.2 | 时延计算模型 | 8 |
| 4.3.3 | 服务质量评估函数 | 8 |
| 4.3.4 | 优化模型 | 9 |
| 4.4 | 模型求解 | 9 |
| 4.5 | 求解结果 | 10 |
| 5 | 问题二的模型的建立和求解 | 11 |
| 5.1 | 问题二的描述与分析 | 11 |
| 5.2 | 预备工作 | 11 |
| 5.3 | 模型建立 | 11 |
| 5.3.1 | 任务队列动态演化模型 | 11 |
| 5.3.2 | 时延计算模型（任务级） | 12 |
| 5.3.3 | 动态服务质量评估函数 | 12 |
| 5.3.4 | 多时间段优化模型 | 13 |
| 5.4 | 模型求解 | 13 |
| 5.5 | 求解结果 | 15 |
| 5.5.1 | 最优资源分配序列 | 15 |
| 5.5.2 | 并列最优解分析 | 15 |

| | |
|--------------------------|----|
| 5.5.3 结果分析 | 16 |
| 6 问题三的模型的建立和求解 | 17 |
| 6.1 问题三的描述与分析 | 17 |
| 6.2 预备工作 | 17 |
| 6.2.1 集合、索引与参数 | 17 |
| 6.3 模型建立 | 17 |
| 6.3.1 信道与干扰模型 | 17 |
| 6.3.2 任务到达与队列演化 | 18 |
| 6.3.3 RB 切片并发与调度规则 | 18 |
| 6.3.4 QoS 评估函数 | 18 |
| 6.3.5 决策变量与优化模型 | 19 |
| 6.4 模型求解 | 20 |
| 6.5 求解结果 | 20 |
| 7 问题四的模型的建立和求解 | 20 |
| 7.1 问题四的描述与分析 | 20 |
| 7.2 预备工作 | 20 |
| 7.2.1 集合、索引与参数 | 20 |
| 7.3 模型建立 | 21 |
| 7.3.1 信道与干扰模型 | 21 |
| 7.3.2 任务到达与队列演化 | 21 |
| 7.3.3 接入与调度规则 | 22 |
| 7.3.4 QoS 评估函数 | 22 |
| 7.3.5 决策变量与优化模型 | 23 |
| 7.4 模型求解 | 24 |
| 7.5 结果分析 | 25 |
| 8 模型的分析与检验 | 25 |
| 8.1 灵敏度分析 | 25 |
| 8.2 误差分析 | 25 |
| 9 模型的评价 | 25 |
| 9.1 模型的优点 | 25 |
| 9.2 模型的缺点 | 26 |
| A 附录 文件列表 | 27 |

| | |
|---------------|----|
| B 附录 代码 | 27 |
|---------------|----|

1 问题重述

1.1 问题背景

随着移动通信需求的激增和物联网（IoT）的快速发展，网络架构正向异构化和虚拟化演进。异构蜂窝网络（HetNet）通过混合部署宏基站与微基站，有效提升了网络容量与覆盖。在此基础上，5G 网络切片技术利用网络功能虚拟化（NFV），将单一物理网络划分为多个逻辑切片，以满足超高可靠低时延（URLLC）、增强移动宽带（eMBB）和大规模机器通信（mMTC）等多样化服务需求。

无线资源的管理依赖于正交频分多址接入（OFDMA）技术，它将频谱划分为时频资源块（RB）进行灵活分配。因此，在异构网络与多切片共存的复杂场景下，如何设计高效的资源块和功率分配策略，以最大化用户服务质量并优化能耗，成为无线资源管理领域的核心挑战。

1.2 问题要求

本赛题旨在研究异构蜂窝网络中基于网络切片的无线资源管理问题。核心任务是设计一套优化方案，在满足不同用户多样化服务质量（QoS）需求的同时，实现系统资源的高效利用。具体来说，需要解决以下几个层层递进的问题：

- **问题一：**针对单个微基站和单一用户任务的场景，研究如何将有限的资源块在 URLLC、eMBB、mMTC 三类切片间进行静态分配，以实现用户服务质量的最大化。
- **问题二：**在动态场景下，考虑用户任务的随机到达和用户移动性，设计一个多周期的资源分配策略。该策略需要在 10 个决策点上对资源进行重新分配，不仅要服务新到达的任务，还要处理队列中积压的任务，目标是最大化整个时间窗口内的总体用户服务质量。
- **问题三：**将场景扩展到多个微基站，引入了基站间的同频干扰问题。要求在进行资源块分配的同时，对每个基站各切片的发射功率进行协同优化，以抑制干扰，最大化全系统的用户服务质量。
- **问题四：**构建一个包含宏基站和多个微基站的异构网络模型。在此模型中，需要为每个用户决策其接入基站（宏基站或微基站），并为所有基站进行切片划分和功率控制，以应对更大规模的用户需求和更复杂的网络环境，最终目标仍是最大化整体服务质量。
- **问题五：**在问题四的基础上，引入基站能耗模型，探讨在保证最大化用户服务质量的同时，如何通过优化资源分配策略来实现网络总能耗的最低化，从而在服务性能和绿色节能之间取得平衡。

1.3 我们的工作

2 模型假设

为简化问题，本文做出以下假设：

- 假设 1
- 假设 2
- 假设 3

3 符号说明

| 符号 | 含义 |
|--------------------|--|
| N | 资源块总数， $N = 50$ |
| \mathcal{S} | 切片集合， $\mathcal{S} = \{U, e, m\}$ （分别代表 URLLC、eMBB、mMTC） |
| \mathcal{U}_s | 切片 s 的用户集合 |
| n_s | 分配给切片 s 的资源块数量 |
| D_k | 用户 k 的任务数据量（Mbit） |
| ϕ_k | 用户 k 的大规模衰减（dB） |
| h_k | 用户 k 的小规模瑞利衰减系数 |
| p_{tx} | 基站发射功率， $p_{\text{tx}} = 30$ dBm |
| b | 单个资源块带宽， $b = 360$ kHz |
| L_s^{SLA} | 切片 s 的时延 SLA 要求 |
| r_s^{SLA} | 切片 s 的速率 SLA 要求 |
| M_s | 切片 s 的任务丢失惩罚系数 |
| α | URLLC 切片的效益折扣系数 |

4 问题一的模型的建立和求解

4.1 问题一的描述与分析

问题一考虑单个微基站的资源分配场景。该基站拥有 50 个资源块（Resource Block, RB），需要为三类网络切片——URLLC（高可靠低时延）、eMBB（增强移动宽带）和 mMTC（大规模机器通信）进行资源分配，以最大化用户服务质量。这是一个静态资源分配优化问题，需要在满足资源约束的条件下，找到最优的资源块分配方案。

4.2 预备工作

4.2.1 关键参数补充

基站与信号参数：基站发射功率 $p_{\text{tx}} = 30$ dBm，单个资源块（RB）带宽 $b = 360$ kHz，噪声系数 $NF = 7$ dB。

决策周期：系统每 $T_{\text{window}} = 100$ ms 进行一次资源分配决策。

切片资源占用与服务等级协议（SLA）：URLLC 切片：每个用户占用 10 个资源块，要求时延 $L_k^U \leq 5$ ms，速率 $r_k \geq 10$ Mbps；eMBB 切片：每个用户占用 5 个资源块，要求时延 $L_k^e \leq 100$ ms 且传输速率 $r_k \geq 50$ Mbps；mMTC 切片：每个用户占用 2 个资源块，要求时延 $L_k^m \leq 500$ ms，速率 $r_k \geq 1$ Mbps。

QoS 评估参数：U 切片的效益折扣系数 $\alpha = 0.95$ ，任务丢失惩罚 $M_U = 5$ ；e 切片的任务丢失惩罚 $M_e = 3$ ；m 切片的任务丢失惩罚 $M_m = 1$ 。

4.3 模型建立

为便于与问题二形成统一的时域建模框架，本文在问题一中即引入时间索引 t 。问题一为单时刻静态场景，求解时将 t 固定为某一决策时刻（记为 $t = t_0$ ）。

4.3.1 传输速率计算

根据附录中的信号传输模型，用户 k 在时刻 t 获得 $i_k(t)$ 个资源块时的接收功率为：

$$p_{\text{rx},k}(t) = 10^{\frac{p_{\text{tx}} - \phi_k(t)}{10}} \cdot |h_k(t)|^2 \quad (\text{mW}) \quad (1)$$

其中， p_{tx} 为基站发射功率（dBm）， $\phi_k(t)$ 为大规模衰减（dB）， $h_k(t)$ 为小规模瑞利衰落系数， $p_{\text{rx},k}(t)$ 为接收功率（mW）。

考虑噪声功率的影响，噪声功率谱密度为：

$$N_0(i_k(t)) = -174 + 10 \log_{10}(i_k(t) \cdot b) + 7 \quad (\text{dBm}) \quad (2)$$

其中， $i_k(t)$ 为用户 k 在时刻 t 占用的 RB 数量， b 为单 RB 带宽（Hz）， -174 dBm/Hz 为热噪声谱密度， 7 dB 为噪声系数。

信干噪比（SINR）在无干扰情况下简化为信噪比（SNR）：

$$\gamma_k(t) = \frac{p_{\text{rx},k}(t)}{10^{\frac{N_0(i_k(t))}{10}}} \quad (3)$$

其中， $N_0(\cdot)$ 以 dBm 计， $10^{\frac{N_0(i_k(t))}{10}}$ 为噪声功率（mW）。

根据香农公式，用户 k 在时刻 t 的传输速率为：

$$r_k(t) = i_k(t) \cdot b \cdot \log_2(1 + \gamma_k(t)) \quad (\text{bps}) \quad (4)$$

其中, $r_k(t)$ 为传输速率 (bps), $i_k(t)$ 为 RB 数量, b 为单 RB 带宽。

4.3.2 时延计算模型

根据附录中描述的用户任务服务流程, 用户的总时延由排队时延和传输时延两部分构成。

用户 k 的传输时延 T_k 为完成其任务数据量 D_k 所需的传输时间, 计算公式为:

$$T_k(t) = \frac{D_k \times 10^6}{r_k(t)} \quad (\text{s}) \quad (5)$$

其中, D_k 为任务数据量 (Mbit), $r_k(t)$ 为用户在时刻 t 的传输速率 (bps)。

用户的总时延 L_k^s 为排队时延 Q_k 与传输时延 T_k 之和:

$$L_k^s(t) = Q_k(t) + T_k(t), \quad s \in \{U, e, m\} \quad (6)$$

其中, $Q_k(t)$ 是在该次决策窗口内调度过程中产生的等待时间。

4.3.3 服务质量评估函数

根据附录中的用户服务质量定义, 并结合计算出的总时延, 不同切片的 QoS 评估函数如下:

(1) U 切片 (URLLC)

服务质量函数为:

$$y_k^U(t) = \begin{cases} \alpha^{L_k^U(t)} & \text{若 } L_k^U(t) \leq L_U^{\text{SLA}} \\ -M_U & \text{若 } L_k^U(t) > L_U^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\alpha \in (0, 1)$ 为效益折扣系数 (本题取 $\alpha = 0.95$), M_U 为 U 切片任务丢失惩罚系数, L_U^{SLA} 为 U 切片时延 SLA。

(2) e 切片 (eMBB)

e 切片用户采用三段式 QoS 函数:

$$y_k^e(t) = \begin{cases} 1 & \text{若 } r_k(t) \geq r_e^{\text{SLA}} \text{ 且 } L_k^e(t) \leq L_e^{\text{SLA}} \\ \frac{r_k(t)}{r_e^{\text{SLA}}} & \text{若 } r_k(t) < r_e^{\text{SLA}} \text{ 且 } L_k^e(t) \leq L_e^{\text{SLA}} \\ -M_e & \text{若 } L_k^e(t) > L_e^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (8)$$

其中, r_e^{SLA} 、 L_e^{SLA} 分别为 e 切片的速率与时延 SLA, M_e 为惩罚系数。

(3) m 切片 (mMTC)

每个 mMTC 用户 k 的 QoS 评估为:

$$y_k^m(t) = \begin{cases} \frac{\sum_{i \in \mathcal{U}_m} c_i'(t)}{\sum_{i \in \mathcal{U}_m} c_i(t)} & \text{若 } L_k^m(t) \leq L_m^{\text{SLA}} \\ -M_m & \text{若 } L_k^m(t) > L_m^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (9)$$

其中, \mathcal{U}_m 为 m 切片用户集合, $c_i(t)$ 表示是否有任务需求, $c_i'(t)$ 表示是否成功接入。

4.3.4 优化模型

基于上述分析, 建立如下单时刻 (t 固定) 优化模型:

$$\begin{aligned} \max_{n_U(t), n_e(t), n_m(t)} \quad & Q(t) = \sum_{k \in \mathcal{U}_U} y_k^U(t) + \sum_{k \in \mathcal{U}_e} y_k^e(t) + \sum_{k \in \mathcal{U}_m} y_k^m(t) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} n_U(t) + n_e(t) + n_m(t) = N \\ n_U(t) \bmod 10 = 0 \\ n_e(t) \bmod 5 = 0 \\ n_m(t) \bmod 2 = 0 \\ n_s(t) \in \mathbb{Z}_{\geq 0}, \quad \forall s \in \mathcal{S} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $n_U(t), n_e(t), n_m(t)$ 分别为时刻 t 分配给 U、e、m 切片的 RB 个数, $\mathcal{S} = \{U, e, m\}$, \mathcal{U}_s 为切片 s 的用户集合; $y_k^U(t)$ 、 $y_k^e(t)$ 、 $y_k^m(t)$ 为用户级 QoS 得分。

其中, 第一个约束为资源块总数限制, 随后三行分别为 URLLC、eMBB、mMTC 的占用粒度约束, 最后为非负整数约束。

4.4 模型求解

该优化问题属于整数规划问题, 考虑到总资源块数量有限 ($N = 50$), 且各切片用户占用 RB 数量固定, 使得分配给各切片的 RB 数量 $n_s(t)$ 的可行组合是有限的。因此, 我们采用枚举法结合调度仿真的策略进行求解, 以确保找到全局最优解。算法流程如下 (本题固定单个决策时刻 $t = t_0$):

Step1: 生成 RB 分配方案

我们枚举所有满足约束条件的 RB 分配方案 $(n_U(t), n_e(t), n_m(t))$ 。为避免资源浪费, 分配给各切片的 RB 数量应为其用户占用量的整数倍。具体地:

- $n_U(t)$ 在 $\{0, 10, 20, \dots, 50\}$ 中取值。
- $n_e(t)$ 在 $\{0, 5, 10, \dots, 50 - n_U(t)\}$ 中取值。
- $n_m(t) = 50 - n_U(t) - n_e(t)$, 并检验 $n_m(t)$ 是否为 2 的倍数。若否则舍弃该方案。

Step2: 切片内调度与性能计算

对于每一个有效的 RB 分配方案，我们在各切片内部独立进行调度仿真，以计算每个用户的性能指标。

- **并发容量计算：**对于切片 $s \in \{U, e, m\}$ ，其并发服务能力为 $C_s = \lfloor n_s(t)/v_s \rfloor$ 。
- **串并行调度：**在 100ms 决策周期内，我们采用一种串并行的服务策略。初始时，将前 C_s 个用户（按用户编号排序）分配至并发信道进行传输。当某个用户完成传输后，其占用的信道立即释放，并分配给队列中的下一个用户。
- **性能计算：**通过该调度过程，我们可以计算出每个用户 k 的传输时延 $T_k(t)$ 和等待时延 $Q_k(t)$ ，从而得到总时延 $L_k(t) = Q_k(t) + T_k(t)$ 。用户的传输速率 $r_k(t)$ 也一并计算得出。

Step3: 服务质量评估

根据步骤 2 计算出的性能指标 (L_k, r_k) ，我们依据模型中定义的服务质量评估函数计算每个用户的 QoS 得分 y_k^s ，并汇总得到当前 RB 分配方案下的总服务质量 $Q = \sum y_k^s$ 。

Step4: 寻找最优方案

遍历所有 RB 分配方案后，总服务质量 Q 最高的方案即为问题的最优解。我们记录下最优方案对应的 (n_U, n_e, n_m) 组合、各用户的详细性能指标以及最终的总 QoS 值。

4.5 求解结果

通过执行上述算法，我们得到的最优资源分配方案及对应的性能指标如下：

最优资源分配方案

经枚举计算，我们找到了 3 个并列的最优资源分配方案，它们均能使系统总服务质量达到最大值 15.7823。这三个方案的具体 RB 分配如下表所示。

表 1 并列最优资源分配方案

| 方案 | URLLC RB 数 (n_U) | eMBB RB 数 (n_e) | mMTC RB 数 (n_m) | 总 QoS |
|----|----------------------|---------------------|---------------------|---------|
| 1 | 20 | 10 | 20 | 15.7823 |
| 2 | 20 | 20 | 10 | 15.7823 |
| 3 | 30 | 10 | 10 | 15.7823 |

在以上所有方案中，各切片获得的 QoS 合计分数均相同，分别为：URLLC QoS 合计 1.9870，eMBB QoS 合计 3.7953，mMTC QoS 合计 10.0000。

结果分析

- **最优性分析：**计算结果显示，存在三个不同的 RB 分配方案能够达到相同的最优目标函数值 15.7823，如上表1所示。这些方案的共同点在于，它们为 URLLC、eMBB 和 mMTC 切片带来的 QoS 贡献是完全相同的。这表明在当前用户任务和信道条件

下, 只要分配给 U 切片、eMBB 切片和 mMTC 切片的 RB 数量分别不低于 20、10 和 10 个, 就能保证所有用户达到最佳的服务水平。这种现象说明资源配置具有一定的灵活性和鲁棒性。

- **用户性能详情:** 在任何一个最优方案下, 各用户的性能指标均相同。所有 URLLC 用户的时延均远低于 5ms 的 SLA 要求 (如 U1 为 0.145ms, U2 为 0.110ms), QoS 得分接近 1。eMBB 用户中, e1, e2, e4 满足速率与时延双重标准, QoS 为 1; e3 用户速率未达标 ($39.77 \text{ Mbps} < 50 \text{ Mbps}$), 但仍在 SLA 时延内, 获得了比例得分 0.7953。所有 mMTC 用户均在极低时延下完成传输 (均小于 1ms), 远优于 500ms 的 SLA 标准, 因此获得了满分。
- **资源效率与选择:** 这三个方案均实现了资源的高效利用。在实际部署中, 可以根据网络运营商的偏好进行选择。例如, 方案 1 (20, 10, 20) 为 mMTC 分配了最多的资源, 适合未来 mMTC 连接数可能增加的场景; 方案 2 (20, 20, 10) 则向 eMBB 倾斜, 适合视频流量大的场景; 方案 3 (30, 10, 10) 则最优先保障 URLLC 业务。这些方案共同构成了问题的最优解集。

综上所述, 我们提出的资源分配方案能够有效满足各类切片用户的服务需求, 实现了系统整体服务质量的最优。

5 问题二的模型的建立和求解

5.1 问题二的描述与分析

问题二考虑动态环境下的多时间段资源分配场景。与问题一的静态单时刻分配不同, 问题二面临用户移动性、信道时变性以及任务队列动态变化的复杂问题。在 1000ms 的观测窗口内, 系统需要每 100ms 进行一次资源分配决策 (共 10 次), 既要处理新到达的任务, 又要考虑积压在排队队列中的历史任务。这是一个多阶段动态优化问题, 需要在时间维度上综合考虑任务到达、信道变化和排队延迟的耦合影响。

5.2 预备工作

5.3 模型建立

问题二模型大部分与问题一相同, 不同之处在于问题二允许 t 在决策窗口内按 $\mathcal{T} = \{0, 100, \dots, 900\}$ 演化, 并引入任务到达与队列动态。为避免重复, 问题二中与问题一中相同的定义与公式不再赘述。

5.3.1 任务队列动态演化模型

为精确描述任务的动态变化, 我们引入两个时间尺度:

- **决策时刻 t :** 每 100ms 进行一次资源分配决策, 对应 $t \in \{0, 100, 200, \dots, 900\}$ 。
- **仿真时刻 τ :** 以 1ms 为步长, 用于模拟任务到达和信道变化, τ 表示具体的毫秒时刻。

定义用户 k 在时刻 t 的任务队列状态:

- $A_{k,\tau}(t)$: 用户 k 在时刻 τ 到达且在时刻 t 仍在队列中的任务数据量 (Mbit)
- $Q_k(t) = \sum_{\tau=0}^t A_{k,\tau}(t)$: 用户 k 在时刻 t 的总排队任务量
- $W_k(t)$: 用户 k 在时刻 t 已等待的排队时间

任务队列的动态演化遵循以下规律:

(1) 任务到达: 在每个 1ms 时刻 τ , 根据数据文件读取新到达任务:

$$A_{k,\tau}(\tau) = \text{TaskFlow}_k(\tau) \quad (11)$$

(2) 任务服务: 在决策时刻 t , 若用户 k 被分配 $i_k(t)$ 个 RB, 则在接下来的 100ms 内可传输的数据量为:

$$S_k(t) = r_k(t) \times 0.1 \times 10^{-6} \quad (\text{Mbit}) \quad (12)$$

(3) 队列更新: 任务按 FIFO (先进先出) 顺序服务, 队列更新规则为:

$$Q_k(t+100) = \max \left(0, Q_k(t) + \sum_{\tau=t+1}^{t+100} \text{TaskFlow}_k(\tau) - S_k(t) \right) \quad (13)$$

5.3.2 时延计算模型 (任务级)

由于存在到达过程, 问题二按任务到达时刻进行时延度量。对于用户 k 在时刻 τ 到达的任务, 其总时延包含排队时延和传输时延:

(1) 排队时延: 任务在时刻 τ 到达, 在时刻 t_{start} 开始服务, 则排队时延为:

$$Q_{k,\tau} = t_{\text{start}} - \tau \quad (14)$$

(2) 传输时延: 假设任务从时刻 t_{start} 开始传输, 数据量为 $D_{k,\tau}$, 则传输时延为:

$$T_{k,\tau} = \frac{D_{k,\tau} \times 10^6}{r_k(t_{\text{start}})} \quad (15)$$

(3) 总时延:

$$L_{k,\tau}^s = Q_{k,\tau} + T_{k,\tau}, \quad s \in \{U, e, m\} \quad (16)$$

5.3.3 动态服务质量评估函数

在多时间段场景下, 各切片的 QoS 评估在问题一基础上作如下时间聚合:

(1) URLLC 切片: 对于在时间窗口 $[0, 1000]$ ms 内完成的所有 URLLC 任务:

$$y_{k,\tau}^U = \begin{cases} \alpha^{L_{k,\tau}^U} & \text{若 } L_{k,\tau}^U \leq L_U^{\text{SLA}} \\ -M_U & \text{若 } L_{k,\tau}^U > L_U^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (17)$$

(2) eMBB 切片：对于在决策时刻 t 服务的 eMBB 用户 k ：

$$y_k^e(t) = \begin{cases} 1 & \text{若 } r_k(t) \geq r_e^{\text{SLA}} \text{ 且 } L_{k,\tau}^e \leq L_e^{\text{SLA}} \\ \frac{r_k(t)}{r_e^{\text{SLA}}} & \text{若 } r_k(t) < r_e^{\text{SLA}} \text{ 且 } L_{k,\tau}^e \leq L_e^{\text{SLA}} \\ -M_e & \text{若 } L_{k,\tau}^e > L_e^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (18)$$

(3) mMTC 切片：在每个决策时刻 t ，对每个 mMTC 用户 k 的 QoS 评估为：

$$y_k^m(t) = \begin{cases} \frac{\sum_{i \in \mathcal{U}_m} c_i'(t)}{\sum_{i \in \mathcal{U}_m} c_i(t)} & \text{若 } L_k^m(t) \leq L_m^{\text{SLA}} \\ -M_m & \text{若 } L_k^m(t) > L_m^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (19)$$

其中， $c_i(t)$ 表示用户 i 在时刻 t 是否有待服务任务， $c_i'(t)$ 表示是否成功接入服务。

5.3.4 多时间段优化模型

基于上述分析，建立如下多时间段动态优化模型（目标在整个时间窗口跨 t 求和）：

$$\begin{aligned} \max_{\{n_s(t)\}_{s,t}} \quad & Q_{\text{total}} = \sum_{t \in \mathcal{T}} \left[\sum_{k \in \mathcal{U}_U} y_k^U(t) + \sum_{k \in \mathcal{U}_e} y_k^e(t) + \sum_{k \in \mathcal{U}_m} y_k^m(t) \right] \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} n_U(t) + n_e(t) + n_m(t) = 50 \\ n_U(t) \bmod 10 = 0, n_e(t) \bmod 5 = 0, n_m(t) \bmod 2 = 0 \\ Q_k(t+100) = \max(0, Q_k(t) + \Delta A_k(t) - S_k(t)) \\ n_s(t) \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \\ \forall t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S}, \forall k \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

其中， $\mathcal{T} = \{0, 100, 200, \dots, 900\}$ 为决策时刻集合， $n_s(t)$ 为时刻 t 分配给切片 s 的 RB 数量， $Q_k(t)$ 为用户 k 在时刻 t 的排队任务量， $\Delta A_k(t)$ 为时间段 $[t, t+100)$ 内用户 k 的新增任务量。

该模型的核心挑战在于：(1) 状态空间的指数级增长；(2) 任务到达的随机性与信道的时变性；(3) 排队时延与传输时延的耦合优化。需要设计高效的求解算法来处理这一复杂的多阶段随机优化问题。

5.4 模型求解

问题二是一个多阶段动态优化问题。由于状态空间（用户队列、信道状况）随时间演化，且任务到达具有随机性，精确求解该问题通常需要复杂的动态规划或强化学习方法，计算成本极高。考虑到决策周期较短，且需要快速响应，我们采用一种基于模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）思想的贪心策略（Myopic Policy），也称为“单

步前瞻优化”。该策略在每个决策窗口的起点，仅优化当前窗口的性能，而不考虑对未来窗口的长期影响。这种方法在实践中被证明是有效且计算可行的。

算法的核心思想是：在每个决策时刻 $t \in \{0, 100, \dots, 900\}$ ，我们面对当前的系统状态（主要是各用户的任务队列），通过枚举所有可能的 RB 分配方案，并对每种方案进行精细化的仿真，来预测未来 100ms 内的系统服务质量。然后，我们选择能使当前窗口 QoS 最大化的方案进行实施，并将演化后的系统状态作为下一个决策时刻的初始条件。具体算法流程如下：

Step1：初始化

在仿真开始时刻 $t = 0$ ，初始化所有用户的任务队列为空。

Step2：逐窗口迭代决策

对于每个决策窗口 w （对应时间段 $[t, t + 100)$ ，其中 $t = w \times 100$ ）：

1. **生成 RB 分配方案**：与问题一类似，我们首先枚举所有满足约束条件的 RB 分配方案 $(n_U(t), n_e(t), n_m(t))$ 。确保资源总量为 50，且每个切片的 RB 数量满足其最小占用粒度（URLLC 为 10 的倍数，eMBB 为 5 的倍数，mMTC 为 2 的倍数）。
2. **窗口内调度仿真与评估**：对于每一个生成的 RB 分配方案，我们执行一次为期 100ms 的详细仿真，以评估其性能。
 - **初始状态**：仿真从当前决策时刻 t 的系统状态开始，包括所有用户当前的排队任务。
 - **动态演化**：在 100ms 的仿真窗口内，我们以 1ms 为步长进行演化：
 - **任务到达**：根据附件二的数据，在每个 1ms 时刻，将新到达的任务加入对应用户的队列。
 - **调度与服务**：根据当前切片的并发容量 $C_s = \lfloor n_s(t)/v_s \rfloor$ ，采用“编号靠前优先”的原则，为有任务排队的用户分配服务信道。正在服务的用户将根据其在当前 ms 的信道质量计算出的速率来处理任务。
 - **资源释放与接续**：当一个用户的任务完成时，其占用的并发槽位被立即释放。调度器会立刻检查该切片内是否有其他排队的用户（同样按编号顺序），若有则立即接续服务。
 - **性能计算**：在仿真过程中，我们精确记录每个任务的到达、开始服务和完成的时刻，从而计算其端到端时延。对于在当前 100ms 窗口内完成的每一个任务，我们根据其所属切片的服务质量评估函数计算 QoS 得分。
3. **选择最优方案并更新状态**：遍历所有 RB 分配方案后，我们选择在当前窗口内获得累计 QoS 总分最高的方案作为本次决策的结果。然后，我们将该最优方案对应的仿真结束时刻 $(t + 100)$ 的用户队列状态，作为下一个决策窗口的初始状态。

Step3：汇总结果

重复 Step2，直到完成所有 10 个决策窗口（ $t = 0$ 至 $t = 900$ ）的决策。最后，将每个窗口获得的最优 QoS 得分进行累加，得到整个 1000ms 内的总服务质量。通过这种方式，我们得到了一系列动态的 RB 分配决策，以及最终的系统整体性能评估。

5.5 求解结果

通过执行上述基于 MPC 的贪心算法，我们得到了 1000ms 内的动态资源分配策略，其总服务质量达到了 **352.1029**。

5.5.1 最优资源分配序列

算法在 10 个决策窗口中选择的 RB 分配序列如下表所示。该序列是在每个窗口选择瞬时最优解（若有多个则选择第一个）的结果。

表 2 问题二动态资源分配序列

| 决策时刻 (ms) | URLLC RB 数 (n_U) | eMBB RB 数 (n_e) | mMTC RB 数 (n_m) | 窗口 QoS |
|-----------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| 0 | 10 | 20 | 20 | 65.490 |
| 100 | 10 | 20 | 20 | 40.028 |
| 200 | 10 | 20 | 20 | 38.835 |
| 300 | 10 | 0 | 40 | 32.800 |
| 400 | 20 | 0 | 30 | 31.850 |
| 500 | 10 | 0 | 40 | 24.250 |
| 600 | 10 | 0 | 40 | 27.100 |
| 700 | 20 | 0 | 30 | 32.800 |
| 800 | 20 | 0 | 30 | 31.850 |
| 900 | 20 | 0 | 30 | 27.100 |
| 总计 | - | - | - | 352.103 |

在整个仿真周期内，各切片累计获得的 QoS 分数分别为：URLLC QoS 合计 **205.8175**，eMBB QoS 合计 **46.2854**，mMTC QoS 合计 **100.0000**。

5.5.2 并列最优解分析

值得注意的是，在多个决策窗口中，算法发现了多个能够达到相同最优 QoS 的 RB 分配方案。这为网络运营商提供了在满足性能目标的同时，根据其他策略（如能耗、资源均衡等）进行选择的灵活性。下表列出了部分存在并列最优解的决策时刻及其方案。

表 3 部分决策窗口的并列最优方案

| 决策时刻 (ms) | 窗口最优 QoS | 并列最优 RB 分配方案 (n_U, n_e, n_m) |
|-----------|----------|----------------------------------|
| 300 | 32.800 | (10, 0, 40) |
| | | (20, 0, 30) |
| | | (30, 0, 20) |
| 400 | 31.850 | (20, 0, 30) |
| | | (30, 0, 20) |
| | | (40, 0, 10) |
| 600 | 27.100 | (10, 0, 40) |
| | | (20, 0, 30) |
| | | (30, 0, 20) |
| 900 | 27.100 | (20, 0, 30) |
| | | (30, 0, 20) |

5.5.3 结果分析

- **动态适应性：**从资源分配序列（表 2）可以看出，算法展现了良好的动态适应性。在仿真初期（0-300ms），eMBB 业务有大量任务到达，算法明智地为其分配了 20 个 RB 以快速处理，获得了较高的 QoS。在 300ms 后，eMBB 任务队列清空，算法果断地将其 RB 资源完全回收，转而分配给 URLLC 和 mMTC，以应对后续的 URLLC 任务并保证 mMTC 的稳定接入。
- **资源分配的灵活性：**如表 3 所示，从 300ms 开始，系统中出现了大量的并列最优解。这些方案的共同点是都放弃了为 eMBB 分配资源（因为其队列已空），而将资源在 URLLC 和 mMTC 之间进行权衡。例如在 300ms 时，(10, 0, 40), (20, 0, 30), (30, 0, 20) 三种方案都能达到相同的最优 QoS。这表明在满足核心性能指标后，资源配置具有相当的灵活性。运营商可以根据长期策略选择更偏向 URLLC（保障未来可能的高优先级任务）或更偏向 mMTC（扩大连接容量）的方案。
- **切片性能分析：**URLLC 切片的所有任务均在远低于 SLA（5ms）的时延内完成，获得了很高的 QoS 分数。eMBB 切片在前期获得了足够的资源，其 QoS 贡献主要来自前 300ms。mMTC 切片由于其“尽力而为”和高并发的特性，在整个周期内稳定地获得了满分的 QoS。这说明我们采用的 MPC 贪心策略成功地平衡了三类业务的需求。

综上所述，我们提出的动态资源分配模型与求解算法，能够在时变的信道和任务到达条件下，做出快速有效的决策，实现了系统在整个时间窗口内总服务质量的最优。

6 问题三的模型的建立和求解

6.1 问题三的描述与分析

6.2 预备工作

6.2.1 集合、索引与参数

为适配附件三的多微基站、同频复用且存在小区间干扰的场景，定义如下集合与索引：

- 基站集合： $\mathcal{N} = \{1, 2, 3\}$ （分别对应 BS1、BS2、BS3）。
- 切片集合： $\mathcal{S} = \{U, e, m\}$ ，分别对应 URLLC、eMBB、mMTC。
- 用户集合： $\mathcal{K} = \mathcal{K}_U \cup \mathcal{K}_e \cup \mathcal{K}_m$ ，其中 $\mathcal{K}_U = \{U1, U2\}$ ， $\mathcal{K}_e = \{e1, \dots, e12\}$ ， $\mathcal{K}_m = \{m1, \dots, m30\}$ 。
- 决策时刻集合： $\mathcal{T} = \{0, 100, \dots, 900\}$ （单位 ms），每个决策窗口长度为 100 ms；窗口内以 1 ms 步长进行链路与队列仿真，记窗口内细粒度时刻集合为 $\mathcal{F}(t) = \{t, t+1, \dots, t+99\}$ 。

关键系统参数（与问题一、二保持一致）：

- 每站可用 RB 总数 $R_{\text{tot}} = 50$ ；单 RB 带宽 $b = 360$ kHz；噪声系数 $NF = 7$ dB；
- 切片占用粒度： $i_U = 10$ ， $i_e = 5$ ， $i_m = 2$ （每个并发用户占用的 RB 数）；
- 发射功率决策范围（第三问）： $p_{n,s}(t) \in [10, 30]$ dBm，为“基站 n 在窗口 t 对切片 s 的统一每 RB 功率”（切片内各 RB 功率一致）。

6.3 模型建立

6.3.1 信道与干扰模型

附件三提供了每 1 ms 的大规模损耗 $\phi_{n,k}(\tau)$ (dB) 与小规模瑞利衰落 $h_{n,k}(\tau)$ 。设窗口 $t \in \mathcal{T}$ 内细粒度时刻为 $\tau \in \mathcal{F}(t)$ ，若用户 $k \in \mathcal{K}_s$ 在窗口 t 由基站 n 服务且被分配切片 s 的 RB，则其接收功率 (mW) 为

$$p_{\text{rx},n \rightarrow k}(\tau) = 10^{\frac{p_{n,s}(t) - \phi_{n,k}(\tau)}{10}} \cdot |h_{n,k}(\tau)|^2. \quad (21)$$

噪声功率与占用 RB 数 i 成正比，换算为线性功率 (mW)：

$$N_0(i) = 10^{\frac{-174 + 10 \log_{10}(i \cdot b) + NF - 30}{10}}. \quad (22)$$

微基站同频复用引入同信道干扰。为保持“同一 RB 索引才互扰”的规则，我们令每站在窗口 t 内将其 50 个 RB 在频域上按切片连续划分且次序固定（例如 U-e-m），每

个切片获得一段连续 RB 区间，跨站的相同 RB 索引构成同信道。于是用户 k 的瞬时信干噪比为

$$\gamma_k(\tau) = \frac{p_{\text{rx},n \rightarrow k}(\tau)}{\sum_{u \in \mathcal{N}, u \neq n} I_{u \rightarrow k}(\tau) + N_0(i_s)}, \quad s \in \mathcal{S}, \quad (23)$$

其中 $I_{u \rightarrow k}(\tau)$ 表示来自他站 u 、在与 k 所占 RB 索引重叠的切片 RB 上的干扰功率，按与上式相同的接收功率表达（由 $p_{u,s'}(t), \phi_{u,k}(\tau), h_{u,k}(\tau)$ 决定）。基于香农公式，窗口内瞬时速率为

$$r_k(\tau) = i_s \cdot b \cdot \log_2(1 + \gamma_k(\tau)) \quad (\text{bps}). \quad (24)$$

6.3.2 任务到达与队列演化

任务队列的动态演化过程与问题二完全一致，队列状态 $Q_k(t)$ 仍以每个用户为中心进行追踪，其演化遵循公式 (13)。

关键区别在于，服务量 $S_k(t)$ 的计算变得更为复杂，因为它取决于用户 k 在当前窗口 t 接入了哪个基站 n ，以及所有基站的功率决策 $\{p_{n,s}(t)\}$ 。这将在后续的服务质量评估函数中具体体现。

6.3.3 RB 切片并发与调度规则

令 $x_{n,s}(t)$ 为窗口 t 时基站 n 切片 s 的 RB 数，满足 $\sum_{s \in \mathcal{S}} x_{n,s}(t) = R_{\text{tot}}$ 。切片 s 的并发容量为

$$C_{n,s}(t) = \lfloor x_{n,s}(t) / i_s \rfloor. \quad (25)$$

窗口内采用“编号靠前优先”的串-并行调度：每个 (n, s) 最多同时服务 $C_{n,s}(t)$ 个队头任务，任务完成即释放并补位。URLLC 在切片内可按紧迫度（距 SLA 的剩余时限）优先。

6.3.4 QoS 评估函数

服务质量（QoS）的评估与前几问一致，核心是衡量每个任务的时延和速率是否满足服务等级协议（SLA）。

首先，我们需要计算每个任务的总时延。对于一个在时刻 τ 到达、数据量为 $D_{k,\tau}$ 的任务，其总时延 $L_{k,\tau}^s$ 由排队时延和传输时延两部分构成：

$$L_{k,\tau}^s = \underbrace{(t_{\text{start}} - \tau)}_{\text{排队时延}} + \underbrace{\frac{D_{k,\tau} \cdot 10^6}{\bar{r}_k(t_{\text{start}})}}_{\text{传输时延}} \quad (26)$$

其中， t_{start} 是该任务开始被服务的时刻， $\bar{r}_k(t_{\text{start}})$ 是服务期间的平均数据速率。

然后，基于计算出的时延和瞬时速率，我们采用与前文相同的任务级 QoS 函数 $y_{k,\tau}^s$ ：

$$y_{k,\tau}^U = \begin{cases} \alpha^{L_{k,\tau}^U} & L_{k,\tau}^U \leq L_U^{\text{SLA}} \\ -M_U & \text{否则} \end{cases} \quad (27)$$

$$y_{k,\tau}^e = \begin{cases} 1 & r_k(\tau_{\text{srv}}) \geq r_e^{\text{SLA}} \text{ and } L_{k,\tau}^e \leq L_e^{\text{SLA}} \\ \frac{r_k(\tau_{\text{srv}})}{r_e^{\text{SLA}}} & r_k(\tau_{\text{srv}}) < r_e^{\text{SLA}} \text{ and } L_{k,\tau}^e \leq L_e^{\text{SLA}} \\ -M_e & \text{否则} \end{cases} \quad (28)$$

$$y_{k,\tau}^m = \begin{cases} \frac{\sum_{i \in \mathcal{K}_m} c'_i}{\sum_{i \in \mathcal{K}_m} c_i} & L_{k,\tau}^m \leq L_m^{\text{SLA}} \\ -M_m & \text{否则} \end{cases} \quad (29)$$

参考取值： $\alpha = 0.95$ ， $r_e^{\text{SLA}} = 50 \text{ Mbps}$ ， $L_U^{\text{SLA}} = 5 \text{ ms}$ ， $L_e^{\text{SLA}} = 100 \text{ ms}$ ， $L_m^{\text{SLA}} = 500 \text{ ms}$ ， $M_U = 5$ ， $M_e = 3$ ， $M_m = 1$ 。

6.3.5 决策变量与优化模型

决策变量：

- RB 切片分配： $x_{n,s}(t) \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$
- 发射功率： $p_{n,s}(t) \in [10, 30] \text{ (dBm)}$
- 接入关联： $a_{n,k}(t) \in \{0, 1\}$ ，当 $a_{n,k}(t) = 1$ 则 k 在窗口 t 仅由站 n 调度

综合上述要素，第三问的动态联合优化模型可表述为（跨 10 个窗口聚合）：

$$\begin{aligned} \max_{\{x,p,a\}} \quad & Q_{\text{total}} = \sum_{t \in \mathcal{T}} \left[\sum_{k \in \mathcal{K}_U} \sum_{\tau \in \mathcal{A}_k(t)} y_{k,\tau}^U + \sum_{k \in \mathcal{K}_e} \sum_{\tau \in \mathcal{A}_k(t)} y_{k,\tau}^e + \sum_{k \in \mathcal{K}_m} \sum_{\tau \in \mathcal{A}_k(t)} y_{k,\tau}^m \right] \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{s \in \mathcal{S}} x_{n,s}(t) = 50 \\ x_{n,U}(t) \bmod 10 = 0, x_{n,e}(t) \bmod 5 = 0, x_{n,m}(t) \bmod 2 = 0 \\ x_{n,s}(t) \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \\ 10 \leq p_{n,s}(t) \leq 30 \\ Q_k(t+100) = \max \left\{ 0, Q_k(t) + \sum_{\tau \in \mathcal{F}(t)} D_k(\tau) - S_k(t) \right\} \\ r_k(\tau), \gamma_k(\tau) \text{ 由 } (x, p, a) \text{ 与 } (\phi, h) \text{ 及调度生成} \\ \sum_{n \in \mathcal{N}} a_{n,k}(t) \leq 1 \\ \forall n \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, \forall n, k, s, t \end{cases} \end{aligned} \quad (30)$$

其中 $\mathcal{A}_k(t) \subseteq \mathcal{F}(t)$ 为窗口 t 内属于用户 k 且在 SLA 内完成的任务到达时刻集合； $r_k(\tau)$ 与 $S_k(t)$ 均受干扰耦合与调度影响，是 (x, p, a) 的非线性函数。
该模型体现了“多站同频干扰 + 切片化 RB 分配 + 切片级功率控制 + 任务队列”的耦合特性，属于带整数约束与非凸干扰项的时变 MINLP 问题。

6.4 模型求解

Step1:

Step2:

Step3:

6.5 求解结果

7 问题四的模型的建立和求解

7.1 问题四的描述与分析

本问引入宏基站（Macro BS, 记作 MBS）与多个微基站（Small BS, 记作 SBS）的异构蜂窝网络：MBS 具备更充裕的频谱资源且覆盖广；SBS 负责边缘热点的增强覆盖。题设指出 MBS 与所有 SBS 采用不重叠频谱，因此跨层无干扰；但各 SBS 之间同频复用，存在相互干扰。系统每 100ms 进行一次联合决策，周期内以 1ms 进行仿真演化。与第三问相比，第四问新增了跨层接入模式决策：每个用户要么接入最近的 SBS，要么接入 MBS（SBS 的选择被限定为“最近微站”）。

资源与功率设定：MBS 拥有 100 个 RB，功率范围 [10, 40] dBm；每个 SBS 拥有 50 个 RB，功率范围 [10, 30] dBm。三类切片的 RB 占用粒度与 SLA 约束与前几问一致（URLLC/eMBB/mMTC 分别占用 10/5/2 个 RB，并满足表中速率/时延/SLA/惩罚系数约束）。附件四提供了 1000ms 窗口内各用户任务到达与位置、MBS 与各 SBS 的大/小规模衰落时序数据，支撑逐毫秒的链路与队列仿真。

本问是一个“跨层接入 + 多站切片 + 切片级功率控制 + 队列与 SLA 约束 + SBS 间干扰耦合”的时变混合整数非凸优化问题（MINLP）。为保持可计算性，下文给出一致化的符号体系、精确的数学建模与可操作的分层求解策略。

7.2 预备工作

7.2.1 集合、索引与参数

- 基站集合： $\bar{\mathcal{N}} = \{0\} \cup \mathcal{N}$ ，其中 0 表示 MBS， $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N_s\}$ 表示 SBS 集合（附件四为三站示例： $N_s = 3$ ）。
- 切片集合： $\mathcal{S} = \{U, e, m\}$ ，分别对应 URLLC/eMBB/mMTC。

- 用户集合: $\mathcal{K} = \mathcal{K}_U \cup \mathcal{K}_e \cup \mathcal{K}_m$ 。
- 决策时刻集合: $\mathcal{T} = \{0, 100, \dots, 900\}$ (单位 ms); 窗口内细粒度时刻集合: $\mathcal{F}(t) = \{t, t+1, \dots, t+99\}$ 。
- RB 总数: $R_0 = 100$ (MBS), $R_n = 50$ ($n \in \mathcal{N}$, SBS)。单 RB 带宽 $b = 360$ kHz, 噪声系数 $NF = 7$ dB。
- 切片占用粒度: $i_U = 10$, $i_e = 5$, $i_m = 2$ (每个并发用户占用的 RB 数)。
- 发射功率范围: $p_{0,s}(t) \in [10, 40]$ dBm (MBS), $p_{n,s}(t) \in [10, 30]$ dBm (SBS, $n \in \mathcal{N}$), 为“基站 n 在窗口 t 对切片 s 的统一每 RB 功率”。

附件四提供 $\phi_{n,k}(\tau)$ (dB, 大规模损耗)、 $h_{n,k}(\tau)$ (瑞利小尺度) 与任务到达序列 $D_k(\tau)$ 。决策窗口内按 1ms 时间步精确计算链路与服务过程。

7.3 模型建立

7.3.1 信道与干扰模型

本问的信道模型核心要素与前文一致, 用户的瞬时接收功率 $p_{\text{rx},n \rightarrow k}(\tau)$ 与热噪声功率 $N_0(i_s)$ 的计算公式保持不变。我们在此基础上, 重点阐述第四问独特的异构网络干扰模型。

根据题目设定, 宏基站 (MBS, $n = 0$) 与所有微基站 (SBS, $n \in \mathcal{N}$) 工作在不同频段, 因此它们之间不存在跨层干扰。干扰仅存在于同频部署的各个 SBS 之间。用户的信干噪比 (SINR) $\gamma_k(\tau)$ 因此取决于其所接入的基站类型:

- 当用户接入 MBS ($n = 0$) 时, 不存在干扰, 其接收质量由信噪比 (SNR) 决定:

$$\gamma_k(\tau) = \frac{p_{\text{rx},0 \rightarrow k}(\tau)}{N_0(i_s)}, \quad \text{若 } a_{0,k}(t) = 1 \quad (31)$$

- 当用户接入 SBS ($n \in \mathcal{N}$) 时, 会受到来自其他 SBS 的同频干扰。干扰功率 $I_{u \rightarrow k}(\tau)$ 来自于其他 SBS u ($u \in \mathcal{N}, u \neq n$) 在相同 RB 上的发射。此时, 信干噪比为:

$$\gamma_k(\tau) = \frac{p_{\text{rx},n \rightarrow k}(\tau)}{\sum_{u \in \mathcal{N}, u \neq n} I_{u \rightarrow k}(\tau) + N_0(i_s)}, \quad \text{若 } a_{n,k}(t) = 1, n \in \mathcal{N} \quad (32)$$

其中, 干扰项 $I_{u \rightarrow k}(\tau)$ 的计算方式与信号功率 p_{rx} 类似。

综合以上两种情况, 用户 k 在时刻 τ 的瞬时数据传输速率 (bps) 可由香农公式计算得出:

$$r_k(\tau) = i_s \cdot b \cdot \log_2(1 + \gamma_k(\tau)) \quad (33)$$

7.3.2 任务到达与队列演化

本部分关于任务到达、队列演化的数学模型与前几问保持一致, 但其核心变量——服务量 $S_k(t)$ 的计算, 现在深度耦合了第四问新增的跨层接入决策与异构网络干扰环境。

令 $D_k(\tau) \geq 0$ 表示 1ms 时刻 τ 到达用户 k 的任务数据量 (Mbit, 来自 taskflow 数据)。任务按 FIFO 服务。记窗口起点的队列为 $Q_k(t)$ 。若窗口 t 内被服务的时隙集合为 $\mathcal{U}_k(t) \subseteq \mathcal{F}(t)$, 则窗口内可传输的数据量为

$$S_k(t) = \sum_{\tau \in \mathcal{U}_k(t)} r_k(\tau) \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} \quad (\text{Mbit}). \quad (34)$$

窗口结束时队列更新为

$$Q_k(t + 100) = \max \left\{ 0, Q_k(t) + \sum_{\tau \in \mathcal{F}(t)} D_k(\tau) - S_k(t) \right\}. \quad (35)$$

7.3.3 接入与调度规则

本问的接入与调度在继承前问规则的基础上, 引入了针对异构网络的特定限制:

- **接入限制:** 这是本问的核心特征。每个用户 k 的接入选择被严格限定在宏基站 (MBS) 与地理位置最近的微基站 (SBS) 之间, 即 $a_{n,k}(t) = 1$ 仅在 $n = 0$ 或 $n = n^*(k)$ 时才可能成立。
- **并发与调度:** 各基站 (MBS 与 SBS) 的切片并发容量 $C_{n,s}(t)$ 的计算方式, 以及窗口内“编号优先、任务完成即补位、URLLC 按紧迫度优先”的调度机制, 与前文保持一致。

7.3.4 QoS 评估函数

与前几问一致, 服务质量 (QoS) 的评估基于每个任务的时延和速率表现。

首先, 我们需要计算每个任务的总时延。对一个在时刻 τ 到达的任务, 其总时延 $L_{k,\tau}^s$ 由排队时延和传输时延构成:

$$L_{k,\tau}^s = (t_{\text{start}} - \tau) + \frac{D_{k,\tau} \cdot 10^6}{\bar{r}_k(t_{\text{start}})} \quad (36)$$

其中, t_{start} 是任务开始服务的时刻, $\bar{r}_k(t_{\text{start}})$ 是服务期间的平均速率。

然后，基于计算出的时延和瞬时速率，我们定义任务级的 QoS 函数 $y_{k,\tau}^s$ ：

$$y_{k,\tau}^U = \begin{cases} \alpha^{L_{k,\tau}^U} & L_{k,\tau}^U \leq L_U^{\text{SLA}} \\ -M_U & \text{否则} \end{cases} \quad (37)$$

$$y_{k,\tau}^e = \begin{cases} 1 & r_k(\tau_{\text{srv}}) \geq r_e^{\text{SLA}} \text{ and } L_{k,\tau}^e \leq L_e^{\text{SLA}} \\ \frac{r_k(\tau_{\text{srv}})}{r_e^{\text{SLA}}} & r_k(\tau_{\text{srv}}) < r_e^{\text{SLA}} \text{ and } L_{k,\tau}^e \leq L_e^{\text{SLA}} \\ -M_e & \text{否则} \end{cases} \quad (38)$$

$$y_{k,\tau}^m = \begin{cases} \frac{\sum_{i \in \mathcal{K}_m} c'_i}{\sum_{i \in \mathcal{K}_m} c_i} & L_{k,\tau}^m \leq L_m^{\text{SLA}} \\ -M_m & \text{否则} \end{cases} \quad (39)$$

参数取值： $\alpha = 0.95$, $r_e^{\text{SLA}} = 50 \text{ Mbps}$, $L_U^{\text{SLA}} = 5 \text{ ms}$, $L_e^{\text{SLA}} = 100 \text{ ms}$, $L_m^{\text{SLA}} = 500 \text{ ms}$, $M_U = 5$, $M_e = 3$, $M_m = 1$ 。

7.3.5 决策变量与优化模型

决策变量：

- RB 切片分配： $x_{n,s}(t) \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$
- 发射功率： $p_{0,s}(t) \in [10, 40] \text{ (dBm)}$, $p_{n,s}(t) \in [10, 30] \text{ (dBm)}$
- 接入关联： $a_{n,k}(t) \in \{0, 1\}$, 当 $a_{n,k}(t) = 1$, 则 k 在窗口 t 仅由站 n 调度；若 $n \notin \{0, n^*(k)\}$, $a_{n,k}(t) = 0$

综合上述要素，第四问的动态联合优化模型可表述为（跨 10 个窗口聚合）：

$$\begin{aligned} \max_{\{x,p,a\}} \quad & Q_{\text{total}} = \sum_{t \in \mathcal{T}} \left[\sum_{k \in \mathcal{K}_U} \sum_{\tau \in \mathcal{A}_k(t)} y_{k,\tau}^U + \sum_{k \in \mathcal{K}_e} \sum_{\tau \in \mathcal{A}_k(t)} y_{k,\tau}^e + \sum_{k \in \mathcal{K}_m} \sum_{\tau \in \mathcal{A}_k(t)} y_{k,\tau}^m \right] \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{s \in \mathcal{S}} x_{n,s}(t) = R_n \\ x_{n,U}(t) \bmod 10 = 0, x_{n,e}(t) \bmod 5 = 0, x_{n,m}(t) \bmod 2 = 0 \\ x_{n,s}(t) \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \\ 10 \leq p_{0,s}(t) \leq 40, 10 \leq p_{n,s}(t) \leq 30 \ (\forall n \in \mathcal{N}) \\ Q_k(t+100) = \max \left\{ 0, Q_k(t) + \sum_{\tau \in \mathcal{F}(t)} D_k(\tau) - S_k(t) \right\} \\ r_k(\tau), \gamma_k(\tau) \text{ 由 } (x, p, a) \text{ 与 } (\phi, h) \text{ 及调度生成} \\ \sum_{n \in \bar{\mathcal{N}}} a_{n,k}(t) \leq 1 \\ \forall n \in \bar{\mathcal{N}}, s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T}, \forall k, t \end{cases} \end{aligned} \quad (40)$$

其中 $\mathcal{A}_k(t) \subseteq \mathcal{F}(t)$ 为窗口 t 内属于用户 k 且在 SLA 内完成的任务到达时刻集合。

该模型体现了“跨层接入选择 + 多站切片 + 切片级功率 + SBS 间互扰 + 任务队列”的耦合，属于时变 MINLP。

7.4 模型求解

直接全局求解不可行。我们采用“**MPC（单步前瞻）+ 分层分解 + 迭代最优响应**”的实用策略，在每个决策窗口内求解当前 100ms 的近似最优策略、并将末状态传递给下一窗口。

总体流程（逐窗口） 对每个窗口 $t \in \mathcal{T}$:

1. 状态采样：读取 $\tau \in \mathcal{F}(t)$ 的 $\{\phi, h\}$ 与任务到达 $D(\tau)$ ，获取上窗末的队列 $Q(t)$ 与上一窗的 (x, p, a) 作为初始参考。
2. 关联初始化（跨层接入初判）：对每个用户 k ，在“MBS 最小功率/当前 x 近似”与“最近 SBS 最小功率/当前 x 近似”下分别估计 URLLC/eMBB 的 SLA 可达性与 mMTC 的接入概率，择优设置 $a_{n,k}^{(0)}(t)$ ；若两者均不可达，对 eMBB/URLLC 选择更高速率一侧，对 mMTC 选择负载更低者。
3. 内层协调（给定 a ，按基站分解 x, p ）：
 - MBS 子问题（无互扰，独立）：对 $x_{0,\cdot}(t)$ 枚举（满足 $R_0 = 100$ 与粒度约束），对 $p_{0,\cdot}(t)$ 采用粗网格搜索（如 $\{10, 15, 20, 25, 30, 35, 40\}$ dBm），逐个方案以 1ms 仿真评估窗口 QoS，取最优。
 - SBS 子问题（存在互扰，耦合）：采用**交替最优响应**（Block Coordinate Descent, BCD）。初始化 $x_{n,\cdot}(t), p_{n,\cdot}(t)$ （可承接上窗或均匀切分）。循环若干轮：依次固定其余站的 (x, p) ，对当前站 n 在“ x 枚举 + p 粗网格”下，仿真评估并更新最优，直至收敛或达到轮次上限（如 3 轮）。
4. 关联细化（在已得 (x, p) 下微调 a ）：对每个用户在其候选集合内（MBS 与最近 SBS）尝试切换，比较 QoS 边际收益与被选基站切片的并发占用影响（若新侧切片已满并发，施加惩罚），采用贪心或少量轮换匹配（如至多交换 5
5. 输出窗口解：得到 $\{x_{n,s}(t), p_{n,s}(t), a_{n,k}(t)\}$ ，并以仿真末状态更新 $Q(t+100)$ ，进入下一窗口。

复杂度与实现要点

- **枚举规模控制**： $x_{n,\cdot}(t)$ 的可行组合数有限（MBS 以 10/5/2 粒度划分 100RB，SBS 以 10/5/2 粒度划分 50RB）， p 采用 5–7 点粗网格。MBS 独立求解；SBS 经 BCD 将“同时组合爆炸”转化为“按站逐个改进”。

- **并发与调度一致性：**切片并发 $C_{n,s}(t)$ 由 x 决定，窗口内以 1ms 步长执行“编号靠前优先 + 任务完成即补位”的调度，精确记录每个任务的 (τ, t_{start}) 与完成时刻，严格计算 L 与 QoS。
- **跨层隔离简化：**MBS 与 SBS 频谱隔离，使 MBS 子问题无互扰，且与 SBS 子问题仅通过 a （接入关联）耦合，利于分层求解与迭代收敛。
- **热启动：**建议采用“承接上窗口解”作为初值，既加速收敛又提升稳定性；在业务态势缓变时尤为有效。

7.5 结果分析

在不改变数据与评测口径的前提下，上述“MPC + 分层 + BCD + 细化接入”的策略具备如下预期：

- **跨层负载分担：**当最近 SBS 对 eMBB/URLLC 的速率或时延不达标时，MBS 作为“高能小区”吸纳热点或边缘弱场景用户，保障 SLA；反之 mMTC 与近端 URLLC 倾向留在 SBS，提高频谱复用与连接密度。
- **SBS 间干扰自洽：**通过 BCD 在切片粒度对 RB 区段与功率进行协调，降低跨站同索引 RB 的重叠度或在易干扰切片上选择更保守的功率，提升总体 SINR 与 QoS。
- **时序一致性：**窗口内逐毫秒仿真与队列更新确保排队/传输时延与 mMTC 接入率的真实反映；结合上一窗热启动，决策轨迹平稳演化。

综上，本问的数学模型明确刻画了跨层接入、切片化 RB 分配、切片级功率控制与 SBS 干扰耦合，并以 MPC 框架下的分层-迭代最优响应给出可计算的近似最优解法，能在附件四提供的资源尺度上稳定运行并获得高 QoS 的资源调度策略。

8 模型的分析与检验

8.1 灵敏度分析

8.2 误差分析

9 模型的评价

9.1 模型的优点

- 优点 1
- 优点 2
- 优点 3

9.2 模型的缺点

- 缺点 1
- 缺点 2

附录 A 文件列表

| 文件名 | 功能描述 |
|--------|---------|
| q1.m | 问题一程序代码 |
| q2.py | 问题二程序代码 |
| q3.c | 问题三程序代码 |
| q4.cpp | 问题四程序代码 |

附录 B 代码