

# 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 .....	3
1.1	问题背景 .....	3
1.2	问题要求 .....	3
1.3	我们的工作 .....	4
2	模型假设 .....	4
3	符号说明 .....	4
4	问题一的模型的建立和求解 .....	4
4.1	问题一的描述与分析 .....	4
4.2	预备工作 .....	5
4.2.1	关键参数补充 .....	5
4.3	模型建立 .....	5
4.3.1	传输速率计算 .....	5
4.3.2	时延计算模型 .....	6
4.3.3	服务质量评估函数 .....	6
4.3.4	优化模型 .....	7
4.4	模型求解 .....	7
4.5	求解结果 .....	8
5	问题二的模型的建立和求解 .....	9
5.1	问题二的描述与分析 .....	9
5.2	预备工作 .....	9
5.3	模型建立 .....	9
5.3.1	任务队列动态演化模型 .....	9
5.3.2	时延计算模型（任务级） .....	10
5.3.3	动态服务质量评估函数 .....	10
5.3.4	多时间段优化模型 .....	11
5.4	模型求解 .....	12
5.5	求解结果 .....	13
5.5.1	最优资源分配序列 .....	13
5.5.2	并列最优解分析 .....	14

5.5.3 结果分析 .....	14
6 问题三的模型的建立和求解 .....	15
6.1 问题三的描述与分析 .....	15
6.2 预备工作 .....	15
6.2.1 集合、索引与参数 .....	15
6.3 模型建立 .....	15
6.3.1 信道与干扰模型 .....	15
6.3.2 任务到达与队列演化 .....	16
6.3.3 RB 切片并发与调度规则 .....	16
6.3.4 QoS 评估函数 .....	16
6.3.5 决策变量与优化模型 .....	17
6.4 模型求解 .....	18
6.4.1 外层：滚动时窗预测控制 (MPC) .....	18
6.4.2 内层：混合编码遗传算法 (GA) .....	18
6.4.3 求解流程 .....	19
6.5 结果分析 .....	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 .....	22
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
7.4.1 内层：混合编码遗传算法 (GA) 的适配 .....	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 .....	25
参考文献 .....	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)
$\phi_k$	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
$p_{\text{tx}}$	基站发射功率, $p_{\text{tx}} = 30$ dBm
$b$	单个资源块带宽, $b = 360$ kHz
$L_s^{\text{SLA}}$	切片 $s$ 的时延 SLA 要求
$r_s^{\text{SLA}}$	切片 $s$ 的速率 SLA 要求
$M_s$	切片 $s$ 的任务丢失惩罚系数
$\alpha$	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， $p_{\text{tx}}$  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,  $L_U^{\text{SLA}}$  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,  $r_e^{\text{SLA}}$ 、 $L_e^{\text{SLA}}$  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

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  $\tau$** : 以 1ms 为步长, 用于模拟任务到达和信道变化,  $\tau$  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  $\tau$  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  $\tau$ , 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  $\tau$  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  $\tau$  到达, 在时刻  $t_{\text{start}}$  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  $t_{\text{start}}$  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）：

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

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	-	-	-	<b>352.103</b>

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  $\tau$  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， $t_{\text{start}}$  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

在前两问的“切片 RB 枚举 + 预测-控制 (MPC)”框架无法直接扩展到第三问的原因在于：1) 决策维度急剧扩张，包含了 9 个连续的功率变量  $\{p_{n,s}\}$  与 48 个离散的用户接入基站变量  $\{a_{n,k}\}$ ，构成了庞大的混合搜索空间。2) 小区间干扰项使目标函数呈现强非凸、非线性特性，枚举或传统凸优化方法难以求解，计算量将呈指数级爆炸。

为兼顾求解质量与计算效率，本问采用“滚动时窗预测控制 (MPC)+ 混合编码遗传算法 (GA)”的两层求解范式。其总体求解流程如图 1 所示。

图 1 问题三“滚动 MPC + GA”求解流程图

### 6.4.1 外层：滚动时窗预测控制 (MPC)

我们将 1000 ms 的总时长离散为 10 个长度为  $T_w = 100$  ms 的独立决策窗口。在每个窗口  $t$  的开始，我们求解一个静态优化问题，以确定该窗口内恒定不变的资源分配策略（包括用户接入、RB 切片、功率等级）。这种滚动优化的方式使得模型可以应对时变的信道和业务。

在我们的实现中，为降低问题的复杂度，我们做了一项简化：在每个窗口的优化求解阶段，我们假设该窗口开始时所有用户的任务队列均为空，即不考虑由前一个窗口积压下来的任务。优化过程仅针对当前窗口内新到达的任务负载。这使得每个窗口的优化问题可以解耦和独立求解。

### 6.4.2 内层：混合编码遗传算法 (GA)

针对每个窗口内的静态资源分配问题，我们设计了遗传算法进行启发式搜索。GA 能够有效处理高维、非凸、含混合变量的复杂优化问题。

- **个体编码方案：**每个个体（染色体）代表一个完整的资源分配策略，采用混合编码，由三部分组成：
  1. **用户接入决策：**长度为 48 的整数向量，每个基因位代表一个用户，其值  $(0, 1, 2)$  表示该用户接入的基站 (BS1, BS2, BS3)。

2. **RB 切片分配**: 长度为 6 的整数向量, 每两位表示一个基站为 URLLC 和 eMBB 切片分配的 RB 数量。mMTC 切片的比例则由剩余资源确定, 并根据切片粒度约束进行解码。
  3. **切片功率控制**: 长度为 9 的浮点数向量, 每个基因位表示一个基站上特定切片 (U/E/M) 的发射功率 (dBm), 范围在  $[10, 30]$ 。
- **适应度函数**: 个体的适应度由一个精细的仿真器评估。该仿真器将个体解码后的策略作为输入, 以 1 ms 为步长模拟整个 100 ms 窗口的动态过程。仿真完整地计算了用户速率 (包含所有基站的同频干扰)、任务队列的演化以及最终产生的 QoS 总分。该 QoS 总分即为个体的适应度。
  - **遗传算子与参数**: GA 采用精英保留策略, 并使用锦标赛选择、算术交叉 (针对连续变量) / 单点交叉 (针对离散变量) 和高斯/随机扰动变异 (针对不同类型变量) 来产生新一代种群。关键参数设置如下: 种群大小为 40, 最大进化代数为 200, 精英个体保留 5 个, 交叉概率 0.8, 变异概率 0.3。

### 6.4.3 求解流程

算法的总体流程遵循“滚动时窗预测控制”框架, 将 1000ms 的动态问题分解为 10 个独立的百毫秒优化窗口。在每个窗口的起点, 我们利用遗传算法求解一个静态的资源分配优化问题。具体流程如下:

**Step 1: 初始化**在仿真开始前, 通过 ‘*buildenv*’ 函数一次性加载“附件三”中所有必需的数据, 包括所有用户的任务到达流、各基站到各用户的大规模路径损耗和小规模瑞利衰落信道数据。

**Step 2: 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  $t = w \times 100$ ), 执行以下内层优化:

1. **GA 种群初始化**: 在窗口  $t$  开始时, 随机生成一个由 40 个个体组成的初始种群。每个个体 (染色体) 都代表了该窗口的一种完整资源分配方案, 其编码包含了用户接入、RB 切片和功率控制三部分决策。
2. **适应度评估 (窗口内仿真)**: 对种群中的每一个个体, 通过调用一个精细的仿真器 (‘*simulate\_window\_multibs*’) 来评估其适应度 (即 QoS 得分)。
  - **空队列假设**: 为使各窗口的优化问题解耦, 仿真器在评估开始时, 假设所有用户的任务队列均为空。它只考虑在当前 100ms 窗口内新到达的任务。
  - **动态演化**: 仿真器以 1ms 为步长, 模拟 100ms 内的动态过程。在每个 ms, 它会处理新任务的到达, 并根据个体所代表的资源分配方案 (用户归属、RB 和功率) 以及全网的同频干扰, 计算每个正在服务用户的瞬时速率, 并更新其任务处理进度。

- **性能计算**：仿真器精确追踪每个任务从到达、排队到完成的完整生命周期，计算其端到端时延和平均速率，并依据 QoS 评估函数计算得分。所有在窗口内完成的任务的 QoS 得分总和，即为该个体的适应度。
3. **遗传进化**：采用精英保留策略，通过锦标赛选择、交叉和变异等遗传算子，从当前代种群生成下一代种群。此过程重复迭代 200 代。
  4. **选择最优方案**：在 200 代进化完成后，选择整个过程中适应度最高的个体，将其解码为当前窗口  $w$  的最终资源分配决策。

**Step 3：汇总结果**算法将每个窗口选出的最优方案及其对应的 QoS 得分、资源分配详情（RB、功率）和用户接入映射关系记录下来。重复 Step 2 直至完成所有 10 个决策窗口。最后，汇总所有窗口的记录，得到 1000ms 内的完整动态策略和累计总 QoS。

## 6.5 结果分析

# 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  $p_{\text{rx}}$  类似。

综合以上两种情况, 用户  $k$  在时刻  $\tau$  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  $\tau$  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  $\tau$  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， $t_{\text{start}}$  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

第四问的优化模型在第三问的基础上引入了宏基站 (MBS) 与微基站 (SBS) 的异构结构，并增加了用户接入选择的约束。模型的决策变量维度、干扰关系和资源边界均发生了显著变化，使其成为一个更复杂的混合整数非线性规划 (MINLP) 问题。直接求解该问题在计算上是不可行的。

我们延续并拓展了问题三中“滚动时窗预测控制 (MPC) + 混合编码遗传算法 (GA)”的求解框架。该框架的总体思想和流程与问题三 (见图 1) 保持一致，即通过 MPC 将长时域问题分解为一系列独立的百毫秒窗口优化问题，再利用 GA 对每个窗口内的“用户接入 + 资源切片 + 功率控制”联合优化问题进行高效搜索。本节将重点阐述为适配第四问场景而对 GA 内核所做的关键修改，与问题三重复之处不再赘述。

### 7.4.1 内层：混合编码遗传算法 (GA) 的适配

针对每个决策窗口内的静态资源分配问题，我们对遗传算法的编码、适应度评估和算子进行了如下调整：

- **个体编码方案：** 每个个体 (染色体) 代表一个完整的资源分配策略，其混合编码结构调整如下：
  1. **用户接入决策：** 根据模型约束，每个用户在每个窗口只能选择接入宏基站 (MBS) 或距离其最近的一个微基站 (SBS)。因此，该部分编码为一个长度为 48 的二进制向量，其中基因位  $i$  的值为 0 代表用户  $i$  接入 MBS，为 1 则代表其接入该窗口起始时刻的最近 SBS。这相比问题三的接入决策空间有了大幅简化。
  2. **RB 切片分配：** 编码为一个长度为  $2 \times 4 = 8$  的整数向量。由于存在 1 个 MBS 和 3 个 SBS，共 4 个基站，我们为每个基站的 URLLC 和 eMBB 切片分配 RB 数量。MBS 的总 RB 数为 100，每个 SBS 为 50。mMTC 切片的 RB 数仍由总数减去 U/E 切片后剩余的资源确定，并向下对齐到切片粒度。
  3. **切片功率控制：** 编码为一个长度为  $4 \times 3 = 12$  的浮点数向量，分别表示 4 个基站上 3 个切片的发射功率 (dBm)。MBS 的功率范围为  $[10, 40]$  dBm，而 SBS 的功率范围为  $[10, 30]$  dBm。
- **适应度函数：** 个体的适应度评估依然通过一个精细的、步长为 1 ms 的窗口仿真器来完成。该仿真器根据解码后的策略进行模拟，但其核心的速率计算模块进行了关键更新：

- **异构干扰模型**：仿真器精确地实现了第四问的干扰关系。MBS 与 SBS 工作在不同频段，因此 MBS 上的用户不受任何来自 SBS 的干扰。反之，所有 SBS 在同频段工作，因此一个 SBS 上的用户会受到其他所有**正在服务的、占用同类切片的**SBS 的同道干扰。
- **动态接入点**：在每个窗口开始时，会根据所有用户当时的坐标预先计算出各自的“最近 SBS”。GA 在解码接入决策时，将基于这一预计算结果来确定用户的具体接入基站。

最终，仿真器输出的 QoS 总分作为该个体的适应度值。

- **遗传算子与参数**：我们沿用了问题三中的精英保留策略、锦标赛选择、混合交叉 (单点交叉用于离散的接入决策，算术交叉用于连续的功率和 RB 变量) 以及多模式变异 (随机扰动或高斯扰动)。为应对更复杂的问题，参数调整为：种群大小为 50，最大进化代数为 500，交叉概率 0.8，变异概率 0.3。

## 7.5 结果分析

# 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

## 参考文献

- [1] 司守奎, 孙玺菁. 数学建模算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [2] 卓金武. MATLAB 在数学建模中的应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.

## 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