

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
6.3 模型建立	17
6.3.1 集合、索引与参数	17
6.3.2 信道与干扰模型	17
6.3.3 任务到达与队列演化	18
6.3.4 RB 切片并发与调度规则	18
6.3.5 QoS 评估函数	18
6.3.6 决策变量与优化模型	19
6.4 模型求解	19
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、队列与时延	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	22
7.4 模型求解	23
7.5 结果分析	24
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	25
A 附录 文件列表	26

B 附录 代码	26
---------------	----

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 Mbps < 50 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

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 $[0, 1000]\text{ms}$ 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）：

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

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

6.3 模型建立

6.3.1 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）。

6.3.2 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

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

6.3.3 任务到达与队列演化

令 $D_k(\tau) \geq 0$ 表示 1 ms 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 $Q_k(t)$ 为窗口起点 t 的总排队量（Mbit）。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

$$S_k(t) = \sum_{\tau \in \mathcal{U}_k(t)} r_k(\tau) \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} \quad (\text{Mbit}), \quad (25)$$

其中 10^{-3} 将 bps 与 1 ms 时长换算为 bit，再以 10^{-6} 换算为 Mbit。窗口结束时队列更新为

$$Q_k(t+100) = \max \left\{ 0, Q_k(t) + \sum_{\tau \in \mathcal{F}(t)} D_k(\tau) - S_k(t) \right\}. \quad (26)$$

6.3.4 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

$$C_{n,s}(t) = \lfloor x_{n,s}(t) / i_s \rfloor. \quad (27)$$

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。

6.3.5 QoS 评估函数

与问题一、二一致，定义任务级 QoS：

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

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

其中 $L_{k,\tau}^s = Q_{k,\tau} + T_{k,\tau}$ 为任务总时延, τ_{srv} 为其被服务时段代表点; c_i, c'_i 分别表示 mMTC 的“有任务/成功接入”标记。SLA 与惩罚参数同问题一中表述: $\alpha = 0.95$, $r_e^{\text{SLA}} = 50 \text{ Mbps}$, $L_U^{\text{SLA}} = 5 \text{ ms}$, $L_e^{\text{SLA}} = 100 \text{ ms}$, $L_m^{\text{SLA}} = 500 \text{ ms}$, $M_U = 5$, $M_e = 3$, $M_m = 1$ 。

6.3.6 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: $a_{n,k}(t) \in \{0, 1\}$, $\sum_{n \in \mathcal{N}} a_{n,k}(t) \leq 1$; 若 $a_{n,k}(t) = 1$ 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):

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

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”。
- 候选接入集合: 每个用户 k 的候选基站集合限定为 $\{0, \arg\min_{n \in \mathcal{N}} \Phi_{n,k}\}$, 即“宏站或最近微站”。其中 $\Phi_{n,k}$ 可取窗口平均的路径损耗或地理最近 (由附件位置/损耗数据导出)。

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

若用户 $k \in \mathcal{K}_s$ 在窗口 t 由基站 $n \in \bar{\mathcal{N}}$ 服务且被分配切片 s 的并发资源槽, 则 $\tau \in \mathcal{F}(t)$ 时刻接收功率 (mW) 为

$$p_{\text{rx},n \rightarrow k}(\tau) = 10^{\frac{p_{n,s}(t) - \phi_{n,k}(\tau)}{10}} \cdot |h_{n,k}(\tau)|^2. \quad (31)$$

噪声功率与占用 RB 数 i_s 成正比, 换算为线性功率 (mW):

$$N_0(i_s) = 10^{\frac{-174 + 10 \log_{10}(i_s \cdot b) + NF - 30}{10}}. \quad (32)$$

SBS 层采用同频复用, 仅当不同 SBS 在同一 RB 索引上并发传输时产生互扰。为此, 每个基站在窗口 t 内将其 RB 在频域上按切片连续划分且顺序固定 (例如 U-e-m), 跨站的相同 RB 索引构成同信道。于是

$$\gamma_k(\tau) = \frac{p_{\text{rx},n \rightarrow k}(\tau)}{\underbrace{\sum_{u \in \mathcal{N}, u \neq n} I_{u \rightarrow k}(\tau) + N_0(i_s)}_{\text{仅当 } n \in \mathcal{N} \text{ 时存在}}}, \quad s \in \mathcal{S}, \quad (33)$$

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)。对于 MBS ($n = 0$), 跨层无干扰, 其分母只含噪声项。基于香农公式, 瞬时速率为

$$r_k(\tau) = i_s \cdot b \cdot \log_2(1 + \gamma_k(\tau)) \quad (\text{bps}). \quad (34)$$

7.3.2 任务到达、队列与时延

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

$$S_k(t) = \sum_{\tau \in \mathcal{U}_k(t)} r_k(\tau) \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} \quad (\text{Mbit}). \quad (35)$$

窗口结束时队列更新为

$$Q_k(t+100) = \max \left\{ 0, Q_k(t) + \sum_{\tau \in \mathcal{F}(t)} D_k(\tau) - S_k(t) \right\}. \quad (36)$$

对到达于时刻 τ 的任务，记开始服务时刻为 t_{start} ，其排队时延 $Q_{k,\tau} = t_{\text{start}} - \tau$ ，传输时延 $T_{k,\tau} = \frac{D_{k,\tau} \cdot 10^6}{\bar{r}_k(t_{\text{start}})}$ (\bar{r} 为窗口内代表速率)，总时延 $L_{k,\tau}^s = Q_{k,\tau} + T_{k,\tau}$ 。

7.3.3 接入与调度规则

- 接入限制：仅允许 $a_{0,k}(t)$ 与 $a_{n^*(k),k}(t)$ 之一为 1，其中 $n^*(k)$ 为 k 的最近微站；其余基站的接入指示为 0。
- 切片并发容量：每个 (n, s) 的并发容量为 $C_{n,s}(t) = \lfloor x_{n,s}(t)/i_s \rfloor$ ，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。

7.3.4 QoS 评估函数

与前两问一致，定义任务级 QoS：

$$y_{k,\tau}^U = \begin{cases} \alpha^{L_{k,\tau}^U} & L_{k,\tau}^U \leq L_U^{\text{SLA}} \\ -M_U & \text{否则} \end{cases}, \quad y_{k,\tau}^e = \begin{cases} 1 & r_k(\tau_{\text{srv}}) \geq r_e^{\text{SLA}} \ \& \ L_{k,\tau}^e \leq L_e^{\text{SLA}} \\ \frac{r_k(\tau_{\text{srv}})}{r_e^{\text{SLA}}} & r_k(\tau_{\text{srv}}) < r_e^{\text{SLA}} \ \& \ L_{k,\tau}^e \leq L_e^{\text{SLA}} \\ -M_e & \text{否则} \end{cases} \quad (37)$$

$$y_{k,\tau}^m = \begin{cases} \frac{\sum_{i \in \mathcal{K}_m} c_i'}{\sum_{i \in \mathcal{K}_m} c_i} & L_{k,\tau}^m \leq L_m^{\text{SLA}} \\ -M_m & \text{否则} \end{cases} \quad (38)$$

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： $x_{n,s}(t) \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ ， $\sum_{s \in \mathcal{S}} x_{n,s}(t) = R_n$ ，且 $x_{n,U} \bmod 10 = 0$ 、 $x_{n,e} \bmod 5 = 0$ 、 $x_{n,m} \bmod 2 = 0$ 。
- 发射功率： $p_{0,s}(t) \in [10, 40] \text{ dBm}$ ， $p_{n,s}(t) \in [10, 30] \text{ dBm}$ ($n \in \mathcal{N}$)。
- 接入关联： $a_{n,k}(t) \in \{0, 1\}$ ， $\sum_{n \in \mathcal{N}} a_{n,k}(t) \leq 1$ ，且 $a_{n,k}(t) = 0$ 若 $n \notin \{0, n^*(k)\}$ 。

跨十个窗口的总体优化模型：

$$\begin{aligned}
\max_{\{x,p,a\}} \quad & Q_{\text{total}} = \sum_{t \in \mathcal{T}} \left[\sum_{k \in \mathcal{K}_U} \sum_{\tau \in \mathcal{A}_k(t)} y_{k,\tau}^U + \sum_{k \in \mathcal{K}_e} \sum_{\tau \in \mathcal{A}_k(t)} y_{k,\tau}^e + \sum_{k \in \mathcal{K}_m} \sum_{\tau \in \mathcal{A}_k(t)} y_{k,\tau}^m \right] \\
\text{s.t.} \quad & \sum_{s \in \mathcal{S}} x_{n,s}(t) = R_n, \quad x_{n,U}(t) \bmod 10 = 0, \quad x_{n,e}(t) \bmod 5 = 0, \quad x_{n,m}(t) \bmod 2 = 0, \\
& x_{n,s}(t) \in \mathbb{Z}_{\geq 0}, \quad \forall n \in \bar{\mathcal{N}}, s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T}, \\
& 10 \leq p_{0,s}(t) \leq 40, \quad 10 \leq p_{n,s}(t) \leq 30 \quad (n \in \mathcal{N}), \\
& \sum_{n \in \bar{\mathcal{N}}} a_{n,k}(t) \leq 1, \quad a_{n,k}(t) = 0 \text{ 若 } n \notin \{0, n^*(k)\}, \\
& r_k(\tau), \gamma_k(\tau) \text{ 由 } (x, p, a) \text{ 与 } (\phi, h) \text{ 及调度生成}, \\
& Q_k(t+100) = \max \left\{ 0, Q_k(t) + \sum_{\tau \in \mathcal{F}(t)} D_k(\tau) - S_k(t) \right\}, \quad \forall k, t.
\end{aligned} \tag{39}$$

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**： $x_{n,s}(t)$ 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