

# 基于模型预测控制 (MPC) 与遗传算法 (GA) 的网络切片分配优化

## 摘要

随着物联网设备的指数级增长，移动通信需求呈现爆发式增长，推动了网络架构的不断演进。本文针对无线网络切片资源管理的一系列复杂优化问题，设计并实现了一套从静态到动态、从同构到异构、从性能优先到兼顾能耗的渐进式求解方案。

**对于问题一**，我们针对单基站静态场景，建立了服务质量 (QoS) 最大化模型。通过对所有可能的资源块 (RB) 分配方案进行穷举搜索，得到了全局最优解：为 URLLC、eMBB、mMTC 切片分别分配 **20、10、20** 个 RB 时，可达到最大 QoS 得分 **15.78**。此结果为后续更复杂的问题提供了性能基准。

**对于问题二**，面对动态任务到达和时变信道，我们引入了**模型预测控制 (MPC)** 框架。将总时长划分为 10 个 100ms 的决策窗口，在每个窗口开始时，根据当前系统状态 (如用户队列) 进行枚举寻优。该方法有效应对了系统的动态性，实现了 **337.42** 的累计 QoS，验证了 MPC 框架处理时变问题的有效性。

**对于问题三**，在存在同频干扰的多微基站场景下，决策维度急剧增加。我们建立了用户接入、RB 分配和功率控制的联合优化模型，并提出一种 **MPC 结合遗传算法 (GA)** 的两层求解框架。外层 MPC 负责时域滚动，内层 GA 通过混合编码方案，高效求解每个窗口内非凸、高维的静态资源分配问题，最终在有效抑制干扰的同时，获得了 **853.37** 的累计 QoS。

**对于问题四**，针对宏基站 (MBS) 与微基站 (SBS) 共存的异构网络，我们对 MPC+GA 框架进行了扩展。模型引入异构网络下的 MBS 与 SBS 资源分配和功率控制，以及用户只能接入 MBS 或最近 SBS 的约束。求解结果显示出智能的**网络功能协同策略**：无干扰、资源丰富的 MBS 主要承载海量 mMTC 连接，而靠近用户的 SBS 则重点保障 URLLC 等高性能业务，最终将累计 QoS 提升至 **1041.28**。

**对于问题五**，为在保障 QoS 的同时最小化网络能耗，我们设计了一种新颖的**两阶段优化算法**。在 MPC 框架的每个窗口内，第一阶段采用 GA 优化发射功率以最小化能耗；第二阶段在给定功率下，通过枚举优化 RB 分配以最大化 QoS。该分层解耦策略成功平衡了性能与能耗的矛盾，在将总能耗控制在 **183.68** 焦耳的同时，取得了 **381.17** 的累计 QoS。

综上，本文通过对一系列问题的层层递进的建模与求解，系统地展示了如何运用枚举、MPC、遗传算法及分层优化等方法，解决不同复杂度下的网络切片资源管理难题，为设计高效、智能的无线资源分配方案提供了有价值的思路与验证。

**关键字：** 模型预测控制 (MPC) 遗传算法 (GA) 异构网络 两阶段优化算法

## 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 .....	7
4	问题一的模型的建立和求解 .....	7
4.1	问题一的描述与分析 .....	7
4.2	预备工作 .....	8
4.2.1	关键参数补充 .....	8
4.3	模型建立 .....	8
4.3.1	传输速率计算 .....	8
4.3.2	时延计算模型 .....	9
4.3.3	服务质量评估函数 .....	9
4.3.4	优化模型 .....	10
4.4	模型求解 .....	10
4.5	结果分析 .....	12
5	问题二的模型的建立和求解 .....	13
5.1	问题二的描述与分析 .....	13
5.2	预备工作 .....	13
5.2.1	模型预测控制 (MPC) 简介 .....	13
5.3	模型建立 .....	13
5.3.1	任务队列动态演化模型 .....	13
5.3.2	时延计算模型 (任务级) .....	14
5.3.3	窗口内 QoS 计分规则 .....	14
5.3.4	总体优化模型 .....	15
5.4	模型求解 .....	15
5.5	结果分析 .....	17
5.5.1	最优资源分配序列 .....	17

6	问题三的模型的建立和求解	18
6.1	问题三的描述与分析	18
6.2	预备工作	18
6.3	模型建立	18
6.3.1	信道与干扰模型	18
6.3.2	任务到达与队列演化	19
6.3.3	决策变量与优化模型	19
6.4	模型求解	20
6.4.1	外层：滚动时窗预测控制 (MPC)	20
6.4.2	内层：混合编码遗传算法 (GA)	20
6.4.3	求解流程	21
6.5	结果分析	22
6.5.1	总体性能与动态适应性	22
6.5.2	用户接入策略	22
6.5.3	切片资源分配与干扰管理策略	23
7	问题四的模型的建立和求解	24
7.1	问题四的描述与分析	24
7.2	模型建立	24
7.2.1	信道与干扰模型	24
7.2.2	接入与调度规则	25
7.2.3	决策变量与优化模型	25
7.3	模型求解	26
7.3.1	内层：混合编码遗传算法 (GA) 的适配	26
7.4	结果分析	27
7.4.1	总体性能与动态适应性	27
7.4.2	宏基站与微基站的协同策略	28
8	问题五的模型的建立和求解	29
8.1	问题五的描述与分析	29
8.2	预备工作	29
8.3	模型建立	29
8.3.1	能耗模型	29
8.3.2	两阶段优化模型	30

8.4 模型求解 .....	30
8.5 结果分析 .....	31
8.5.1 节能策略分析 .....	32
9 模型的评价 .....	32
9.1 模型的优点 .....	32
9.2 模型的缺点 .....	32
参考文献 .....	33
A 附录 文件列表 .....	34
B 附录 代码 .....	34
C 附录 求解结果 .....	90
3.1 问题一：单基站枚举结果 .....	90
3.2 问题二：单微基站 MPC 滚动窗口最优决策 .....	91
3.3 问题三：多基站 GA-MPC 优化结果 .....	91
3.4 问题四：异构网络 GA-MPC 优化结果 .....	92
3.5 问题五：能耗优化 GA-MPC 结果 .....	92

# 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

针对上述问题，我们设计并实现了一套从枚举、模型预测控制（MPC）到遗传算法（GA）和分层优化的渐进式算法框架，系统性地解决了从简单到复杂的无线网络切片资源管理难题，实现了服务质量与能源效率的有效平衡，本文的主要工作如图 1 所示。

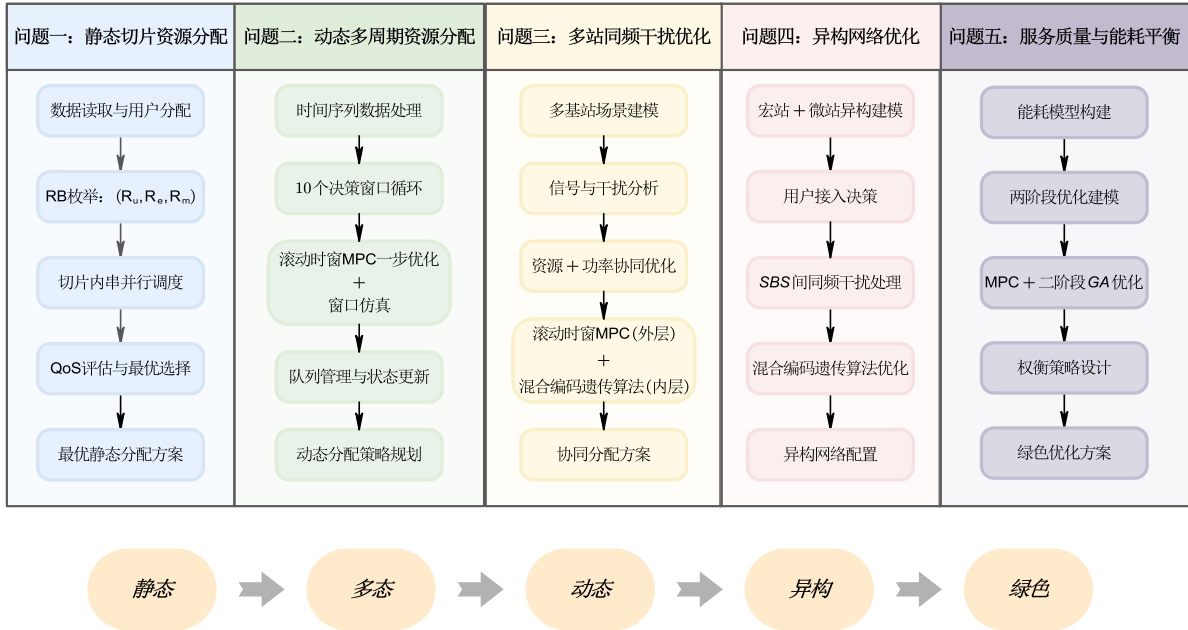


图 1 本文的主要工作流程与创新点概览

## 2 模型假设

为简化问题，本文做出以下假设：

(1) 假设所有资源分配决策在每个 100ms 决策窗口的开始时刻一次性做出，并在此窗口持续时间内保持不变。

此假设使复杂的动态问题进行了简化，避免了因过于频繁的决策而导致的系统信令开销过大和优化问题难以求解的问题。

(2) 假设一个基站的所有资源块全部划分，在用户在每种切片内部占用时可以浪费。

此假设简化了求解结果，减少了资源分配的复杂性，在用户任务量较少时，分配的资源块可能并未使用，若不完全分配，会导致多种最优解，但实际上对应相同情形。

(3) 假设 eMBB 切片的服务质量（QoS）中传输速率的计算在一次任务的传输中取平均速率。

此假设简化了求解过程，避免了因传输速率计算复杂度高而导致的求解困难。

### 3 符号说明

符号	含义	单位
$R_n$	基站 $n$ 的 RB 总数 (MBS: 100; SBS: 50)	RB
$b$	单个 RB 带宽 (360 kHz)	kHz
$v_s$	切片 $s$ 内每用户占用的 RB 数 (U/e/m 为 10/5/2)	RB
$x_{n,s}(t)$	基站 $n$ 在窗口 $t$ 为切片 $s$ 分配的 RB 数	RB
$p_{n,s}(t)$	基站 $n$ 在窗口 $t$ 对切片 $s$ 的发射功率	dBm
$\gamma_k(\tau)$	用户 $k$ 在时刻 $\tau$ 的信干噪比 (SINR)	-
$r_k(\tau)$	用户 $k$ 在时刻 $\tau$ 的传输速率	bps
$D_k$	用户 $k$ 的任务数据量	Mbit
$L_k^s$	用户 $k$ 在切片 $s$ 的总时延	s
$Q_k(t)$	用户 $k$ 在时刻 $t$ 的队列积压量	Mbit
$L_s^{\text{SLA}}$	切片 $s$ 的时延 SLA 要求	ms
$M_s$	切片 $s$ 的任务丢失惩罚系数 ( $s \in \{U, e, m\}$ )	-
$E_{\text{total}}(t)$	窗口 $t$ 内全网总能耗	J

注：未列出的以及重复的符号均以首次出现处为准。

### 4 问题一的模型的建立和求解

#### 4.1 问题一的描述与分析

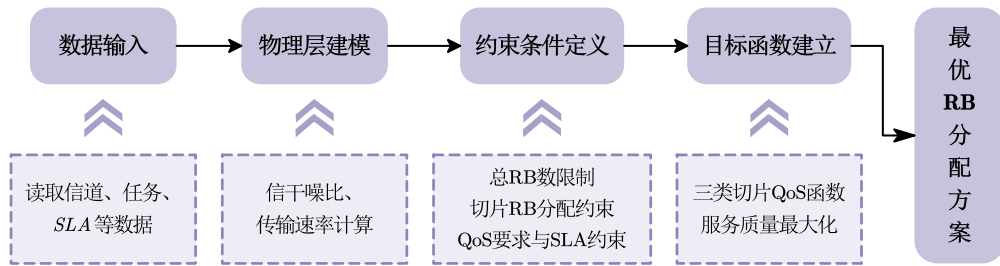


图 2 问题一场景与资源分配分析示意图

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

问题一为单时刻静态场景，不引入显式时间索引。每位用户仅有一个任务，服务在一个决策窗口内完成；窗口内允许在各切片内进行“编号靠前优先”的非抢占串并行调度。

### 4.3.1 传输速率计算

根据附录中的信号传输模型，用户  $k$  占用  $i_k$  个资源块时的接收功率为：

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

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

考虑噪声功率的影响，噪声功率谱密度为：

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

其中， $i_k$  为用户  $k$  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。

信噪比 (SNR) 为：

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

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



根据香农公式，用户  $k$  的传输速率为：

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

在本问的调度中，同一切片  $s \in \{U, e, m\}$  内的每位用户占用固定 RB 数量  $v_s$ ，故  $i_k \equiv v_s$ 。

#### 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：

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

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

给定切片  $s$  被分配的 RB 数量  $n_s$  与每用户占用  $v_s$ ，并发能力为  $C_s = \lfloor n_s / v_s \rfloor$ 。在同一调度窗口内，切片  $s$  中的用户按“编号靠前优先”顺序：初始分配给前  $C_s$  位用户，其余用户在有会话完成后接续开始服务。由此得到每位用户的等待时延  $Q_k$ （其开始服务时刻）与传输时延  $T_k$ ，总时延

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

#### 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：

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

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：

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

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:

$$y_k^m = \begin{cases} \frac{\sum_{i \in \mathcal{U}_m} c'_i}{\sum_{i \in \mathcal{U}_m} c_i} & \text{若 } L_k^m \leq L_m^{\text{SLA}} \\ -M_m & \text{若 } L_k^m > L_m^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\mathcal{U}_m$  为 m 切片用户集合,  $c_i$  表示用户  $i$  是否有任务 (本问为“有数据量”),  $c'_i$  表示该用户是否成功在 SLA 内完成任务。实现上先计算比例  $\text{ratio} = \frac{\sum c'_i}{\sum c_i}$ , 再对每个有任务的 m 用户按“成功得 ratio, 失败得  $-M_m$ ”计分并加总。

#### 4.3.4 优化模型

基于上述分析, 建立如下单时刻优化模型:

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

其中,  $n_U, n_e, n_m$  分别为分配给 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。

#### 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  $t = t_0$ ):

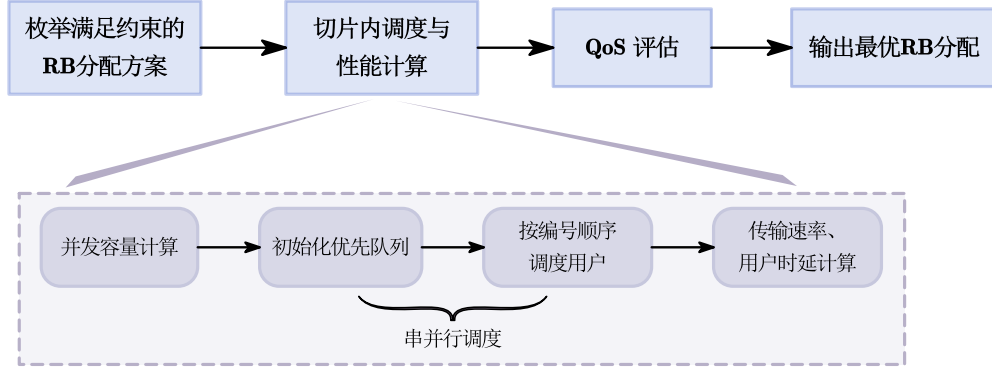


图 3 第一问资源分配与调度算法流程图

### 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 结果分析

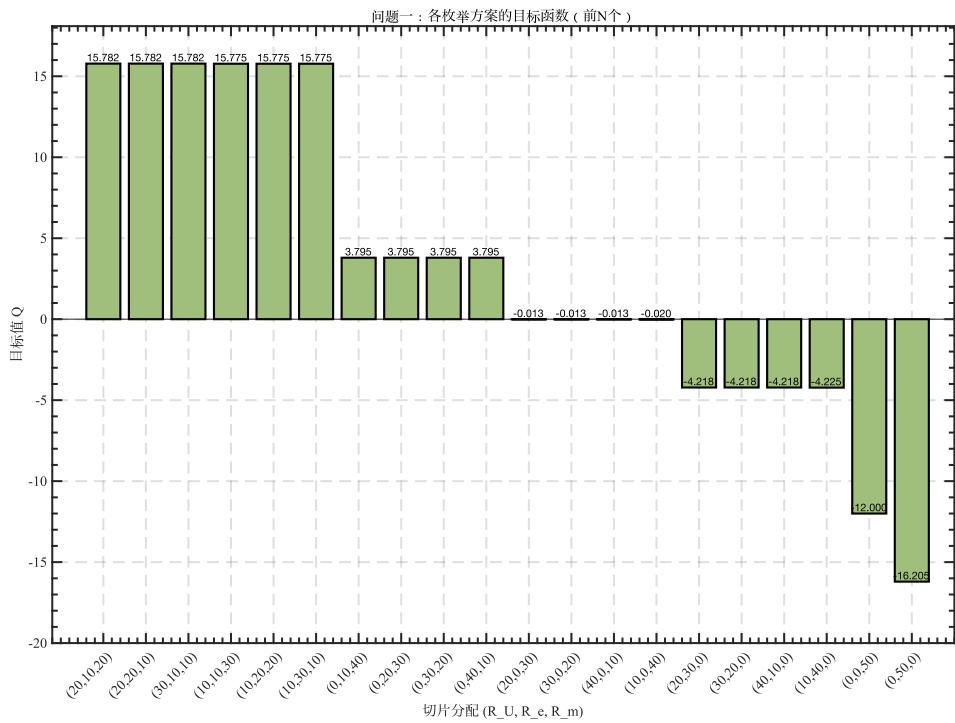


图 4 第一问所有可行解枚举结果

通过执行上述算法，我们枚举了所有可行解，如图4所示。

**最优资源分配方案**

在所有结果中，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

在以上三种方案中，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。

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  $T_{\text{tot}}$  的观测窗口内，系统需要每  $T_w$  进行一次资源分配决策，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

#### 5.2.1 模型预测控制 (MPC) 简介

模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 是一种先进的控制策略，广泛应用于工业控制、自动驾驶、机器人等领域。它通过预测未来系统的行为，优化当前的控制输入，从而实现对复杂系统的高效控制。

**核心理念：**

**基于模型的预测：** MPC 利用系统的数学模型（如状态空间模型、传递函数等）预测未来一段时间内系统的输出行为。

**滚动优化：** 在每个时刻，MPC 通过求解一个优化问题，找到未来一段时间的最优控制输入序列，使系统输出尽可能接近目标，同时满足约束条件。

**反馈调整：** 只执行当前时刻的控制输入，随后根据新的测量值更新预测，重复上述过程。这种滚动优化和反馈机制使 MPC 能够应对系统的不确定性和扰动。

### 5.3 模型建立

问题二模型大部分与问题一相同，可直接复用问题一中的模型，不再重复说明。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，下面将具体阐述。

#### 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

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 窗口内 QoS 计分规则

仅对“在当前窗口内完成”的 URLLC/eMBB 任务计分; mMTC 采用“本窗到达用户的比例计分”。令窗口  $t$  的结束时刻为  $t+100$ , 定义集合:

$$\mathcal{F}_U(t) = \{(k, \tau_0) \mid k \in \mathcal{U}_U, \tau_f \in [t, t+T_w)\}, \quad (17)$$

$$\mathcal{F}_e(t) = \{(k, \tau_0) \mid k \in \mathcal{U}_e, \tau_f \in [t, t+T_w)\}. \quad (18)$$

$$Y_U(t) = \sum_{(k,\tau_0) \in \mathcal{F}_U(t)} y_{k,\tau_0}^U, \quad y_{k,\tau_0}^U = \begin{cases} \alpha^{L_{k,\tau_0}} & \text{若 } L_{k,\tau_0} \leq L_U^{\text{SLA}} \\ -M_U & \text{若 } L_{k,\tau_0} > L_U^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (19)$$

$$Y_e(t) = \sum_{(k,\tau_0) \in \mathcal{F}_e(t)} y_{k,\tau_0}^e, \quad y_{k,\tau_0}^e = \begin{cases} 1 & \text{若 } L_{k,\tau_0} \leq L_e^{\text{SLA}} \text{ 且 } r_{\text{avg}} \geq r_e^{\text{SLA}} \\ \frac{r_{\text{avg}}}{r_e^{\text{SLA}}} & \text{若 } L_{k,\tau_0} \leq L_e^{\text{SLA}} \text{ 且 } r_{\text{avg}} < r_e^{\text{SLA}} \\ -M_e & \text{若 } L_{k,\tau_0} > L_e^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (20)$$

$$Y_m(t) = \sum_{k \in \mathcal{U}_m} y_k^m(t), \quad y_k^m = \begin{cases} \frac{\sum_{i \in \mathcal{U}_m} c_i'}{\sum_{i \in \mathcal{U}_m} c_i} & \text{若 } L_k^m \leq L_m^{\text{SLA}} \\ -M_m & \text{若 } L_k^m > L_m^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (21)$$

### 5.3.4 总体优化模型

在上述定义下，问题二的动态优化模型写作：

$$\begin{aligned} \max_{\{n_U(t), n_e(t), n_m(t)\}_{t \in \mathcal{T}}} \quad & Q = \sum_{t \in \mathcal{T}} (Y_U(t) + Y_e(t) + Y_m(t)) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} n_U(t) + n_e(t) + n_m(t) = 50 \\ n_U(t) \bmod 10 = 0, n_e(t) \bmod 5 = 0, n_m(t) \bmod 2 = 0 \\ Q_k(t+100) = \max(0, Q_k(t) + \Delta A_k(t) - S_k(t)) \\ n_s(t) \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \\ \forall t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S}, \forall k \end{cases} \end{aligned} \quad (22)$$

该模型的核心挑战在于：(1) 状态空间（用户队列）的动态演化导致各阶段决策相互耦合；(2) 任务到达的随机性与信道的时变性增加了预测难度；(3) 排队时延与传输时延的耦合优化关系复杂。需要设计高效的求解算法来处理这一复杂的多阶段动态优化问题。

### 5.4 模型求解

通过以上对模型的分析，我们决定采用模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）算法求解，该算法已在预备工作中简要介绍。

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：

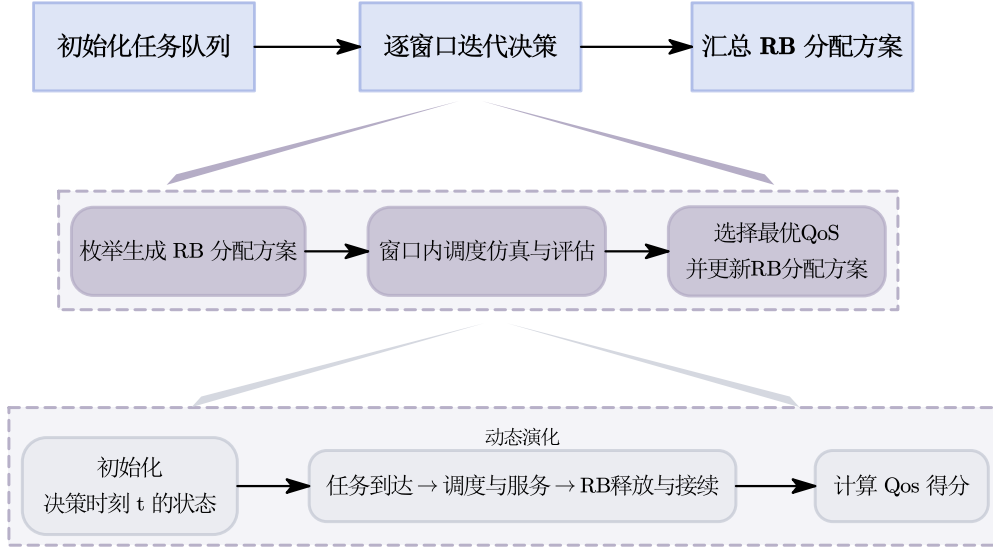


图 5 问题二 MPC 动态资源分配与调度算法流程图

### 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, 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，且各切片 RB 数量分别为 10、5、2 的倍数。
2. **窗口内调度仿真与评估**: 对于每个分配方案，进行 100ms 窗口的详细仿真。仿真从当前系统状态出发，1ms 步长推进，动态加入新到达任务，按切片并发能力和“编号靠者优先”原则调度用户，任务完成后立即释放资源并接续新用户。全过程记录任务的到达、服务、完成时刻，计算端到端时延，并据各切片 QoS 评估函数统计窗口内所有已完成任务的服务质量得分。
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 结果分析

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**。

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 URLLC 任务并保证 mMTC 的稳定接入。

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

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  $\mathcal{F}(t) = \{t, t+1, \dots, t+99\}$ 。

其余关键系统参数与问题一、二保持一致。

### 6.3 模型建立

问题三的基本模型与问题二一致，但是需要考虑多个微基站之间的信号干扰，故需要对信道与干扰模型进行重新建模，其余复用模型不再重复。

#### 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

$$p_{\text{rx},n \rightarrow k}(\tau) = 10^{\frac{p_{n,s}(t) - \phi_{n,k}(\tau)}{10}} \cdot |h_{n,k}(\tau)|^2. \quad (23)$$

噪声功率与占用 RB 数  $i$  成正比，换算为线性功率 (mW)：

$$N_0(i) = 10^{\frac{-174 + 10 \log_{10}(i \cdot b) + NF - 30}{10}}. \quad (24)$$

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

$$\gamma_k(\tau) = \frac{p_{\text{rx},n \rightarrow k}(\tau)}{\sum_{u \in \mathcal{N}, u \neq n} I_{u \rightarrow k}(\tau) + N_0(i_s)}, \quad s \in \mathcal{S}, \quad (25)$$

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

$$r_k(\tau) = i_s \cdot b \cdot \log_2(1 + \gamma_k(\tau)) \quad (\text{bps}). \quad (26)$$

### 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 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：  $p_{n,s}(t) \in [10, 30]$  (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）：

$$\begin{aligned} \max_{\{x,p,a\}} \quad & Q_{\text{total}} = \sum_{t \in \mathcal{T}} \left[ \sum_{k \in \mathcal{K}_U} \sum_{\tau \in \mathcal{A}_k(t)} y_{k,\tau}^U + \sum_{k \in \mathcal{K}_e} \sum_{\tau \in \mathcal{A}_k(t)} y_{k,\tau}^e + \sum_{k \in \mathcal{K}_m} \sum_{\tau \in \mathcal{A}_k(t)} y_{k,\tau}^m \right] \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{s \in \mathcal{S}} x_{n,s}(t) = 50 \\ x_{n,U}(t) \bmod 10 = 0, x_{n,e}(t) \bmod 5 = 0, x_{n,m}(t) \bmod 2 = 0 \\ x_{n,s}(t) \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \\ 10 \leq p_{n,s}(t) \leq 30 \\ Q_k(t+100) = \max \left\{ 0, Q_k(t) + \sum_{\tau \in \mathcal{F}(t)} D_k(\tau) - S_k(t) \right\} \\ r_k(\tau), \gamma_k(\tau) \text{ 由 } (x, p, a) \text{ 与 } (\phi, h) \text{ 及调度生成} \\ \sum_{n \in \mathcal{N}} a_{n,k}(t) \leq 1 \\ \forall n \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, \forall n, k, s, t \end{cases} \end{aligned} \quad (27)$$

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

针对第三问的模型，我们分析得到：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。故，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。

为兼顾求解质量与计算效率，本文不再使用枚举仿真的方法，而是引入启发式算法，快速找到近似最优解。本问采用“滚动时窗预测控制 (MPC)+ 混合编码遗传算法 (GA)”的两层求解方法。

### 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。

### 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

本算法采用“滚动时窗预测控制”框架，将 1000ms 划分为 10 个独立的 100ms 优化窗口。每个窗口内，利用遗传算法（GA）进行静态资源分配优化，简要流程如图 6 所示。

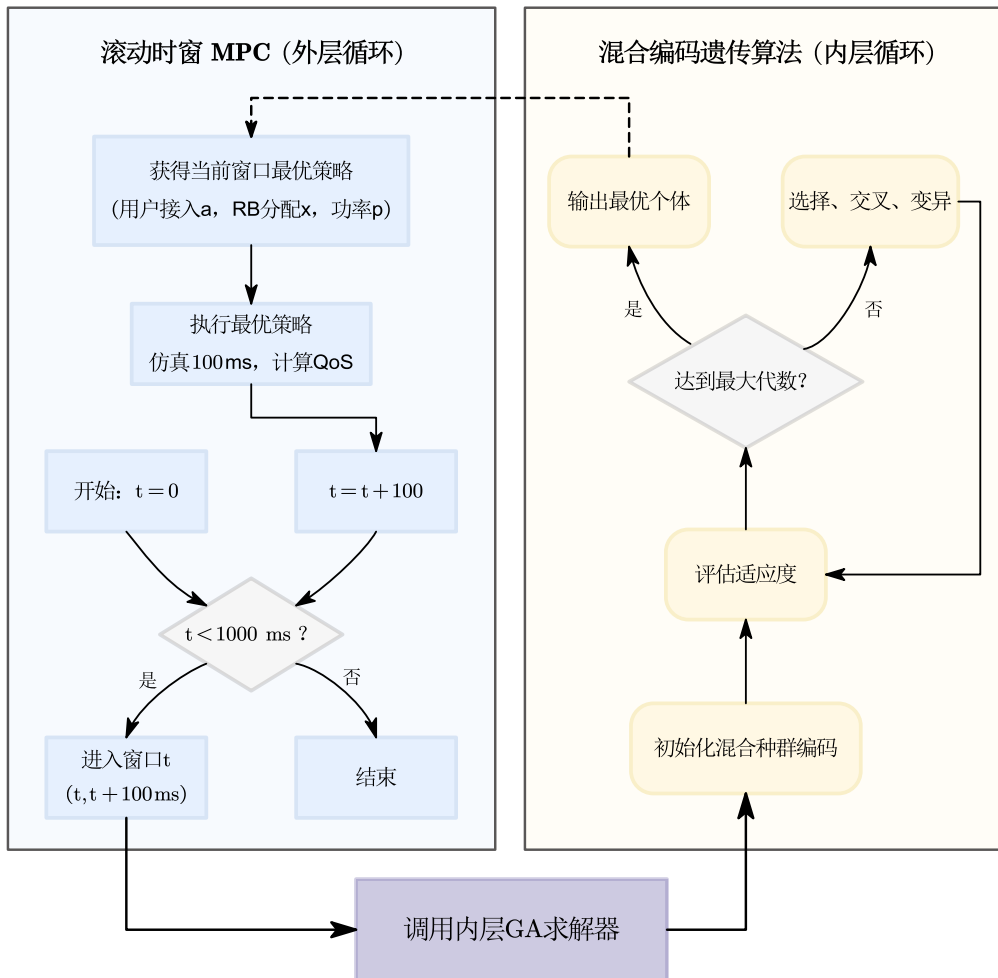


图 6 问题三“滚动 MPC + GA”求解流程图

## 6.5 结果分析

我们采用上一节提出的“滚动 MPC+GA”方法对问题三进行了求解，得到了 10 个决策窗口内每个基站的资源块（RB）分配、切片功率以及用户接入策略。详细的数值结果记录在代码附录的 `q3_user_bs_mapping.csv` 和 `q3_window_results.csv` 文件中。本节将对这些结果进行分析。

### 6.5.1 总体性能与动态适应性

在 1000ms 的仿真周期内，我们所提出的算法实现了 **871.34** 的总服务质量（QoS）得分。每个窗口的详细 QoS 得分、资源和功率分配决策汇总于表 3。

表 3 问题三各窗口资源分配决策与 QoS 结果

Win	BS1 (RB/P(dBm))			BS2 (RB/P(dBm))			BS3 (RB/P(dBm))			QoS			Obj.
	U	E	M	U	E	M	U	E	M	U	E	M	
0	0/24.4	40/22.8	10/24.8	20/21.6	0/22.9	30/23.4	20/21.6	0/22.9	30/21.7	38.16	8.40	30.00	76.56
1	10/21.1	0/21.0	40/25.6	10/20.2	20/24.2	20/20.9	20/21.7	20/24.3	10/23.2	51.03	6.81	30.00	87.84
2	10/21.9	0/20.1	40/25.1	0/18.9	40/25.4	10/22.7	20/20.5	0/24.8	30/21.0	38.35	9.87	30.00	78.22
3	30/19.9	0/22.5	20/18.0	20/20.4	0/20.3	30/22.4	0/19.4	30/23.7	20/20.2	49.26	7.79	30.00	87.05
4	10/23.2	20/26.2	20/24.0	30/21.6	0/20.7	20/21.6	10/20.5	0/21.8	40/22.2	46.43	5.90	30.00	82.33
5	0/19.2	30/24.1	20/21.4	20/21.3	0/21.3	30/20.2	30/22.4	0/21.3	20/22.8	52.02	7.28	30.00	89.30
6	10/21.9	0/21.3	40/20.6	10/22.5	0/21.5	40/22.7	20/21.3	20/25.5	10/21.0	52.08	6.25	30.00	88.33
7	10/21.6	0/22.9	40/22.0	10/19.2	20/26.2	20/17.5	20/24.7	0/21.5	30/20.6	48.68	6.40	30.00	85.08
8	20/22.5	0/18.6	30/22.9	20/18.7	0/17.9	30/23.3	10/22.3	20/29.8	20/23.0	51.45	7.59	30.00	89.04
9	0/21.4	30/27.3	20/22.7	30/24.5	0/22.0	20/20.7	10/21.6	0/23.2	40/21.1	56.80	7.88	30.00	94.69

结果显示，算法能够根据每个窗口变化的信道条件和任务到达情况，动态调整资源分配策略。

### 6.5.2 用户接入策略

程序在每次决策时，会根据当前信道条件和任务到达情况，选择一个基站为用户提供服务。图 7 展示了第一次决策窗口内用户接入与资源分配的可视化结果。

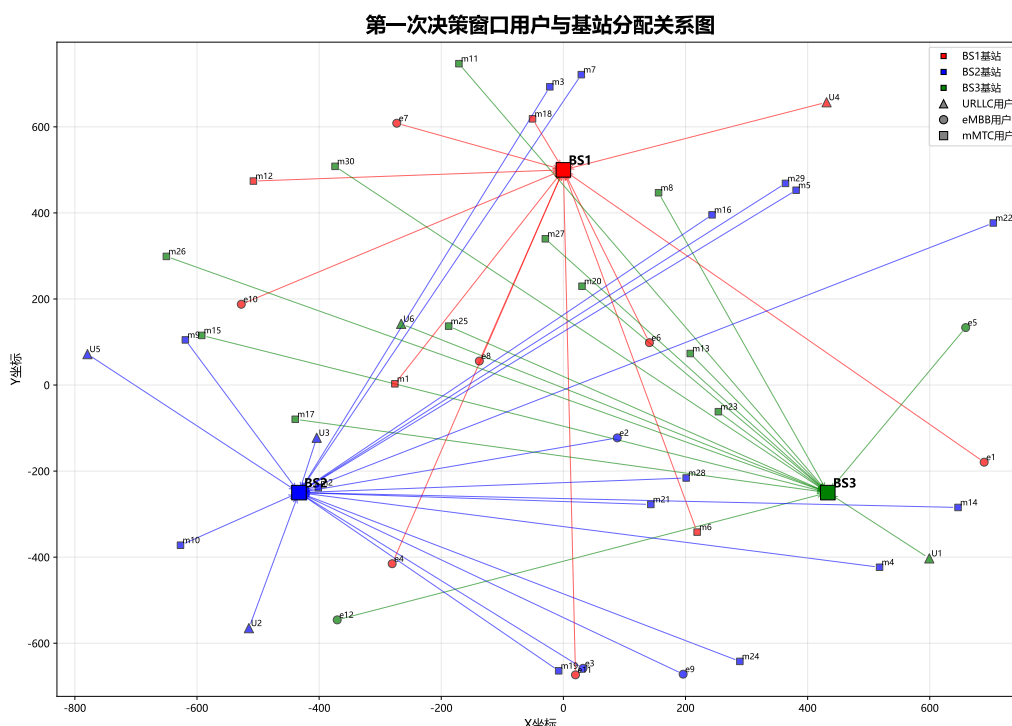


图 7 第一次决策窗口用户接入可视化

### 6.5.3 切片资源分配与干扰管理策略

遗传算法在每个窗口内搜索“用户接入 +RB 分配 + 功率控制”的联合最优解，其分配策略体现了对不同切片 QoS 需求的深刻理解和对干扰的精细化控制。

- **URLLC (U-slice):** 作为最高优先级的业务，其 QoS 得分 (sum\_U) 在各个窗口都获得了较高的满足度。算法倾向于为其分配较高的发射功率（如窗口 8 中 BS3 的 29.8dBm），以克服路径损耗和干扰，确保其超低时延和高可靠性要求。当 URLLC 任务负载较重时（如窗口 9），算法会聚合多个基站的资源（BS2 分配 30 个 RB，BS3 分配 10 个 RB）来共同满足需求。
- **eMBB (E-slice):** 该切片追求高吞吐量，对 SINR 敏感。算法的决策体现了机会主义调度思想：当某个基站与某些 eMBB 用户之间的信道条件极好，且来自邻近基站的干扰较小时，会大胆地为其分配大量 RB 和较高的功率（如窗口 9 中 BS1 为 eMBB 分配 30 个 RB，功率高达 27.3dBm）。反之，若信道或干扰环境恶劣，则会减少资源分配，避免资源浪费。
- **mMTC (M-slice):** 该切片服务质量目标是“尽力而为”地满足所有用户的基本连接需求。从结果看，几乎所有窗口的 mMTC QoS 得分都达到了其上限 30 分，表明算法总能找到足够的“边角料”资源来满足海量但低速率的连接请求，实现了对网络资源的充分利用。

## 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。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）。经过分析，上一问的模型框架在本问中得以延续，但需针对异构网络的特性进行调整。

### 7.2 模型建立

本问的模型延续之前的内容，但需要对信道与干扰模型、接入与调度规则、决策变量等进行调整，以适应宏基站与微基站的异构网络结构，相同的模型不再重复。

#### 7.2.1 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：

$$\gamma_k(\tau) = \frac{p_{\text{rx},0 \rightarrow k}(\tau)}{N_0(i_s)}, \quad \text{若 } a_{0,k}(t) = 1 \quad (28)$$

- 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：

$$\gamma_k(\tau) = \frac{p_{\text{rx},n \rightarrow k}(\tau)}{\sum_{u \in \mathcal{N}, u \neq n} I_{u \rightarrow k}(\tau) + N_0(i_s)}, \quad \text{若 } a_{n,k}(t) = 1, n \in \mathcal{N} \quad (29)$$

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：

$$r_k(\tau) = i_s \cdot b \cdot \log_2(1 + \gamma_k(\tau)) \quad (30)$$



### 7.2.2 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。

### 7.2.3 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**： $p_{0,s}(t) \in [10, 40]$  (dBm),  $p_{n,s}(t) \in [10, 30]$  (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）：

$$\max_{\{x,p,a\}} Q_{\text{total}} = \sum_{t \in \mathcal{T}} \left[ \sum_{k \in \mathcal{K}_U} \sum_{\tau \in \mathcal{A}_k(t)} y_{k,\tau}^U + \sum_{k \in \mathcal{K}_e} \sum_{\tau \in \mathcal{A}_k(t)} y_{k,\tau}^e + \sum_{k \in \mathcal{K}_m} \sum_{\tau \in \mathcal{A}_k(t)} y_{k,\tau}^m \right] \quad (31)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} \sum_{s \in \mathcal{S}} x_{n,s}(t) = R_n \\ x_{n,U}(t) \bmod 10 = 0, x_{n,e}(t) \bmod 5 = 0, x_{n,m}(t) \bmod 2 = 0 \\ x_{n,s}(t) \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \\ 10 \leq p_{0,s}(t) \leq 40, 10 \leq p_{n,s}(t) \leq 30 \ (\forall n \in \mathcal{N}) \\ Q_k(t+100) = \max \left\{ 0, Q_k(t) + \sum_{\tau \in \mathcal{F}(t)} D_k(\tau) - S_k(t) \right\} \\ r_k(\tau), \gamma_k(\tau) \text{ 由 } (x, p, a) \text{ 与 } (\phi, h) \text{ 及调度生成} \\ \sum_{n \in \tilde{\mathcal{N}}} a_{n,k}(t) \leq 1 \\ \forall n \in \tilde{\mathcal{N}}, s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T}, \forall k, t \end{cases} \quad (32)$$

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。

### 7.3 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 6) 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。

#### 7.3.1 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。

## 7.4 结果分析

我们采用上一节提出的“滚动 MPC+GA”方法对问题四进行了求解，得到了 10 个决策窗口内每个基站的资源块 (RB) 分配、切片功率以及用户接入策略。详细的数值结果记录在代码附录的 `q4_user_bs_mapping.csv` 和 `q4_window_results.csv` 文件中。本节将对这些结果进行分析。

### 7.4.1 总体性能与动态适应性

在 1000ms 的仿真周期内，我们所提出的算法实现了 **834.02** 的总服务质量 (QoS) 得分。每个窗口的详细 QoS 得分、资源和功率分配决策汇总于表 4。

表 4 问题四各窗口资源分配决策与 QoS 结果 (部分)

Win	MBS_1 (RB/P(dBm))			SBS_1 (RB/P(dBm))			SBS_2 (RB/P(dBm))			QoS			Obj.
	U	E	M	U	E	M	U	E	M	U	E	M	
0	30/25.1	40/23.8	30/24.6	20/24.6	20/25.8	10/25.0	20/25.0	0/27.8	30/26.2	93.42	14.26	40.00	147.68
1	30/25.7	0/25.2	70/26.9	0/25.5	0/27.5	50/24.1	30/25.9	0/22.3	20/24.0	85.68	0.00	40.00	125.68
2	50/25.8	0/24.1	50/22.9	0/28.1	0/26.0	50/23.3	0/19.9	0/26.8	50/25.1	64.61	0.00	40.00	104.61
3	0/22.5	0/22.7	100/23.3	30/21.0	0/24.7	20/21.1	30/26.4	0/21.9	20/25.7	50.85	0.00	40.00	90.85
4	0/24.9	0/24.8	100/27.8	0/25.5	0/29.2	50/21.0	30/23.7	0/25.9	20/24.1	43.16	0.00	40.00	83.16
5	0/21.2	0/26.5	100/25.9	30/30.0	0/25.9	20/23.1	30/25.6	0/24.7	20/27.0	50.27	0.00	40.00	90.27
6	0/22.0	0/29.6	100/22.4	20/25.8	0/24.9	30/24.1	30/27.6	0/22.2	20/25.5	47.51	0.00	40.00	87.51
7	0/27.4	0/24.9	100/29.0	20/26.3	0/28.5	30/20.9	30/25.1	0/29.4	20/26.5	48.32	0.00	34.10	82.42
8	0/23.2	0/22.8	100/26.9	10/24.2	0/21.9	40/29.4	20/23.8	0/26.8	30/23.9	19.48	0.00	10.03	29.50
9	0/22.3	0/23.9	100/29.8	30/22.3	0/25.6	20/26.0	50/23.9	0/28.4	0/29.3	11.74	0.00	-19.38	-7.64

从表 4 可以看出，算法在不同时间窗口展现出高度的动态适应性。

7.4.2 宏基站与微基站的协同策略

根据题目要求用户只能接入 MBS 或距离其最近的 SBS，通过求解，我们得到了用户接入基站决策，如图8所示。

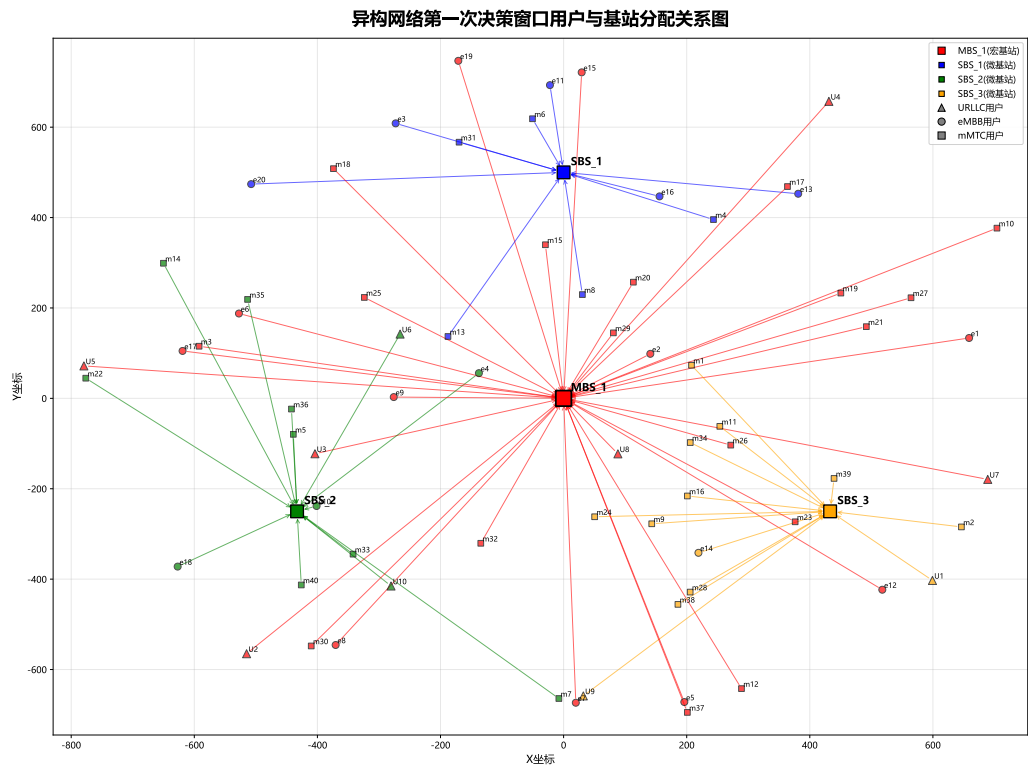


图 8 第四问用户接入可视化

- **宏基站（MBS）的角色：** MBS 拥有 100 个 RB 和更高的功率上限（40dBm），且无干扰，是网络中的“定海神针”。算法倾向于利用 MBS 来处理大规模、可容忍一定时延的业务。从窗口 1 到 9，MBS 几乎将全部资源投入到 mMTC 切片，确保了 mMTC 业务在大多数窗口都能拿到满分（40 分），这体现了利用 MBS 广覆盖、大容量优势来满足海量连接的策略。
- **微基站（SBS）的角色：** SBS 资源有限（50 个 RB）且存在同频干扰，但其部署更靠近用户，能提供更好的信道条件。算法主要利用 SBS 来保障对时延和速率要求苛刻的业务。例如，在窗口 3，当 MBS 全力服务 mMTC 时，三个 SBS 协同为 URLLC 用户提供了总计 80 个 RB 的资源，有效保障了高优先级业务的 QoS。此外，SBS 的功率控制也十分灵活，例如在窗口 5，SBS\_1 为 URLLC 切片输出了 30dBm 的满功率，以对抗干扰、确保可靠性。

## 8 问题五的模型的建立和求解

### 8.1 问题五的描述与分析

本问在第四问的异构网络场景和 QoS 评估框架基础上，引入了基站的能耗模型，旨在探索网络能耗的最小化的基础上，保障用户服务质量。这是一个典型的两阶段多目标优化问题。为此，我们设计了一个两阶段的优化求解框架。

### 8.2 预备工作

本问的集合、索引与大部分参数均与第四问保持一致。

- 基站集合： $\bar{\mathcal{N}} = \{0\} \cup \mathcal{N}$ ，其中 0 表示 MBS， $\mathcal{N} = \{1, 2, 3\}$  表示 SBS 集合。
- 切片集合： $\mathcal{S} = \{U, e, m\}$ 。
- 用户集合： $\mathcal{K} = \mathcal{K}_U \cup \mathcal{K}_e \cup \mathcal{K}_m$ 。
- 决策时刻集合： $\mathcal{T} = \{0, 100, \dots, 900\}$  ms。

新增的能耗模型相关参数（基于附录 6）如下：

- 固定功耗： $P_{static} = 28$  W。
- 每 RB 激活功耗系数： $\delta = 0.75$  W/RB。
- 功率放大器效率： $\eta = 0.35$ 。

### 8.3 模型建立

#### 8.3.1 能耗模型

基于附录 6，每个基站  $n \in \bar{\mathcal{N}}$  在任意时刻  $\tau$  的总功耗  $P_n(\tau)$  由三部分组成：

$$P_n(\tau) = P_{static} + P_{RB,n}(\tau) + P_{tx,n}(\tau) \quad (33)$$

其中：

- **固定功耗**  $P_{static}$ ：基站基础运行所需功耗。
- **RB 激活功耗**  $P_{RB,n}(\tau) = \delta \cdot N_{active,n}(\tau)$ ，与该时刻激活的 RB 总数  $N_{active,n}(\tau)$  成正比。 $N_{active,n}(\tau)$  是基站  $n$  在时刻  $\tau$  上服务所有用户的 RB 数量之和。
- **发射功耗**  $P_{tx,n}(\tau) = \frac{1}{\eta} P_{transmit,n}(\tau)$ ，与总发射功率  $P_{transmit,n}(\tau)$  成正比。 $P_{transmit,n}(\tau)$  是基站  $n$  在时刻  $\tau$  上服务所有用户的发射功率之和，单位为瓦特 (W)。

全网在时刻  $\tau$  的总功耗为  $P_{total}(\tau) = \sum_{n \in \bar{\mathcal{N}}} P_n(\tau)$ 。在一个决策窗口  $t$ （时长为  $T_w = 100$ ms）内的总能耗（单位：焦耳）为：

$$E_{total}(t) = \int_t^{t+T_w} P_{total}(\tau) d\tau \quad (34)$$

### 8.3.2 两阶段优化模型

为实现“优先最小化能耗，再最大化 QoS”的目标，我们将原问题分解为两个独立的子问题，在每个决策窗口  $t \in \mathcal{T}$  内依次进行优化。该方法的核心思想是，首先在满足基本通信需求的前提下，确定最优的节能功率配置；然后在此功率配置下，通过精细化的资源块（RB）分配来最大化用户服务质量（QoS）。

**第一阶段：能耗最小化** 此阶段的核心目标是，在用户接入和 RB 分配策略固定的情况下，通过调整各基站各切片的发射功率，找到使得窗口总能耗  $E_{total}(t)$  最小的功率分配方案  $\{p_{n,s}(t)\}$ 。该阶段的优化模型可表述为：

$$\begin{aligned} \min_{\{p_{n,s}(t)\}} \quad & E_{total}(t; \{p_{n,s}(t)\}) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} 10 \leq p_{0,s}(t) \leq 40, & \forall s \in \mathcal{S} \\ 10 \leq p_{n,s}(t) \leq 30, & \forall n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \end{cases} \end{aligned} \quad (35)$$

决策变量仅为各基站各切片的发射功率  $p_{n,s}(t)$ 。

**第二阶段：QoS 最大化** 在第一阶段得到最优功率分配方案  $p_{n,s}^*(t)$  后，此阶段的目标是在此节能功率配置下，通过优化 RB 的切片划分方案  $\{x_{n,s}(t)\}$ ，来最大化全网用户的总服务质量  $Q_{total}(t)$ 。该阶段的优化模型表述为：

$$\begin{aligned} \max_{\{x_{n,s}(t)\}} \quad & Q_{total}(t; \{x_{n,s}(t)\}, \{p_{n,s}^*(t)\}) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{s \in \mathcal{S}} x_{n,s}(t) = R_n, & \forall n \in \bar{\mathcal{N}} \\ x_{n,U}(t) \bmod 10 = 0, & \forall n \in \bar{\mathcal{N}} \\ x_{n,e}(t) \bmod 5 = 0, & \forall n \in \bar{\mathcal{N}} \\ x_{n,m}(t) \bmod 2 = 0, & \forall n \in \bar{\mathcal{N}} \\ x_{n,s}(t) \in \mathbb{Z}_{\geq 0}, & \forall n \in \bar{\mathcal{N}}, s \in \mathcal{S} \end{cases} \end{aligned} \quad (36)$$

决策变量为各基站为不同业务切片分配的 RB 数量  $x_{n,s}(t)$ 。目标函数  $Q_{total}$  的评估方式与第四问一致，均通过动态仿真得出，但此时是在给定的节能功率模式下进行。

### 8.4 模型求解

我们延续“滚动时域控制 (MPC)”框架，结合第二问的枚举仿真和第三四问的遗传算法，在每个 100ms 的窗口内，依次执行上述两阶段优化。

**第一阶段求解：遗传算法 (GA)** 由于能耗与功率之间存在复杂的非线性关系，且其评估依赖于精细的动态仿真，我们采用遗传算法（GA）求解第一阶段的功率优化问题。

- **编码：**个体仅编码各基站各切片的功率值，为一个长度为  $4 \times 3 = 12$  的浮点数数组。
- **适应度函数：**适应度被定义为窗口内总能耗的负值，即  $f = -E_{total}$ 。该能耗值通过调用一个 1ms 步长的仿真器，在固定的接入和 RB 分配下模拟整个窗口得出。
- **遗传算子：**采用锦标赛选择、算术交叉和高斯扰动变异。

**第二阶段求解：枚举仿真** 该阶段方法与第二问大致相同，区别在于第四问开始增加了宏基站，在枚举时需要同时考虑宏基站和微基站的 RB 分配。

## 8.5 结果分析

我们采用上一节提出的两阶段优化方法对问题五进行了求解。在 1000ms 的总仿真时长内，实现了 **183.68 J** 的总能耗，以及 **428.60** 的总服务质量（QoS）得分。每个决策窗口的详细结果汇总于表 5。

表 5 问题五各窗口资源分配决策与性能结果

Win	MBS_1 (RB/P(dBm))			SBS_1 (RB/P(dBm))			QoS	Energy (J)
	U	E	M	U	E	M		
0	0/23.9	0/27.1	100/25.1	10/14.9	10/10.0	30/10.0	95.75	19.68
1	0/27.8	0/21.1	100/17.6	0/21.8	0/10.0	50/10.0	72.13	18.10
2	0/27.9	0/24.5	100/25.6	0/18.7	0/10.0	50/10.0	40.37	18.12
3	0/29.1	0/25.6	100/27.0	0/17.8	0/10.0	50/10.0	92.88	18.25
4	0/23.8	0/20.5	100/32.0	0/10.0	0/10.0	50/10.0	61.77	17.97
5	0/25.2	0/30.8	100/18.2	0/10.0	0/10.0	50/10.0	83.54	18.10
6	0/26.8	0/25.6	100/23.2	0/10.0	10/10.0	40/10.0	13.49	19.48
7	0/21.0	0/24.9	100/34.7	0/10.0	0/10.0	50/10.0	3.64	18.09
8	0/26.6	0/24.4	100/25.0	0/10.0	0/10.0	50/10.0	-11.53	17.84
9	0/29.2	0/31.5	100/35.9	0/10.0	0/10.0	50/10.0	-23.45	18.05

注：表格仅展示了 MBS\_1 和 SBS\_1 的决策，完整决策见附录代码输出。

### 8.5.1 节能策略分析

第一阶段的 GA 优化展现了智能的功率控制策略以实现节能：

- **功率的精细化控制：** 与问题四中功率普遍较高的设定不同，本问中的功率分配显示出极大的差异性。例如，在窗口 0，SBS\_1 为 eMBB 和 mMTC 切片仅分配了 10.0dBm 的最低功率，而在窗口 5，MBS 为 eMBB 切片分配了高达 30.8dBm 的功率。这表明算法并非简单地“一刀切”式降低所有功率，而是根据不同切片、不同基站的信道和业务情况，有选择地、精细地调整功率，以最小的能耗代价满足基本通信需求。
- **向低功耗基站/切片倾斜：** 在固定 RB 分配下，GA 倾向于为信道条件好的用户（通常离基站近）分配较低的功率，而为信道条件差的用户分配较高的功率，以保证所有用户的基本连通性。同时，对于非关键业务或负载较轻的切片，算法会果断采用最低功率策略，从而最大化节能效果。

综上，本问提出的两阶段优化框架成功地实现了在保障基本服务的前提下最小化网络能耗的目标。结果清晰地量化了能耗与服务质量之间的权衡关系，并验证了通过精细化功率控制实现节能的有效性。

## 9 模型的评价

### 9.1 模型的优点

- **递进式建模与求解：** 模型设计由简入繁，从单基站静态分配（问题一）逐步扩展到动态多周期（问题二）、多基站干扰（问题三）、异构网络（问题四）乃至能耗优化（问题五）。这种渐进式框架不仅清晰地展示了对问题复杂性的逐步掌控能力，也使得每个阶段的模型都能作为后续复杂模型的有效子集或基础。
- **先进的混合优化框架：** 模型创新性地将模型预测控制（MPC）与遗传算法（GA）相结合。GA 作为高效的启发式求解器，在处理多基站、多切片联合分配的组合爆炸问题时，能够快速收敛到高质量的次优解，兼顾了求解效率与方案质量。
- **评估维度的全面性：** 评价体系综合考虑了 URLLC、eMBB、mMTC 三类切片差异化的服务质量（QoS）需求，涵盖了时延、速率、任务丢失率等关键指标。在问题五中，更进一步引入了基站能耗模型，实现了在保障 QoS 与优化网络能效间的权衡，模型评估维度全面，更贴近实际网络运营目标。

### 9.2 模型的缺点

- **启发式算法的局限性：** 在处理复杂场景（问题三至五）时，模型核心求解器为遗传算法。作为一种启发式算法，GA 虽然高效，但无法保证求得全局最优解，且算法性能对参数（如种群大小、交叉/变异率）的设置较为敏感，存在一定的寻优不确



定性。

- **环境模型的理想化假设：**模型对信道状态和用户移动性的假设较为理想，例如信道衰减数据由预先给定的表格查阅而非实时动态变化，用户移动轨迹也是已知的。在真实网络中，信道和用户行为的随机性与不可预测性更强，这可能影响模型在实际部署中的性能表现。

- **计算复杂度与实时性挑战：**尽管采用了 MPC 与 GA 来提升效率，但在每个决策窗口内执行一次完整的“预测-优化”流程，尤其是在大规模网络场景下（问题四、五），计算开销依然较大。对于需要毫秒级响应的无线资源调度而言，该模型的实时性可能面临挑战。

## 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.py	问题一：单基站枚举法求解器
q2.py	问题二：单微基站 MPC 滚动窗口求解器
q3.py	问题三：多基站 GA-MPC 求解器（同频干扰 + 功率控制）
q4.py	问题四：异构网络 GA-MPC 求解器（MBS+SBS，接入受限）
q5.py	问题五：能耗优化 GA-MPC 求解器（二阶段：功率优先 +RB 枚举）
q1_enum_results.csv	问题一求解结果
q2_enum_results_all.csv	问题二求解结果
q3_window_results.csv	问题三求解结果
q4_window_results.csv	问题四求解结果
q5_window_results.csv	问题五求解结果

## 附录 B 代码

q1.py

```
1  #!/usr/bin/env python3
2  # -*- coding: utf-8 -*-
3  import csv
4  import math
5  import os
6  from dataclasses import dataclass
7  from typing import Dict, List
8
9  # 系统常量
10 SCRIPT_DIR = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
11 ROOT_DIR = os.path.abspath(os.path.join(SCRIPT_DIR, "..", ".."))
12 ATTACH_DIR = os.path.join(ROOT_DIR, "题目", "附件", "附件1")
13
14 CSV_TASK = os.path.join(ATTACH_DIR, "q1_任务流.csv")
```

```

15 CSV_PL = os.path.join(ATTACH_DIR, "q1_大规模衰减.csv")
16 CSV_RAY = os.path.join(ATTACH_DIR, "q1_小规模瑞丽衰减.csv")
17
18 P_TX_DBM = 20.0
19 B_HZ = 360_000.0
20 NF_DB = 7.0
21 V_U, V_E, V_M = 10, 5, 2
22 ALPHA, M_U, M_E, M_M = 0.95, 5.0, 3.0, 1.0
23 SLA_L_U_MS, SLA_L_E_MS, SLA_L_M_MS = 5.0, 100.0, 500.0
24 SLA_R_E_MBPS = 50.0
25
26 @dataclass
27 class User:
28     name: str
29     category: str
30     data_mbit: float
31     pl_db: float
32     h_abs: float
33
34 def load_csv_users() -> List[User]:
35     """加载CSV并构建用户最小所需信息"""
36     with open(CSV_TASK, "r", encoding="utf-8") as f:
37         task_reader = csv.DictReader(f)
38         tasks = {row["用户"]: float(row["任务数据量(Mbit)"])
39 for row in task_reader}
40
41     phi_db: Dict[str, float] = {}
42     with open(CSV_PL, "r", encoding="utf-8") as f:
43         pl_reader = csv.DictReader(f)
44         for row in pl_reader:
45             phi_db[row["用户"]] = float(row["衰减(dB)"])
46
47     h_raw: Dict[str, float] = {}
48     with open(CSV_RAY, "r", encoding="utf-8") as f:
49         ray_reader = csv.DictReader(f)

```

```

49         for row in ray_reader:
50             h_raw[row["用户"]] = float(row["衰减(dB)"])
51
52     users: List[User] = []
53     for name, data_mbit in tasks.items():
54         category = "U" if name.startswith("U") else ("E" if
name.startswith("e") else "M")
55         p1 = phi_db.get(name, 100.0)
56         h_val = h_raw.get(name, 0.0)
57         # CSV中瑞丽一般以dB给出（负值），取功率/幅度绝对值的近
似
58         h_abs = math.sqrt(10 ** (h_val / 10.0)) if h_val <= 0
else h_val
59         users.append(User(name, category, data_mbit, p1, h_abs
))
60     return users
61
62 def dbm_to_mw(dbm: float) -> float:
63     return 10 ** (dbm / 10.0)
64
65 def noise_power_mw(num_rbs: int) -> float:
66     if num_rbs <= 0:
67         return 1e-30
68     n0_dbm = -174.0 + 10.0 * math.log10(num_rbs * B_HZ) +
NF_DB
69     return dbm_to_mw(n0_dbm)
70
71 def user_rate_bps(user: User, num_rbs: int) -> float:
72     p_rx = 10 ** ((P_TX_DBM - user.p1_db) / 10.0) * (user.
h_abs * user.h_abs)
73     n0 = noise_power_mw(num_rbs)
74     snr = p_rx / n0
75     return num_rbs * B_HZ * math.log2(1.0 + snr)
76
77 def delay_ms(user: User, num_rbs: int) -> float:

```

```

78     r_bps = user_rate_bps(user, num_rbs)
79     if r_bps <= 0.0:
80         return float("inf")
81     return (user.data_mbit * 1e6) / r_bps * 1e3
82
83 def urllic_qos_from_L(L_ms: float) -> float:
84     return ALPHA ** L_ms if L_ms <= SLA_L_U_MS else -M_U
85
86 def embb_qos_from_L_and_r(L_ms: float, r_bps: float) -> float:
87     r_mbps = r_bps / 1e6
88     if L_ms <= SLA_L_E_MS and r_mbps >= SLA_R_E_MBPS:
89         return 1.0
90     elif L_ms <= SLA_L_E_MS and r_mbps < SLA_R_E_MBPS:
91         return max(0.0, r_mbps / SLA_R_E_MBPS)
92     return -M_E
93
94 def schedule_slice(users: List[User], num_rbs_slice: int,
95     per_user_rbs: int) -> Dict[str, Dict[str, float]]:
96     """切片内串并行调度"""
97     import heapq
98     results = {}
99     cap = num_rbs_slice // per_user_rbs if per_user_rbs > 0
100     else 0
101     if cap <= 0:
102         for u in users:
103             r_bps = user_rate_bps(u, per_user_rbs) if
104             per_user_rbs > 0 else 0.0
105             results[u.name] = {"Q_ms": float("inf"), "T_ms":
106             delay_ms(u, per_user_rbs) if per_user_rbs > 0 else float("
107             inf"), "L_ms": float("inf"), "r_bps": r_bps}
108         return results
109
110     active_heap = []
111     counter = 0
112     idx = 0

```

```

108     n = len(users)
109
110     # 填满初始并发槽位
111     while idx < min(cap, n):
112         u = users[idx]
113         T_ms = delay_ms(u, per_user_rbs)
114         Q_ms = 0.0
115         L_ms = Q_ms + T_ms
116         r_bps = user_rate_bps(u, per_user_rbs)
117         results[u.name] = {"Q_ms": Q_ms, "T_ms": T_ms, "L_ms":
L_ms, "r_bps": r_bps}
118         heapq.heappush(active_heap, (L_ms, counter))
119         counter += 1
120         idx += 1
121
122     # 其余用户按完成最早者释放后接续
123     while idx < n:
124         u = users[idx]
125         earliest_finish, _ = heapq.heappop(active_heap)
126         T_ms = delay_ms(u, per_user_rbs)
127         start_ms = earliest_finish
128         Q_ms = start_ms
129         L_ms = Q_ms + T_ms
130         r_bps = user_rate_bps(u, per_user_rbs)
131         results[u.name] = {"Q_ms": Q_ms, "T_ms": T_ms, "L_ms":
L_ms, "r_bps": r_bps}
132         heapq.heappush(active_heap, (L_ms, counter))
133         counter += 1
134         idx += 1
135     return results
136
137 def enumerate_solution(users: List[User]) -> Dict[str, object
]:
138     """核心：枚举RB切片分配并计算目标值，返回最优方案"""
139     def sort_key(u: User):

```

```

140     pr = 0 if u.category == "U" else (1 if u.category == "
E" else 2)
141     num = int(u.name[1:]) if u.name[1:].isdigit() else 0
142     return (pr, num)
143
144     U = sorted([u for u in users if u.category == "U"], key=
sort_key)
145     E = sorted([u for u in users if u.category == "E"], key=
sort_key)
146     M = sorted([u for u in users if u.category == "M"], key=
sort_key)
147
148     best = {"obj": -1e18, "R": (0, 0, 0)}
149
150     for R_U in range(0, 51, V_U):
151         for R_E in range(0, 51 - R_U, V_E):
152             R_M = 50 - R_U - R_E
153             if R_M < 0 or R_M % V_M != 0:
154                 continue
155
156             U_sched = schedule_slice(U, R_U, V_U)
157             E_sched = schedule_slice(E, R_E, V_E)
158             M_sched = schedule_slice(M, R_M, V_M)
159
160             sum_U = sum(urllc_qos_from_L(U_sched[u.name]["L_ms
"]) for u in U)
161             sum_E = sum(embb_qos_from_L_and_r(E_sched[e.name][
"L_ms"], E_sched[e.name]["r_bps"]) for e in E)
162
163             denom_M = sum(1 for m in M if m.data_mbit > 0.0)
164             num_success = sum(1 for m in M if m.data_mbit >
0.0 and M_sched[m.name]["L_ms"] <= SLA_L_M_MS)
165             ratio = (num_success / denom_M) if denom_M > 0
else 0.0
166             sum_M = sum((ratio if M_sched[m.name]["L_ms"] <=

```

```

SLA_L_M_MS else -M_M) for m in M if m.data_mbit > 0.0)
167
168         obj = sum_U + sum_E + sum_M
169         if obj > best["obj"]:
170             best["obj"] = obj
171             best["R"] = (R_U, R_E, R_M)
172     return best
173
174 def main():
175     users = load_csv_users()
176     result = enumerate_solution(users)
177     R_U, R_E, R_M = result["R"]
178     print(f"最优RB分配: R_U={R_U}, R_E={R_E}, R_M={R_M}")
179     print(f"目标函数: {result['obj']:.4f}")
180
181 if __name__ == "__main__":
182     main()

```

q2.py

```

1  #!/usr/bin/env python3
2  # -*- coding: utf-8 -*-
3  """问题二：单微基站MPC滚动窗口求解器"""
4
5  import csv
6  import math
7  import os
8  from dataclasses import dataclass, field
9  from typing import Dict, List, Tuple, Deque
10 from collections import deque
11
12 # 系统常量
13 SCRIPT_DIR = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
14 ROOT_DIR = os.path.abspath(os.path.join(SCRIPT_DIR, "..", ".."
15     ))
16 ATTACH_DIR = os.path.join(ROOT_DIR, "题目", "附件", "附件2")

```



```

16
17 P_TX_DBM = 30.0
18 B_HZ = 360_000.0
19 NF_DB = 7.0
20 V_U, V_E, V_M = 10, 5, 2
21 ALPHA, M_U, M_E, M_M = 0.95, 5.0, 3.0, 1.0
22 SLA_L_U_MS, SLA_L_E_MS, SLA_L_M_MS = 5.0, 100.0, 500.0
23 SLA_R_E_MBPS = 50.0
24 WINDOW_MS, TOTAL_MS = 100, 1000
25
26 @dataclass
27 class Chunk:
28     arrival_ms: int
29     size_mbit: float
30     remain_mbit: float
31     start_ms: int | None = None
32     finish_ms: int | None = None
33
34 @dataclass
35 class UserState:
36     name: str
37     category: str
38     queue: Deque[Chunk] = field(default_factory=deque)
39
40     def has_backlog(self) -> bool:
41         return len(self.queue) > 0 and self.queue[0].
42             remain_mbit > 1e-15
43
44 @dataclass
45 class Env:
46     time_list: List[float]
47     arrivals_mbit: Dict[str, List[float]]
48     pl_db: Dict[str, List[float]]
49     ray_raw: Dict[str, List[float]]
50     small_scale_is_db: bool

```

```

50
51 def get_phi_db(self, name: str, t_ms: int) -> float:
52     arr = self.pl_db.get(name)
53     if arr is None:
54         return 100.0
55     t_ms = max(0, min(t_ms, len(arr) - 1))
56     return float(arr[t_ms])
57
58 def get_h_pow(self, name: str, t_ms: int) -> float:
59     arr = self.ray_raw.get(name)
60     if arr is None or len(arr) == 0:
61         return 1.0
62     t_ms = max(0, min(t_ms, len(arr) - 1))
63     val = float(arr[t_ms])
64     if self.small_scale_is_db:
65         return 10 ** (val / 10.0)
66     return val * val if val >= 0 else 1e-6
67
68 def load_time_series_csv(path: str) -> Tuple[List[float], Dict
69     [str, List[float]]]:
70     """读取时间序列CSV"""
71     time_list = []
72     series = {}
73     with open(path, "r", encoding="utf-8-sig") as f:
74         reader = csv.DictReader(f)
75         for row in reader:
76             t_str = row.get("Time", row.get("time", row.get("
77                 TIME")))
78             if t_str is None:
79                 continue
80             try:
81                 t_val = float(t_str)
82                 except ValueError:
83                     continue
84             time_list.append(t_val)

```

```

83         for key, val in row.items():
84             k = key.strip()
85             if k.lower() == "time":
86                 continue
87             if val is None or val == "":
88                 series.setdefault(k, []).append(0.0)
89                 continue
90             try:
91                 v = float(val)
92             except ValueError:
93                 v = 0.0
94             series.setdefault(k, []).append(v)
95     # 对齐长度
96     max_len = len(time_list)
97     for k, arr in series.items():
98         if len(arr) < max_len:
99             arr.extend([0.0] * (max_len - len(arr)))
100     return time_list, series
101
102 def build_env() -> Tuple[Env, List[str], List[str], List[str]]:
103     """构建环境和用户列表"""
104     time_list, arrivals = load_time_series_csv(os.path.join(
105         ATTACH_DIR, "q2_用户任务流.csv"))
106     _, pl = load_time_series_csv(os.path.join(ATTACH_DIR, "q2_
107     大规模衰减.csv"))
108     _, ray = load_time_series_csv(os.path.join(ATTACH_DIR, "
109     q2_小规模瑞丽衰减.csv"))
110
111     # 检测小规模衰减是否为dB
112     small_is_db = any(v < 0 for arr in ray.values() for v in
113     arr[:200])
114
115     def sort_key(name: str) -> Tuple[int, int]:
116         prefix_rank = 0 if name.startswith("U") else (1 if

```

```

name.startswith("e") else 2)
113     num = int(name[1:]) if name[1:].isdigit() else 0
114     return (prefix_rank, num)
115
116     all_names = list(arrivals.keys())
117     U_names = sorted([n for n in all_names if n.startswith("U"
118 )], key=sort_key)
118     E_names = sorted([n for n in all_names if n.startswith("e"
119 )], key=sort_key)
119     M_names = sorted([n for n in all_names if n.startswith("m"
120 )], key=sort_key)
121
122     env = Env(time_list=time_list, arrivals_mbit=arrivals,
123 pl_db=pl, ray_raw=ray, small_scale_is_db=small_is_db)
124     return env, U_names, E_names, M_names
125
126 def user_rate_bps(env: Env, name: str, t_ms: int, num_rbs: int
127 ) -> float:
128     """计算用户传输速率"""
129     if num_rbs <= 0:
130         return 0.0
131     phi_db = env.get_phi_db(name, t_ms)
132     h_pow = env.get_h_pow(name, t_ms)
133     p_rx_mw = 10 ** ((P_TX_DBM - phi_db) / 10.0) * h_pow
134     n0_mw = 10 ** ((-174.0 + 10.0 * math.log10(num_rbs * B_HZ)
135 + NF_DB) / 10.0)
136     snr = p_rx_mw / max(n0_mw, 1e-30)
137     return num_rbs * B_HZ * math.log(1.0 + snr, 2)
138
139 def simulate_window(env: Env, users: Dict[str, UserState],
140 U_order: List[str], E_order: List[str], M_order: List[str],
141 t0: int, nU: int, nE: int, nM: int):
142     """仿真100ms窗口"""
143     from copy import deepcopy
144     st = {name: UserState(name=u.name, category=u.category,

```

```
queue=deque(deepcopy(list(u.queue)))) for name, u in users.items()}
```

139

```
140     capU = nU // V_U if V_U > 0 else 0
```

```
141     capE = nE // V_E if V_E > 0 else 0
```

```
142     capM = nM // V_M if V_M > 0 else 0
```

143

```
144     activeU, activeE, activeM = [], [], []
```

```
145     m_had_arrival = set()
```

```
146     m_success_users = set()
```

147

```
148     sum_U = sum_E = sum_m_score = 0.0
```

149

```
150     t1 = min(t0 + WINDOW_MS, TOTAL_MS)
```

```
151     for t in range(t0, t1):
```

```
152         # 1) 到达处理
```

```
153         for name, arr_series in env.arrivals_mbit.items():
```

```
154             if t < len(arr_series):
```

```
155                 vol = arr_series[t]
```

```
156                 if vol > 0.0:
```

```
157                     st[name].queue.append(Chunk(arrival_ms=t,
size_mbit=vol, remain_mbit=vol))
```

```
158                     if name.startswith("m") and t0 <= t < t1:
```

```
159                         m_had_arrival.add(name)
```

160

```
161         # 2) 填充并发槽位
```

```
162         def fill_active(order: List[str], active: List[str],
```

```
cap: int):
```

```
163             active[:] = [nm for nm in active if st[nm].
```

```
has_backlog()]
```

```
164             for nm in order:
```

```
165                 if len(active) >= cap or nm in active:
```

```
166                     continue
```

```
167                 if st[nm].has_backlog():
```

```
168                     active.append(nm)
```

```

169
170     fill_active(U_order, activeU, capU)
171     fill_active(E_order, activeE, capE)
172     fill_active(M_order, activeM, capM)
173
174     # 3) 服务处理
175     def serve_one(name: str, per_user_rbs: int):
176         if not st[name].has_backlog():
177             return
178         head = st[name].queue[0]
179         if head.start_ms is None:
180             head.start_ms = t
181         r_bps = user_rate_bps(env, name, t, per_user_rbs)
182         served_mbit = (r_bps * 0.001) / 1e6
183         head.remain_mbit -= served_mbit
184         if head.remain_mbit <= 1e-12:
185             head.remain_mbit = 0.0
186             head.finish_ms = t + 1
187
188     for nm in activeU:
189         serve_one(nm, V_U)
190     for nm in activeE:
191         serve_one(nm, V_E)
192     for nm in activeM:
193         serve_one(nm, V_M)
194
195     # 4) QoS统计
196     def collect_finished(order: List[str], slice_type: str
197 ):
198         nonlocal sum_U, sum_E, m_success_users
199         for nm in order:
200             while st[nm].queue and st[nm].queue[0].
201 finish_ms == t + 1:
202                 ch = st[nm].queue.popleft()
203                 L_ms = (ch.finish_ms - ch.arrival_ms)

```

```

202         if slice_type == 'U':
203             sum_U += ALPHA ** L_ms if L_ms <=
SLA_L_U_MS else -M_U
204         elif slice_type == 'E':
205             r_mbps = (ch.size_mbit * 1000.0) /
L_ms
206             if L_ms <= SLA_L_E_MS and r_mbps >=
SLA_R_E_MBPS:
207                 sum_E += 1.0
208                 elif L_ms <= SLA_L_E_MS:
209                     sum_E += max(0.0, r_mbps /
SLA_R_E_MBPS)
210             else:
211                 sum_E += -M_E
212             else: # mMTC
213                 if t0 <= ch.arrival_ms < t1 and L_ms
<= SLA_L_M_MS:
214                     m_success_users.add(nm)
215
216             collect_finished(U_order, 'U')
217             collect_finished(E_order, 'E')
218             collect_finished(M_order, 'M')
219
220         # 5) mMTC最终计分
221         ratio = len(m_success_users) / len(m_had_arrival) if
m_had_arrival else 0.0
222         for u in m_had_arrival:
223             sum_m_score += ratio if u in m_success_users else -M_M
224
225         obj = sum_U + sum_E + sum_m_score
226         return st, type('SimResult', (), {'sum_U': sum_U, 'sum_E':
sum_E, 'sum_m_score': sum_m_score, 'obj': obj})()
227
228 def enumerate_splits() -> List[Tuple[int, int, int]]:
229     """枚举所有合法RB分配"""

```

```

230     splits = []
231     for nU in range(0, 51, V_U):
232         for nE in range(0, 51 - nU, V_E):
233             nM = 50 - nU - nE
234             if nM >= 0 and nM % V_M == 0:
235                 splits.append((nU, nE, nM))
236     return splits
237
238 def main():
239     env, U_names, E_names, M_names = build_env()
240     users = {}
241     for nm in U_names:
242         users[nm] = UserState(name=nm, category='U')
243     for nm in E_names:
244         users[nm] = UserState(name=nm, category='E')
245     for nm in M_names:
246         users[nm] = UserState(name=nm, category='M')
247
248     splits = enumerate_splits()
249     total_obj = 0.0
250
251     # 逐窗口MPC决策
252     for w in range(0, TOTAL_MS, WINDOW_MS):
253         best_split, best_state_after, best_res = (0, 0, 50),
None, None
254         best_score = -1e18
255         for (nU, nE, nM) in splits:
256             new_state, res = simulate_window(env, users,
U_names, E_names, M_names, w, nU, nE, nM)
257             if res.obj > best_score:
258                 best_split, best_state_after, best_res = (nU,
nE, nM), new_state, res
259                 best_score = res.obj
260             users = best_state_after
261             total_obj += best_res.obj

```



```

262
263         # 简化输出：仅在结尾汇总
264
265         print(f"累计目标函数: {total_obj:.4f}")
266
267     if __name__ == "__main__":
268         main()

```

q3.py

```

1  #!/usr/bin/env python3
2  # -*- coding: utf-8 -*-
3  """问题三：多基站GA-MPC求解器（同频干扰+功率控制）"""
4
5  import csv
6  import math
7  import os
8  import random
9  from dataclasses import dataclass
10 from typing import Dict, List, Tuple
11 import numpy as np
12 from collections import deque
13 from copy import deepcopy
14
15 # 基础路径
16 SCRIPT_DIR = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
17 ROOT_DIR = os.path.abspath(os.path.join(SCRIPT_DIR, "..", ".."))
18 ATTACH3_DIR = os.path.join(ROOT_DIR, "题目", "附件", "附件3")
19
20 B_HZ = 360_000.0
21 NF_DB = 7.0
22 RB_PER_SLICE = {"U": 10, "E": 5, "M": 2}
23 ALPHA, M_U, M_E, M_M = 0.95, 5.0, 3.0, 1.0
24 SLA_L = {"U": 5.0, "E": 100.0, "M": 500.0}
25 SLA_R_E_MBPS = 50.0

```

```

26 POWER_MIN, POWER_MAX = 10.0, 30.0
27 WINDOW_MS, TOTAL_MS = 100, 1000
28
29 # GA参数 (适度精简)
30 POP_SIZE, MAX_GEN = 30, 200
31 TOURN_K, CROSS_RATE, MUTATE_RATE, ELITE_NUM = 3, 0.8, 0.3, 5
32 BS_LIST = ["BS1", "BS2", "BS3"]
33 SLICE_LIST = ["U", "E", "M"]
34
35 @dataclass
36 class Env:
37     time_list: List[float]
38     arrivals: Dict[str, List[float]]
39     phi: Dict[str, Dict[str, List[float]]]
40     h_abs: Dict[str, Dict[str, List[float]]]
41
42     def phi_db(self, bs: str, user: str, t: int) -> float:
43         arr = self.phi.get(bs, {}).get(user)
44         if arr is None or len(arr) == 0:
45             return 120.0
46         idx = min(max(t, 0), len(arr) - 1)
47         return float(arr[idx])
48
49     def h_pow(self, bs: str, user: str, t: int) -> float:
50         arr = self.h_abs.get(bs, {}).get(user)
51         if arr is None or len(arr) == 0:
52             return 1.0
53         idx = min(max(t, 0), len(arr) - 1)
54         val = float(arr[idx])
55         return val * val if val >= 0 else 0.0
56
57 @dataclass
58 class Chunk:
59     arrival_ms: int
60     size_mbit: float

```

```

61     remain_mbit: float
62     start_ms: int | None = None
63     finish_ms: int | None = None
64
65 @dataclass
66 class UserState:
67     name: str
68     category: str
69     queue: deque[Chunk]
70
71     def has_backlog(self) -> bool:
72         return len(self.queue) > 0 and self.queue[0].
73         remain_mbit > 1e-12
74
75 def load_time_series_csv(path: str) -> Tuple[List[float], Dict
76     [str, List[float]]]:
77     """加载时间序列CSV数据"""
78     time_list = []
79     series = {}
80     with open(path, "r", encoding="utf-8-sig") as f:
81         reader = csv.DictReader(f)
82         for row in reader:
83             t_val_str = row.get("Time", row.get("time", row.
84             get("TIME")))
85             if t_val_str is None:
86                 continue
87             try:
88                 t_val = float(t_val_str)
89             except ValueError:
90                 continue
91             time_list.append(t_val)
92             for key, val in row.items():
93                 k = key.strip()
94                 if k.lower() == "time":
95                     continue

```

```

93         if val is None or val == "":
94             series.setdefault(k, []).append(0.0)
95             continue
96         try:
97             v = float(val)
98         except ValueError:
99             v = 0.0
100         series.setdefault(k, []).append(v)
101     # 填齐列长度
102     max_len = len(time_list)
103     for arr in series.values():
104         if len(arr) < max_len:
105             arr.extend([0.0] * (max_len - len(arr)))
106     return time_list, series
107
108 def build_env() -> Tuple[Env, List[str]]:
109     """构建环境和用户列表"""
110     time_list, arrivals = load_time_series_csv(os.path.join(
111         ATTACH3_DIR, "taskflow_用户任务流.csv"))
112     phi = {}
113     h_abs = {}
114
115     CSV_PL = {
116         "BS1": os.path.join(ATTACH3_DIR, "BS1_大规模衰减.csv"),
117         "BS2": os.path.join(ATTACH3_DIR, "BS2_大规模衰减.csv"),
118         "BS3": os.path.join(ATTACH3_DIR, "BS3_大规模衰减.csv"),
119     }
120     CSV_RAY = {
121         "BS1": os.path.join(ATTACH3_DIR, "BS1_小规模瑞丽衰减.csv"),
122         "BS2": os.path.join(ATTACH3_DIR, "BS2_小规模瑞丽衰减.csv"),

```

```

122         "BS3": os.path.join(ATTACH3_DIR, "BS3_小规模瑞丽衰减.
csv"),
123     }
124
125     for bs in BS_LIST:
126         _, phi_bs = load_time_series_csv(CSV_PL[bs])
127         _, ray_bs = load_time_series_csv(CSV_RAY[bs])
128         phi[bs] = phi_bs
129         h_abs[bs] = ray_bs
130
131     all_users = sorted(arrivals.keys(), key=lambda x: (x[0],
int(x[1:])) if x[1:].isdigit() else 0))
132     return Env(time_list=time_list, arrivals=arrivals, phi=phi
, h_abs=h_abs), all_users
133
134 def user_category(name: str) -> str:
135     """确定用户类别"""
136     if name.startswith("U"):
137         return "U"
138     if name.startswith("e"):
139         return "E"
140     return "M"
141
142 def user_rate_bps(env: Env, bs: str, name: str, cat: str,
power_alloc: Dict[str, Dict[str, float]],
active_bs_same_slice: List[str], t_ms: int) -> float:
143     """计算考虑干扰的下行速率"""
144     p_tx_mw = 10 ** (power_alloc[bs][cat] / 10.0)
145     phi_db = env.phi_db(bs, name, t_ms)
146     h_pow = env.h_pow(bs, name, t_ms)
147     recv_mw = p_tx_mw * 10 ** (-phi_db / 10.0) * h_pow
148
149     # 计算同切片干扰
150     interf_mw = 0.0
151     for b2 in active_bs_same_slice:

```

```

152         if b2 == bs:
153             continue
154         p_int_mw = 10 ** (power_alloc[b2][cat] / 10.0)
155         phi_db_i = env.phi_db(b2, name, t_ms)
156         h_pow_i = env.h_pow(b2, name, t_ms)
157         interf_mw += p_int_mw * 10 ** (-phi_db_i / 10.0) *
h_pow_i
158
159         n0_mw = 10 ** ((-174.0 + 10.0 * math.log10(RB_PER_SLICE[
cat] * B_HZ) + NF_DB) / 10.0)
160         sinr = recv_mw / (interf_mw + n0_mw + 1e-30)
161         return RB_PER_SLICE[cat] * B_HZ * math.log2(1.0 + sinr)
162
163 def simulate_window_multibs(env: Env, init_states: Dict[str,
UserState], mapping: Dict[str, str], rb_alloc: Dict[str,
Dict[str, int]], power_alloc: Dict[str, Dict[str, float]],
t0: int, copy_state: bool = True):
164     """多基站窗口仿真"""
165     states = {}
166     if copy_state:
167         for name, st in init_states.items():
168             states[name] = UserState(name=st.name, category=st
.category, queue=deque(deepcopy(list(st.queue))))
169     else:
170         states = init_states
171
172     # 计算并发容量
173     cap = {bs: {s: rb_alloc[bs][s] // RB_PER_SLICE[s] for s in
SLICE_LIST} for bs in BS_LIST}
174     active = {bs: {s: [] for s in SLICE_LIST} for bs in
BS_LIST}
175
176     # 用户顺序（编号优先）
177     def sort_key(u: str):
178         return (u[0], int(u[1:]) if u[1:].isdigit() else 0)

```

```

179
180     order = {bs: {s: [] for s in SLICE_LIST} for bs in BS_LIST
181 }
182     for nm, bs in mapping.items():
183         cat = user_category(nm)
184         order[bs][cat].append(nm)
185     for bs in BS_LIST:
186         for s in SLICE_LIST:
187             order[bs][s].sort(key=sort_key)
188
189     sum_U = sum_E = sum_M = 0.0
190     had_m_users = set()
191     success_m_users = set()
192
193     t1 = min(t0 + WINDOW_MS, TOTAL_MS)
194     for t in range(t0, t1):
195         # 到达处理
196         for nm in states.keys():
197             arr_series = env.arrivals.get(nm, [])
198             if t < len(arr_series):
199                 vol = arr_series[t]
200                 if vol > 0.0:
201                     states[nm].queue.append(Chunk(arrival_ms=t
202 , size_mbit=vol, remain_mbit=vol))
203                     if states[nm].category == 'M':
204                         had_m_users.add(nm)
205
206         # 填充并发槽位
207         for bs in BS_LIST:
208             for s in SLICE_LIST:
209                 active[bs][s] = [u for u in active[bs][s] if
210 states[u].has_backlog()]
211                 while len(active[bs][s]) < cap[bs][s]:
212                     for cand in order[bs][s]:
213                         if cand in active[bs][s]:

```

```

211         continue
212         if states[cand].has_backlog():
213             active[bs][s].append(cand)
214             break
215     else:
216         break
217
218     # 服务处理
219     for bs in BS_LIST:
220         for s in SLICE_LIST:
221             if len(active[bs][s]) == 0:
222                 continue
223             active_bs_same_slice = [b for b in BS_LIST if
224 len(active[b][s]) > 0]
225             for u in list(active[bs][s]):
226                 rate_bps = user_rate_bps(env, bs, u, s,
227 power_alloc, active_bs_same_slice, t)
228                 served_mbit = (rate_bps * 0.001) / 1e6
229                 head = states[u].queue[0]
230                 if head.start_ms is None:
231                     head.start_ms = t
232                 head.remain_mbit -= served_mbit
233                 if head.remain_mbit <= 1e-12:
234                     head.remain_mbit = 0.0
235                     head.finish_ms = t + 1
236                     states[u].queue.popleft()
237                     # QoS统计
238                     L_ms = (head.finish_ms - head.
239 arrival_ms)
240                     if s == 'U':
241                         sum_U += ALPHA ** L_ms if L_ms <=
242 SLA_L['U'] else -M_U
243                     elif s == 'E':
244                         r_mbps = (head.size_mbit * 1000.0)
245 / max(L_ms, 1e-12)

```



```

241         if L_ms <= SLA_L['E'] and r_mbps
242         >= SLA_R_E_MBPS:
243             sum_E += 1.0
244             elif L_ms <= SLA_L['E']:
245                 sum_E += max(0.0, r_mbps /
246 SLA_R_E_MBPS)
247             else:
248                 sum_E += -M_E
249             else:
250                 if L_ms <= SLA_L['M']:
251                     success_m_users.add(u)
252
253 # mMTC评分
254 if len(had_m_users) > 0:
255     ratio = len(success_m_users) / len(had_m_users)
256     for u in had_m_users:
257         sum_M += ratio if u in success_m_users else -M_M
258
259 obj = sum_U + sum_E + sum_M
260 result = type('SimResult', ()), {'sum_U': sum_U, 'sum_E':
261 sum_E, 'sum_M': sum_M, 'obj': obj})()
262 return states, result
263
264 # 遗传算法实现
265 def random_individual(num_users: int):
266     """生成随机个体：用户-基站映射 + RB分配 + 功率设置"""
267     user_bs = np.random.randint(0, 3, size=num_users, dtype=np
268 .int8)
269     rb_counts = np.zeros(6, dtype=np.int16) # 每个BS的U_RB,
270 E_RB
271     idx = 0
272     for _bs in BS_LIST:
273         total = 50
274         u_units_max = total // RB_PER_SLICE['U']
275         u_units = np.random.randint(0, u_units_max + 1)

```

```

271     u_rb = int(u_units * RB_PER_SLICE['U'])
272     e_units_max = (total - u_rb) // RB_PER_SLICE['E']
273     e_units = np.random.randint(0, e_units_max + 1)
274     e_rb = int(e_units * RB_PER_SLICE['E'])
275     rb_counts[idx] = u_rb
276     rb_counts[idx + 1] = e_rb
277     idx += 2
278     power = np.random.uniform(18.0, 26.0, size=9).astype(np.
float32)
279     return [user_bs, rb_counts, power]
280
281 def decode_rb(rb_counts: np.ndarray) -> Dict[str, Dict[str,
int]]:
282     """解码RB分配"""
283     out = {}
284     idx = 0
285     for bs in BS_LIST:
286         total = 50
287         u_req = int(rb_counts[idx])
288         e_req = int(rb_counts[idx + 1])
289         idx += 2
290         u_rb = max(0, min(total, (u_req // RB_PER_SLICE['U'])
* RB_PER_SLICE['U']))
291         e_rb = max(0, min(total - u_rb, (e_req // RB_PER_SLICE
['E']) * RB_PER_SLICE['E']))
292         if u_rb + e_rb > total:
293             e_rb = max(0, (total - u_rb) // RB_PER_SLICE['E']
* RB_PER_SLICE['E'])
294         m_rb = total - (u_rb + e_rb)
295         if m_rb % RB_PER_SLICE['M'] != 0:
296             if e_rb >= RB_PER_SLICE['E']:
297                 e_rb -= RB_PER_SLICE['E']
298             elif e_rb + RB_PER_SLICE['E'] <= total - u_rb:
299                 e_rb += RB_PER_SLICE['E']
300             elif u_rb >= RB_PER_SLICE['U']:

```

```

301         u_rb -= RB_PER_SLICE['U']
302         m_rb = total - (u_rb + e_rb)
303         if m_rb % RB_PER_SLICE['M'] != 0 and u_rb >=
RB_PER_SLICE['U']:
304             u_rb -= RB_PER_SLICE['U']
305             m_rb = total - (u_rb + e_rb)
306         out[bs] = {"U": u_rb, "E": e_rb, "M": m_rb}
307     return out
308
309 def decode_power(power_arr: np.ndarray) -> Dict[str, Dict[str,
float]]:
310     """解码功率分配"""
311     out = {}
312     idx = 0
313     for bs in BS_LIST:
314         sub = {}
315         for s in SLICE_LIST:
316             p = float(power_arr[idx])
317             p = max(POWER_MIN, min(POWER_MAX, p))
318             sub[s] = p
319             idx += 1
320         out[bs] = sub
321     return out
322
323 def evaluate_individual(indiv, env: Env, users: List[str],
user_states: Dict[str, UserState], t0: int) -> float:
324     """评价个体适应度"""
325     user_bs, rb_ratio, power_arr = indiv
326     rb_alloc = decode_rb(rb_ratio)
327     power_alloc = decode_power(power_arr)
328     mapping = {users[i]: BS_LIST[int(user_bs[i])]} for i in
range(len(users))}
329     _, res = simulate_window_multibs(env, user_states, mapping
, rb_alloc, power_alloc, t0, copy_state=True)
330     return res.obj

```

```

331
332 def tournament_select(pop_scores: List[float]) -> int:
333     """锦标赛选择"""
334     cand = random.sample(range(len(pop_scores)), TOURN_K)
335     cand.sort(key=lambda idx: pop_scores[idx], reverse=True)
336     return cand[0]
337
338 def crossover(parent1, parent2):
339     """交叉操作"""
340     if random.random() > CROSS_RATE:
341         return parent1, parent2
342     u1, rb1, p1 = parent1
343     u2, rb2, p2 = parent2
344     num_users = len(u1)
345     pt = random.randint(1, num_users - 1)
346     child_u1 = np.concatenate([u1[:pt], u2[pt:]]).astype(np.
347 int8)
348     child_u2 = np.concatenate([u2[:pt], u1[pt:]]).astype(np.
349 int8)
350     child_rb1 = ((rb1.astype(np.float32) + rb2) / 2.0).astype(
351 np.int16)
352     child_rb2 = child_rb1.copy()
353     child_p1 = (p1 + p2) / 2.0
354     child_p2 = child_p1.copy()
355     return [child_u1, child_rb1, child_p1], [child_u2,
356 child_rb2, child_p2]
357
358 def mutate(indiv):
359     """变异操作"""
360     user_bs, rb_counts, power_arr = indiv
361     num_users = len(user_bs)
362     # 用户基站变异
363     for i in range(num_users):
364         if random.random() < MUTATE_RATE:
365             user_bs[i] = np.random.randint(0, 3)

```

```

362     # RB变异
363     for b in range(len(BS_LIST)):
364         iu = 2 * b
365         ie = iu + 1
366         total = 50
367         if random.random() < MUTATE_RATE:
368             u_units_max = total // RB_PER_SLICE['U']
369             u_units = np.random.randint(0, u_units_max + 1)
370             rb_counts[iu] = int(u_units * RB_PER_SLICE['U'])
371         if random.random() < MUTATE_RATE:
372             u_rb = int(rb_counts[iu])
373             e_units_max = (total - u_rb) // RB_PER_SLICE['E']
374             e_units = np.random.randint(0, e_units_max + 1)
375             rb_counts[ie] = int(e_units * RB_PER_SLICE['E'])
376     # 功率高斯噪声
377     for i in range(len(power_arr)):
378         if random.random() < MUTATE_RATE:
379             power_arr[i] += np.random.normal(0.0, 1.0)
380             power_arr[i] = max(POWER_MIN, min(POWER_MAX,
power_arr[i]))
381
382 def main():
383     """附录精简：第三问省略与第二问相同的MPC仿真，仅保留关键函
数与接口。"""
384     print("[附录] 问题三：已省略滚动窗口MPC仿真及完整GA循环，
仅保留核心组件与接口。")
385
386 if __name__ == "__main__":
387     main()

```

q4.py

```

1  #!/usr/bin/env python3
2  # -*- coding: utf-8 -*-
3  """问题四：异构网络GA-MPC求解器（MBS+SBS，接入受限）"""
4

```

```

5 import csv
6 import math
7 import os
8 import random
9 from dataclasses import dataclass
10 from typing import Dict, List, Tuple
11 import numpy as np
12 from collections import deque
13 from copy import deepcopy
14
15 # 路径和常量配置
16 SCRIPT_DIR = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
17 ROOT_DIR = os.path.abspath(os.path.join(SCRIPT_DIR, "..", ".."
    ))
18 ATTACH4_DIR = os.path.join(ROOT_DIR, "题目", "附件", "附件4")
19
20 B_HZ = 360_000.0
21 NF_DB = 7.0
22 RB_PER_SLICE = {"U": 10, "E": 5, "M": 2}
23 SLICE_LIST = ["U", "E", "M"]
24 ALPHA, M_U, M_E, M_M = 0.95, 5.0, 3.0, 1.0
25 SLA_L_MS = {"U": 5.0, "E": 100.0, "M": 500.0}
26 SLA_R_E_MBPS = 50.0
27 WINDOW_MS, TOTAL_MS = 100, 1000
28
29 # 基站配置
30 BS_LIST = ["MBS_1", "SBS_1", "SBS_2", "SBS_3"]
31 SBS_ONLY = [bs for bs in BS_LIST if bs.startswith("SBS_")]
32 RB_TOTAL = {"MBS_1": 100, "SBS_1": 50, "SBS_2": 50, "SBS_3":
    50}
33 P_MIN_DBM = {"MBS_1": 10.0, "SBS_1": 10.0, "SBS_2": 10.0, "
    SBS_3": 10.0}
34 P_MAX_DBM = {"MBS_1": 40.0, "SBS_1": 30.0, "SBS_2": 30.0, "
    SBS_3": 30.0}
35

```

```

36 # 基站坐标
37 BS_COORD = {
38     "MBS_1": (0.0, 0.0),
39     "SBS_1": (0.0, 500.0),
40     "SBS_2": (-433.0127, -250.0),
41     "SBS_3": (433.0127, -250.0),
42 }
43
44 # GA参数 (适度精简)
45 POP_SIZE, MAX_GEN = 30, 200
46 TOURN_K, CROSS_RATE, MUTATE_RATE, ELITE_NUM = 3, 0.8, 0.3, 5
47
48 @dataclass
49 class Env:
50     time_list: List[float]
51     arrivals: Dict[str, List[float]]
52     phi: Dict[str, Dict[str, List[float]]]
53     h_abs: Dict[str, Dict[str, List[float]]]
54     pos_x: Dict[str, List[float]]
55     pos_y: Dict[str, List[float]]
56
57     def phi_db(self, bs: str, user: str, t: int) -> float:
58         arr = self.phi.get(bs, {}).get(user)
59         if arr is None or len(arr) == 0:
60             return 120.0
61         idx = min(max(t, 0), len(arr) - 1)
62         return float(arr[idx])
63
64     def h_pow(self, bs: str, user: str, t: int) -> float:
65         arr = self.h_abs.get(bs, {}).get(user)
66         if arr is None or len(arr) == 0:
67             return 1.0
68         idx = min(max(t, 0), len(arr) - 1)
69         val = float(arr[idx])
70         return val * val if val >= 0 else 0.0

```

```

71
72     def user_xy(self, user: str, t: int) -> Tuple[float, float
73 ]:
74         xs = self.pos_x.get(f"{user}_X") or self.pos_x.get(f"{
75 user}_X") or self.pos_x.get(user)
76         ys = self.pos_y.get(f"{user}_Y") or self.pos_y.get(f"{
77 user}_Y") or self.pos_y.get(user)
78         if not xs or not ys:
79             return 0.0, 0.0
80         idx = min(max(t, 0), min(len(xs), len(ys)) - 1)
81         return float(xs[idx]), float(ys[idx])
82
83 @dataclass
84 class Chunk:
85     arrival_ms: int
86     size_mbit: float
87     remain_mbit: float
88     start_ms: int | None = None
89     finish_ms: int | None = None
90
91 @dataclass
92 class UserState:
93     name: str
94     category: str
95     queue: deque[Chunk]
96
97     def has_backlog(self) -> bool:
98         return len(self.queue) > 0 and self.queue[0].
99         remain_mbit > 1e-12
100
101 def load_time_series_csv(path: str) -> Tuple[List[float], Dict
102 [str, List[float]]]:
103     """读取时间序列CSV"""
104     time_list = []
105     series = {}

```



```

101     with open(path, "r", encoding="utf-8-sig") as f:
102         reader = csv.DictReader(f)
103         for row in reader:
104             t_val_str = row.get("Time", row.get("time", row.
get("TIME")))
105             if t_val_str is None:
106                 continue
107             try:
108                 t_val = float(t_val_str)
109             except ValueError:
110                 continue
111             time_list.append(t_val)
112             for key, val in row.items():
113                 k = key.strip()
114                 if k.lower() == "time":
115                     continue
116                 if val is None or val == "":
117                     series.setdefault(k, []).append(0.0)
118                     continue
119                 try:
120                     v = float(val)
121                 except ValueError:
122                     v = 0.0
123                 series.setdefault(k, []).append(v)
124     max_len = len(time_list)
125     for arr in series.values():
126         if len(arr) < max_len:
127             arr.extend([0.0] * (max_len - len(arr)))
128     return time_list, series
129
130 def build_env() -> Tuple[Env, List[str]]:
131     """构建环境"""
132     time_list, arrivals = load_time_series_csv(os.path.join(
ATTACH4_DIR, "taskflow_用户任务流.csv"))
133

```

```

134     # 信道数据
135     phi = {}
136     h_abs = {}
137     CSV_PL = {
138         "MBS_1": os.path.join(ATTACH4_DIR, "MBS_1_大规模衰减.
139 csv"),
140         "SBS_1": os.path.join(ATTACH4_DIR, "SBS_1_大规模衰减.
141 csv"),
142         "SBS_2": os.path.join(ATTACH4_DIR, "SBS_2_大规模衰减.
143 csv"),
144         "SBS_3": os.path.join(ATTACH4_DIR, "SBS_3_大规模衰减.
145 csv"),
146     }
147     CSV_RAY = {
148         "MBS_1": os.path.join(ATTACH4_DIR, "MBS_1_小规模瑞丽衰
149 减.csv"),
150         "SBS_1": os.path.join(ATTACH4_DIR, "SBS_1_小规模瑞丽衰
151 减.csv"),
152         "SBS_2": os.path.join(ATTACH4_DIR, "SBS_2_小规模瑞丽衰
153 减.csv"),
154         "SBS_3": os.path.join(ATTACH4_DIR, "SBS_3_小规模瑞丽衰
155 减.csv"),
156     }
157     for bs in BS_LIST:
158         _, phi_bs = load_time_series_csv(CSV_PL[bs])
159         _, ray_bs = load_time_series_csv(CSV_RAY[bs])
160         phi[bs] = phi_bs
161         h_abs[bs] = ray_bs
162
163     # 位置数据
164     _, pos_series = load_time_series_csv(os.path.join(
165 ATTACH4_DIR, "taskflow_用户位置.csv"))
166     pos_x = {}
167     pos_y = {}

```

```

160     for key, arr in pos_series.items():
161         if key.endswith("_X"):
162             pos_x[key] = arr
163         elif key.endswith("_Y"):
164             pos_y[key] = arr
165
166     all_users = sorted(arrivals.keys(), key=lambda x: (x[0],
167 int(x[1:])) if x[1:].isdigit() else 0))
167     return Env(time_list=time_list, arrivals=arrivals, phi=phi
168 , h_abs=h_abs, pos_x=pos_x, pos_y=pos_y), all_users
169
170 def user_category(name: str) -> str:
171     """确定用户类别"""
172     if name.startswith("U"):
173         return "U"
174     if name.startswith("e"):
175         return "E"
176     return "M"
177
178 def user_rate_bps(env: Env, bs: str, name: str, cat: str,
179 power_alloc: Dict[str, Dict[str, float]],
180 active_sbs_same_slice: List[str], t_ms: int) -> float:
181     """计算下行速率，MBS无干扰，SBS受其他SBS干扰"""
182     p_tx_mw = 10 ** (power_alloc[bs][cat] / 10.0)
183     phi_db = env.phi_db(bs, name, t_ms)
184     h_pow = env.h_pow(bs, name, t_ms)
185     recv_mw = p_tx_mw * 10 ** (-phi_db / 10.0) * h_pow
186
187     interf_mw = 0.0
188     if bs in SBS_ONLY:
189         for b2 in active_sbs_same_slice:
190             if b2 == bs:
191                 continue
192             p_int_mw = 10 ** (power_alloc[b2][cat] / 10.0)
193             phi_db_i = env.phi_db(b2, name, t_ms)

```

```

191         h_pow_i = env.h_pow(b2, name, t_ms)
192         interf_mw += p_int_mw * 10 ** (-phi_db_i / 10.0) *
h_pow_i
193
194         n0_mw = 10 ** ((-174.0 + 10.0 * math.log10(RB_PER_SLICE[
cat] * B_HZ) + NF_DB) / 10.0)
195         sinr = recv_mw / (interf_mw + n0_mw + 1e-30)
196         return RB_PER_SLICE[cat] * B_HZ * math.log2(1.0 + sinr)
197
198 def simulate_window(env: Env, init_states: Dict[str, UserState
], mapping: Dict[str, str], rb_alloc: Dict[str, Dict[str,
int]], power_alloc: Dict[str, Dict[str, float]], t0: int,
copy_state: bool = True):
199     """异构网络窗口仿真"""
200     states = {}
201     if copy_state:
202         for name, st in init_states.items():
203             states[name] = UserState(name=st.name, category=st
.category, queue=deque(deepcopy(list(st.queue))))
204     else:
205         states = init_states
206
207     cap = {bs: {s: rb_alloc[bs][s] // RB_PER_SLICE[s] for s in
SLICE_LIST} for bs in BS_LIST}
208     active = {bs: {s: [] for s in SLICE_LIST} for bs in
BS_LIST}
209
210     def sort_key(u: str):
211         return (u[0], int(u[1:]) if u[1:].isdigit() else 0)
212
213     order = {bs: {s: [] for s in SLICE_LIST} for bs in BS_LIST
}
214     for nm, bs in mapping.items():
215         cat = user_category(nm)
216         order[bs][cat].append(nm)

```

```

217     for bs in BS_LIST:
218         for s in SLICE_LIST:
219             order[bs][s].sort(key=sort_key)
220
221     sum_U = sum_E = sum_M = 0.0
222     had_m_users = set()
223     success_m_users = set()
224
225     t1 = min(t0 + WINDOW_MS, TOTAL_MS)
226     for t in range(t0, t1):
227         # 到达
228         for nm in states.keys():
229             arr_series = env.arrivals.get(nm, [])
230             if t < len(arr_series):
231                 vol = arr_series[t]
232                 if vol > 0.0:
233                     states[nm].queue.append(Chunk(arrival_ms=t
, size_mbit=vol, remain_mbit=vol))
234                     if states[nm].category == 'M':
235                         had_m_users.add(nm)
236
237         # 填充并发槽位
238         for bs in BS_LIST:
239             for s in SLICE_LIST:
240                 active[bs][s] = [u for u in active[bs][s] if
states[u].has_backlog()]
241                 while len(active[bs][s]) < cap[bs][s]:
242                     for cand in order[bs][s]:
243                         if cand in active[bs][s]:
244                             continue
245                         if states[cand].has_backlog():
246                             active[bs][s].append(cand)
247                             break
248                     else:
249                         break

```

```

250
251     # 服务
252     for bs in BS_LIST:
253         for s in SLICE_LIST:
254             if len(active[bs][s]) == 0:
255                 continue
256             active_sbs_same_slice = [b for b in SBS_ONLY
257 if len(active[b][s]) > 0]
258             for u in list(active[bs][s]):
259                 rate_bps = user_rate_bps(env, bs, u, s,
260 power_alloc, active_sbs_same_slice, t)
261                 served_mbit = (rate_bps * 0.001) / 1e6
262                 head = states[u].queue[0]
263                 if head.start_ms is None:
264                     head.start_ms = t
265                 head.remain_mbit -= served_mbit
266                 if head.remain_mbit <= 1e-12:
267                     head.remain_mbit = 0.0
268                     head.finish_ms = t + 1
269                     states[u].queue.popleft()
270                     # QoS统计
271                     L_ms = (head.finish_ms - head.
272 arrival_ms)
273                     if s == 'U':
274                         sum_U += ALPHA ** L_ms if L_ms <=
275 SLA_L_MS['U'] else -M_U
276                     elif s == 'E':
277                         r_mbps = (head.size_mbit * 1000.0)
278 / max(L_ms, 1e-12)
279                     if L_ms <= SLA_L_MS['E'] and
280 r_mbps >= SLA_R_E_MBPS:
281                         sum_E += 1.0
282                     elif L_ms <= SLA_L_MS['E']:
283                         sum_E += max(0.0, r_mbps /
284 SLA_R_E_MBPS)

```

```

278         else:
279             sum_E += -M_E
280     else:
281         if L_ms <= SLA_L_MS['M']:
282             success_m_users.add(u)
283
284     # mMTC评分
285     if len(had_m_users) > 0:
286         ratio = len(success_m_users) / len(had_m_users)
287         for u in had_m_users:
288             sum_M += ratio if u in success_m_users else -M_M
289
290     obj = sum_U + sum_E + sum_M
291     result = type('SimResult', (), {'sum_U': sum_U, 'sum_E':
sum_E, 'sum_M': sum_M, 'obj': obj})()
292     return states, result
293
294 def nearest_sbs_per_user(env: Env, users: List[str], t_ms: int
) -> Dict[str, str]:
295     """计算每个用户的最近SBS"""
296     out = {}
297     for u in users:
298         x, y = env.user_xy(u, t_ms)
299         best_bs = None
300         best_d2 = 1e99
301         for sbs in SBS_ONLY:
302             bx, by = BS_COORD[sbs]
303             d2 = (x - bx) ** 2 + (y - by) ** 2
304             if d2 < best_d2:
305                 best_d2 = d2
306                 best_bs = sbs
307         out[u] = best_bs or "SBS_1"
308     return out
309
310 # 遗传算法实现

```

```

311 def random_individual(num_users: int):
312     """生成随机个体：用户选择(0=MBS,1=nearest SBS) + RB分配 +
    功率"""
313     user_choice = np.random.randint(0, 2, size=num_users,
    dtype=np.int8)
314     rb_counts = np.zeros(2 * len(BS_LIST), dtype=np.int16)
315     idx = 0
316     for bs in BS_LIST:
317         total = RB_TOTAL[bs]
318         u_units_max = total // RB_PER_SLICE['U']
319         u_units = np.random.randint(0, u_units_max + 1)
320         u_rb = int(u_units * RB_PER_SLICE['U'])
321         e_units_max = (total - u_rb) // RB_PER_SLICE['E']
322         e_units = np.random.randint(0, e_units_max + 1)
323         e_rb = int(e_units * RB_PER_SLICE['E'])
324         rb_counts[idx] = u_rb
325         rb_counts[idx + 1] = e_rb
326         idx += 2
327     power = np.random.uniform(20.0, 30.0, size=3 * len(BS_LIST
    )).astype(np.float32)
328     return [user_choice, rb_counts, power]
329
330 def decode_rb(rb_counts: np.ndarray) -> Dict[str, Dict[str,
    int]]:
331     """解码RB分配"""
332     out = {}
333     idx = 0
334     for bs in BS_LIST:
335         total = RB_TOTAL[bs]
336         u_req = int(rb_counts[idx])
337         e_req = int(rb_counts[idx + 1])
338         idx += 2
339         u_rb = max(0, min(total, (u_req // RB_PER_SLICE['U'])
    * RB_PER_SLICE['U']))
340         e_rb = max(0, min(total - u_rb, (e_req // RB_PER_SLICE

```



```

    ['E']) * RB_PER_SLICE['E']))
341     if u_rb + e_rb > total:
342         e_rb = max(0, (total - u_rb) // RB_PER_SLICE['E']
    * RB_PER_SLICE['E'])
343     m_rb = total - (u_rb + e_rb)
344     if m_rb % RB_PER_SLICE['M'] != 0:
345         if e_rb >= RB_PER_SLICE['E']:
346             e_rb -= RB_PER_SLICE['E']
347         elif e_rb + RB_PER_SLICE['E'] <= total - u_rb:
348             e_rb += RB_PER_SLICE['E']
349         elif u_rb >= RB_PER_SLICE['U']:
350             u_rb -= RB_PER_SLICE['U']
351     m_rb = total - (u_rb + e_rb)
352     if m_rb % RB_PER_SLICE['M'] != 0 and u_rb >=
RB_PER_SLICE['U']:
353         u_rb -= RB_PER_SLICE['U']
354         m_rb = total - (u_rb + e_rb)
355     out[bs] = {"U": u_rb, "E": e_rb, "M": m_rb}
356     return out
357
358 def decode_power(power_arr: np.ndarray) -> Dict[str, Dict[str,
float]]:
359     """解码功率分配"""
360     out = {}
361     idx = 0
362     for bs in BS_LIST:
363         sub = {}
364         for s in SLICE_LIST:
365             p = float(power_arr[idx])
366             p = max(P_MIN_DBM[bs], min(P_MAX_DBM[bs], p))
367             sub[s] = p
368             idx += 1
369         out[bs] = sub
370     return out
371

```

```

372 def evaluate_individual(indiv, env: Env, users: List[str],
    user_states: Dict[str, UserState], t0: int, nearest_sbs_map:
    Dict[str, str]) -> float:
373     """评价个体适应度"""
374     user_choice, rb_counts, power_arr = indiv
375     rb_alloc = decode_rb(rb_counts)
376     power_alloc = decode_power(power_arr)
377     mapping = {users[i]: ("MBS_1" if int(user_choice[i]) == 0
else nearest_sbs_map[users[i]]) for i in range(len(users))}
378     _, res = simulate_window(env, user_states, mapping,
rb_alloc, power_alloc, t0, copy_state=True)
379     return res.obj
380
381 def tournament_select(pop_scores: List[float]) -> int:
382     """锦标赛选择"""
383     cand = random.sample(range(len(pop_scores)), TOURN_K)
384     cand.sort(key=lambda idx: pop_scores[idx], reverse=True)
385     return cand[0]
386
387 def crossover(parent1, parent2):
388     """交叉操作"""
389     if random.random() > CROSS_RATE:
390         return parent1, parent2
391     u1, rb1, p1 = parent1
392     u2, rb2, p2 = parent2
393     num_users = len(u1)
394     if num_users >= 2:
395         pt = random.randint(1, num_users - 1)
396         child_u1 = np.concatenate([u1[:pt], u2[pt:]]).astype(
np.int8)
397         child_u2 = np.concatenate([u2[:pt], u1[pt:]]).astype(
np.int8)
398     else:
399         child_u1 = u1.copy()
400         child_u2 = u2.copy()

```

```

401     child_rb1 = ((rb1.astype(np.float32) + rb2) / 2.0).astype(
np.int16)
402     child_rb2 = child_rb1.copy()
403     child_p1 = (p1 + p2) / 2.0
404     child_p2 = child_p1.copy()
405     return [child_u1, child_rb1, child_p1], [child_u2,
child_rb2, child_p2]
406
407 def mutate(indiv):
408     """变异操作"""
409     user_choice, rb_counts, power_arr = indiv
410     num_users = len(user_choice)
411     # 接入变异
412     for i in range(num_users):
413         if random.random() < MUTATE_RATE:
414             user_choice[i] = 1 - int(user_choice[i])
415     # RB变异
416     for b in range(len(BS_LIST)):
417         iu = 2 * b
418         ie = iu + 1
419         total = RB_TOTAL[BS_LIST[b]]
420         if random.random() < MUTATE_RATE:
421             u_units_max = total // RB_PER_SLICE['U']
422             u_units = np.random.randint(0, u_units_max + 1)
423             rb_counts[iu] = int(u_units * RB_PER_SLICE['U'])
424         if random.random() < MUTATE_RATE:
425             u_rb = int(rb_counts[iu])
426             e_units_max = (total - u_rb) // RB_PER_SLICE['E']
427             e_units = np.random.randint(0, e_units_max + 1)
428             rb_counts[ie] = int(e_units * RB_PER_SLICE['E'])
429     # 功率高斯扰动
430     for i in range(len(power_arr)):
431         if random.random() < MUTATE_RATE:
432             power_arr[i] += np.random.normal(0.0, 1.0)
433

```

```

434 def main():
435     """附录精简：第四问省略与第二问相同的MPC滚动仿真，仅保留关键函数/接口。"""
436     print("[附录] 问题四：已省略MPC滚动仿真与完整GA循环，仅保留核心组件与接口。")
437
438 if __name__ == "__main__":
439     main()

```

q5.py

```

1  #!/usr/bin/env python3
2  # -*- coding: utf-8 -*-
3  """问题五：能耗优化GA-MPC求解器（二阶段：功率优先+RB枚举）"""
4
5  import csv
6  import math
7  import os
8  import random
9  from dataclasses import dataclass
10 from typing import Dict, List, Tuple
11 import numpy as np
12 from collections import deque
13 from copy import deepcopy
14
15 # 路径和常量配置
16 SCRIPT_DIR = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
17 ROOT_DIR = os.path.abspath(os.path.join(SCRIPT_DIR, "..", ".."))
18 ATTACH4_DIR = os.path.join(ROOT_DIR, "题目", "附件", "附件4")
19
20 B_HZ = 360_000.0
21 NF_DB = 7.0
22 RB_PER_SLICE = {"U": 10, "E": 5, "M": 2}
23 SLICE_LIST = ["U", "E", "M"]
24 BS_LIST = ["MBS_1", "SBS_1", "SBS_2", "SBS_3"]

```

```

25 SBS_ONLY = [bs for bs in BS_LIST if bs.startswith("SBS_")]
26 RB_TOTAL = {"MBS_1": 100, "SBS_1": 50, "SBS_2": 50, "SBS_3":
    50}
27 P_MIN_DBM = {"MBS_1": 10.0, "SBS_1": 10.0, "SBS_2": 10.0, "
    SBS_3": 10.0}
28 P_MAX_DBM = {"MBS_1": 40.0, "SBS_1": 30.0, "SBS_2": 30.0, "
    SBS_3": 30.0}
29
30 ALPHA, M_U, M_E, M_M = 0.95, 5.0, 3.0, 1.0
31 SLA_L_MS = {"U": 5.0, "E": 100.0, "M": 500.0}
32 SLA_R_E_MBPS = 50.0
33 WINDOW_MS, TOTAL_MS = 100, 1000
34
35 # 能耗模型参数
36 P_STATIC_W = 28.0
37 DELTA_W_PER_RB = 0.75
38 ETA = 0.35
39
40 # GA参数（阶段一功率优化，适度精简）
41 POP_SIZE, MAX_GEN = 16, 120
42 TOURN_K, CROSS_RATE, MUTATE_RATE, ELITE_NUM = 3, 0.8, 0.3, 5
43
44 @dataclass
45 class Env:
46     time_list: List[float]
47     arrivals: Dict[str, List[float]]
48     phi: Dict[str, Dict[str, List[float]]]
49     h_abs: Dict[str, Dict[str, List[float]]]
50     pos_x: Dict[str, List[float]]
51     pos_y: Dict[str, List[float]]
52
53     def phi_db(self, bs: str, user: str, t: int) -> float:
54         arr = self.phi.get(bs, {}).get(user)
55         if arr is None or len(arr) == 0:
56             return 120.0

```

```

57         idx = min(max(t, 0), len(arr) - 1)
58         return float(arr[idx])
59
60     def h_pow(self, bs: str, user: str, t: int) -> float:
61         arr = self.h_abs.get(bs, {}).get(user)
62         if arr is None or len(arr) == 0:
63             return 1.0
64         idx = min(max(t, 0), len(arr) - 1)
65         val = float(arr[idx])
66         return val * val if val >= 0 else 0.0
67
68     def user_xy(self, user: str, t: int) -> Tuple[float, float
69 ]:
70         xs = self.pos_x.get(f"{user}_X") or self.pos_x.get(f"{
71 user}_X") or self.pos_x.get(user)
72         ys = self.pos_y.get(f"{user}_Y") or self.pos_y.get(f"{
73 user}_Y") or self.pos_y.get(user)
74         if not xs or not ys:
75             return 0.0, 0.0
76         idx = min(max(t, 0), min(len(xs), len(ys)) - 1)
77         return float(xs[idx]), float(ys[idx])
78
79 @dataclass
80 class Chunk:
81     arrival_ms: int
82     size_mbit: float
83     remain_mbit: float
84     start_ms: int | None = None
85     finish_ms: int | None = None
86
87 @dataclass
88 class UserState:
89     name: str
90     category: str
91     queue: deque[Chunk]

```

```

89
90     def has_backlog(self) -> bool:
91         return len(self.queue) > 0 and self.queue[0].
remain_mbit > 1e-12
92
93 def load_time_series_csv(path: str) -> Tuple[List[float], Dict
[str, List[float]]]:
94     """读取时间序列CSV"""
95     time_list = []
96     series = {}
97     with open(path, "r", encoding="utf-8-sig") as f:
98         reader = csv.DictReader(f)
99         for row in reader:
100             t_val_str = row.get("Time", row.get("time", row.
get("TIME")))
101             if t_val_str is None:
102                 continue
103             try:
104                 t_val = float(t_val_str)
105             except ValueError:
106                 continue
107             time_list.append(t_val)
108             for key, val in row.items():
109                 k = key.strip()
110                 if k.lower() == "time":
111                     continue
112                 if val is None or val == "":
113                     series.setdefault(k, []).append(0.0)
114                     continue
115                 try:
116                     v = float(val)
117                 except ValueError:
118                     v = 0.0
119                 series.setdefault(k, []).append(v)
120     max_len = len(time_list)

```

```

121     for arr in series.values():
122         if len(arr) < max_len:
123             arr.extend([0.0] * (max_len - len(arr)))
124     return time_list, series
125
126 def build_env() -> Tuple[Env, List[str]]:
127     """构建环境"""
128     time_list, arrivals = load_time_series_csv(os.path.join(
ATTACH4_DIR, "taskflow_用户任务流.csv"))
129     phi = {}
130     h_abs = {}
131
132     CSV_PL = {
133         "MBS_1": os.path.join(ATTACH4_DIR, "MBS_1_大规模衰减.
csv"),
134         "SBS_1": os.path.join(ATTACH4_DIR, "SBS_1_大规模衰减.
csv"),
135         "SBS_2": os.path.join(ATTACH4_DIR, "SBS_2_大规模衰减.
csv"),
136         "SBS_3": os.path.join(ATTACH4_DIR, "SBS_3_小规模瑞丽衰
减.csv"),
137     }
138     CSV_RAY = {
139         "MBS_1": os.path.join(ATTACH4_DIR, "MBS_1_小规模瑞丽衰
减.csv"),
140         "SBS_1": os.path.join(ATTACH4_DIR, "SBS_1_小规模瑞丽衰
减.csv"),
141         "SBS_2": os.path.join(ATTACH4_DIR, "SBS_2_小规模瑞丽衰
减.csv"),
142         "SBS_3": os.path.join(ATTACH4_DIR, "SBS_3_小规模瑞丽衰
减.csv"),
143     }
144
145     for bs in BS_LIST:
146         _, phi_bs = load_time_series_csv(CSV_PL[bs])

```



```

147         _, ray_bs = load_time_series_csv(CSV_RAY[bs])
148         phi[bs] = phi_bs
149         h_abs[bs] = ray_bs
150
151         _, pos_series = load_time_series_csv(os.path.join(
ATTACH4_DIR, "taskflow_用户位置.csv"))
152         pos_x = {}
153         pos_y = {}
154         for key, arr in pos_series.items():
155             if key.endswith("_X"):
156                 pos_x[key] = arr
157             elif key.endswith("_Y"):
158                 pos_y[key] = arr
159
160         users = sorted(arrivals.keys(), key=lambda x: (x[0], int(x
[1:])) if x[1:].isdigit() else 0))
161         return Env(time_list=time_list, arrivals=arrivals, phi=phi
, h_abs=h_abs, pos_x=pos_x, pos_y=pos_y), users
162
163 def user_category(name: str) -> str:
164     """确定用户类别"""
165     if name.startswith("U"):
166         return "U"
167     if name.startswith("e"):
168         return "E"
169     return "M"
170
171 def user_rate_bps(env: Env, bs: str, name: str, cat: str,
power_alloc: Dict[str, Dict[str, float]],
active_sbs_same_slice: List[str], t_ms: int) -> float:
172     """计算下行速率"""
173     p_tx_mw = 10 ** (power_alloc[bs][cat] / 10.0)
174     phi_db = env.phi_db(bs, name, t_ms)
175     h_pow = env.h_pow(bs, name, t_ms)
176     recv_mw = p_tx_mw * 10 ** (-phi_db / 10.0) * h_pow

```

```

177
178     interf_mw = 0.0
179     if bs in SBS_ONLY:
180         for b2 in active_sbs_same_slice:
181             if b2 == bs:
182                 continue
183             p_int_mw = 10 ** (power_alloc[b2][cat] / 10.0)
184             phi_db_i = env.phi_db(b2, name, t_ms)
185             h_pow_i = env.h_pow(b2, name, t_ms)
186             interf_mw += p_int_mw * 10 ** (-phi_db_i / 10.0) *
h_pow_i
187
188     n0_mw = 10 ** ((-174.0 + 10.0 * math.log10(RB_PER_SLICE[
cat] * B_HZ) + NF_DB) / 10.0)
189     sinr = recv_mw / (interf_mw + n0_mw + 1e-30)
190     return RB_PER_SLICE[cat] * B_HZ * math.log2(1.0 + sinr)
191
192 def simulate_window(env: Env, init_states: Dict[str, UserState
], mapping: Dict[str, str], rb_alloc: Dict[str, Dict[str,
int]], power_alloc: Dict[str, Dict[str, float]], t0: int,
copy_state: bool = True):
193     """带能耗计算的窗口仿真"""
194     states = {}
195     if copy_state:
196         for name, st in init_states.items():
197             states[name] = UserState(name=st.name, category=st
.category, queue=deque(deepcopy(list(st.queue))))
198     else:
199         states = init_states
200
201     cap = {bs: {s: rb_alloc[bs][s] // RB_PER_SLICE[s] for s in
SLICE_LIST} for bs in BS_LIST}
202     active = {bs: {s: [] for s in SLICE_LIST} for bs in
BS_LIST}
203

```

```

204     def sort_key(u: str):
205         return (u[0], int(u[1:]) if u[1:].isdigit() else 0)
206
207     order = {bs: {s: [] for s in SLICE_LIST} for bs in BS_LIST
208 }
209     for nm, bs in mapping.items():
210         cat = user_category(nm)
211         order[bs][cat].append(nm)
212     for bs in BS_LIST:
213         for s in SLICE_LIST:
214             order[bs][s].sort(key=sort_key)
215
216     sum_U = sum_E = sum_M = energy_J = 0.0
217     had_m_users = set()
218     success_m_users = set()
219
220     t1 = min(t0 + WINDOW_MS, TOTAL_MS)
221     for t in range(t0, t1):
222         # 到达
223         for nm in states.keys():
224             arr_series = env.arrivals.get(nm, [])
225             if t < len(arr_series):
226                 vol = arr_series[t]
227                 if vol > 0.0:
228                     states[nm].queue.append(Chunk(arrival_ms=t
229 , size_mbit=vol, remain_mbit=vol))
230
231                     if states[nm].category == 'M':
232                         had_m_users.add(nm)
233
234         # 填充并发槽位
235         for bs in BS_LIST:
236             for s in SLICE_LIST:
237                 active[bs][s] = [u for u in active[bs][s] if
238 states[u].has_backlog()]
239                 while len(active[bs][s]) < cap[bs][s]:

```

```

236         for cand in order[bs][s]:
237             if cand in active[bs][s]:
238                 continue
239             if states[cand].has_backlog():
240                 active[bs][s].append(cand)
241                 break
242         else:
243             break
244
245     # 服务
246     for bs in BS_LIST:
247         for s in SLICE_LIST:
248             if len(active[bs][s]) == 0:
249                 continue
250             active_sbs_same_slice = [b for b in SBS_ONLY
if len(active[b][s]) > 0]
251             for u in list(active[bs][s]):
252                 rate_bps = user_rate_bps(env, bs, u, s,
power_alloc, active_sbs_same_slice, t)
253                 served_mbit = (rate_bps * 0.001) / 1e6
254                 head = states[u].queue[0]
255                 if head.start_ms is None:
256                     head.start_ms = t
257                 head.remain_mbit -= served_mbit
258                 if head.remain_mbit <= 1e-12:
259                     head.remain_mbit = 0.0
260                     head.finish_ms = t + 1
261                     states[u].queue.popleft()
262                     L_ms = (head.finish_ms - head.
arrival_ms)
263                     if s == 'U':
264                         sum_U += ALPHA ** L_ms if L_ms <=
SLA_L_MS['U'] else -M_U
265                     elif s == 'E':
266                         r_mbps = (head.size_mbit * 1000.0)

```

```

/ max(L_ms, 1e-12)
267         if L_ms <= SLA_L_MS['E'] and
r_mbps >= SLA_R_E_MBPS:
268             sum_E += 1.0
269             elif L_ms <= SLA_L_MS['E']:
270                 sum_E += max(0.0, r_mbps /
SLA_R_E_MBPS)
271             else:
272                 sum_E += -M_E
273             else:
274                 if L_ms <= SLA_L_MS['M']:
275                     success_m_users.add(u)
276
277     # 能耗累计
278     p_total_w_all_bs = 0.0
279     for bs in BS_LIST:
280         n_active_rb = 0
281         p_tx_w_bs = 0.0
282         for s in SLICE_LIST:
283             n_users_act = len(active[bs][s])
284             n_active_rb += n_users_act * RB_PER_SLICE[s]
285             p_tx_w_bs += n_users_act * (10 ** (power_alloc
[bs][s] / 10.0) / 1000.0) # mW to W
286             p_bs = P_STATIC_W + DELTA_W_PER_RB * n_active_rb +
(1.0 / ETA) * p_tx_w_bs
287             p_total_w_all_bs += p_bs
288             energy_J += p_total_w_all_bs * 0.001 # 1 ms
289
290     # mMTC评分
291     if len(had_m_users) > 0:
292         ratio = len(success_m_users) / len(had_m_users)
293         for u in had_m_users:
294             sum_M += ratio if u in success_m_users else -M_M
295
296     obj = sum_U + sum_E + sum_M

```

```

297     result = type('SimResult', ()), {'sum_U': sum_U, 'sum_E':
sum_E, 'sum_M': sum_M, 'obj': obj, 'energy_J': energy_J})()
298     return states, result
299
300 def nearest_sbs_per_user(env: Env, users: List[str], t_ms: int
) -> Dict[str, str]:
301     """计算最近SBS"""
302     BS_COORD = {
303         "SBS_1": (0.0, 500.0),
304         "SBS_2": (-433.0127, -250.0),
305         "SBS_3": (433.0127, -250.0),
306     }
307     out = {}
308     for u in users:
309         x, y = env.user_xy(u, t_ms)
310         best_bs = None
311         best_d2 = 1e99
312         for sbs in ["SBS_1", "SBS_2", "SBS_3"]:
313             bx, by = BS_COORD[sbs]
314             d2 = (x - bx) ** 2 + (y - by) ** 2
315             if d2 < best_d2:
316                 best_d2 = d2
317                 best_bs = sbs
318         out[u] = best_bs or "SBS_1"
319     return out
320
321 # 阶段一：功率优化GA
322 def random_individual(num_users: int):
323     """阶段一个体：仅编码功率"""
324     power = np.random.uniform(20.0, 30.0, size=3 * len(BS_LIST
)).astype(np.float32)
325     return [power]
326
327 def make_equal_rb_alloc() -> Dict[str, Dict[str, int]]:
328     """生成均衡RB分配"""

```

```

329     out = {}
330     for bs in BS_LIST:
331         remain = RB_TOTAL[bs]
332         x = {"U": 0, "E": 0, "M": 0}
333         order = ["U", "E", "M"]
334         idx = 0
335         while remain >= 2:
336             s = order[idx % 3]
337             need = RB_PER_SLICE[s]
338             if remain >= need:
339                 x[s] += need
340                 remain -= need
341             idx += 1
342         out[bs] = x
343     return out
344
345 def decode_power(power_arr: np.ndarray) -> Dict[str, Dict[str,
346 float]]:
347     """解码功率分配"""
348     out = {}
349     idx = 0
350     for bs in BS_LIST:
351         sub = {}
352         for s in SLICE_LIST:
353             p = float(power_arr[idx])
354             p = max(P_MIN_DBM[bs], min(P_MAX_DBM[bs], p))
355             sub[s] = p
356             idx += 1
357         out[bs] = sub
358     return out
359
360 def evaluate_power_individual(indiv, env: Env, users: List[str
361 ], user_states: Dict[str, UserState], t0: int, nearest_map:
362 Dict[str, str]) -> Tuple[float, float, float]:
363     """阶段一评价：以能耗最小为目标"""

```

```

361     power_arr = indiv[0]
362     power_alloc = decode_power(power_arr)
363     rb_alloc = make_equal_rb_alloc()
364     mapping = {u: ("MBS_1" if nearest_map.get(u) is None else
nearest_map[u]) for u in users}
365     _, res = simulate_window(env, user_states, mapping,
rb_alloc, power_alloc, t0, copy_state=True)
366     fitness = -res.energy_J # 最小化能耗
367     return fitness, res.obj, res.energy_J
368
369 def tournament_select(pop_scores: List[float]) -> int:
370     cand = random.sample(range(len(pop_scores)), TOURN_K)
371     cand.sort(key=lambda idx: pop_scores[idx], reverse=True)
372     return cand[0]
373
374 def crossover(parent1, parent2):
375     if random.random() > CROSS_RATE:
376         return parent1, parent2
377     p1 = parent1[0]
378     p2 = parent2[0]
379     child_p = (p1 + p2) / 2.0
380     return [child_p.copy()], [child_p.copy()]
381
382 def mutate(indiv):
383     power_arr = indiv[0]
384     for i in range(len(power_arr)):
385         if random.random() < MUTATE_RATE:
386             power_arr[i] += np.random.normal(0.0, 1.0)
387
388 # 阶段二：RB枚举优化
389 def gen_splits_for_total(total: int) -> List[Tuple[int, int,
int]]:
390     """生成合法的(U,E,M) RB分配"""
391     splits = []
392     for nU in range(0, total + 1, RB_PER_SLICE['U']):

```



```

393         for nE in range(0, total - nU + 1, RB_PER_SLICE['E']):
394             nM = total - nU - nE
395             if nM >= 0 and nM % RB_PER_SLICE['M'] == 0:
396                 splits.append((nU, nE, nM))
397     return splits
398
399 def coordinate_enumeration_rb(env: Env, users: List[str],
    user_states: Dict[str, UserState], mapping: Dict[str, str],
    power_alloc: Dict[str, Dict[str, float]], t0: int, rounds:
    int = 2) -> Dict[str, Dict[str, int]]:
400     """坐标枚举RB分配"""
401     rb_alloc = make_equal_rb_alloc()
402     bs_splits = {bs: gen_splits_for_total(RB_TOTAL[bs]) for bs
    in BS_LIST}
403
404     for _ in range(rounds):
405         for bs in BS_LIST:
406             best_obj = -1e30
407             best_split = rb_alloc[bs]['U'], rb_alloc[bs]['E'],
    rb_alloc[bs]['M']
408             for (nU, nE, nM) in bs_splits[bs]:
409                 rb_alloc[bs]['U'] = nU
410                 rb_alloc[bs]['E'] = nE
411                 rb_alloc[bs]['M'] = nM
412                 _, res = simulate_window(env, user_states,
    mapping, rb_alloc, power_alloc, t0, copy_state=True)
413                 if res.obj > best_obj:
414                     best_obj = res.obj
415                     best_split = (nU, nE, nM)
416             rb_alloc[bs]['U'], rb_alloc[bs]['E'], rb_alloc[bs]
    ['M'] = best_split
417     return rb_alloc
418
419 def main():
420     """附录精简：第五问省略与第二问相同的MPC/仿真循环与二阶段

```

```

421     细节，仅保留核心函数与接口。"""
422     print("[附录] 问题五：已省略MPC滚动仿真与二阶段完整流程，
423           仅保留能耗模型/评价与接口。")
424 if __name__ == "__main__":
    main()

```

## 附录 C 求解结果

### 3.1 问题一：单基站枚举结果

表 6 问题一最优 **RB** 分配方案

$R_U$	$R_E$	$R_M$	URLLC 得分	eMBB 得分	mMTC 得分	目标函数
10	10	30	1.98	3.80	10.00	15.77
10	20	20	1.98	3.80	10.00	15.77
10	30	10	1.98	3.80	10.00	15.77
20	10	20	1.99	3.80	10.00	15.78
20	20	10	1.99	3.80	10.00	15.78
30	10	10	1.99	3.80	10.00	15.78

3.2 问题二：单微基站 MPC 滚动窗口最优决策

表 7 问题二各窗口最优 RB 分配决策

窗口	$R_U$	$R_E$	$R_M$	URLLC 得分	eMBB 得分	mMTC 得分	目标函数
0	10	20	20	22.75	32.74	10.00	65.49
1	10	20	20	21.71	8.32	10.00	40.03
2	10	20	20	23.61	5.23	10.00	38.83
3	10	0	40	22.80	0.00	10.00	32.80
4	40	0	10	21.85	0.00	10.00	31.85
5	40	0	10	14.25	0.00	4.40	18.65
6	40	0	10	17.10	0.00	7.10	24.20
7	40	0	10	22.80	0.00	7.10	29.90
8	40	0	10	21.85	0.00	10.00	31.85
9	40	0	10	17.10	0.00	7.10	24.20
累计目标函数				337.42			

3.3 问题三：多基站 GA-MPC 优化结果

表 8 问题三各窗口多基站资源分配结果

窗口	BS1-RB 分配	BS1-功率 (dBm)	BS2-RB 分配	BS2-功率 (dBm)	BS3-RB 分配	BS3-功率 (dBm)	URLLC	eMBB	mMTC	目标
0	(0,40,10)	(24.4,22.8,24.8)	(20,0,30)	(21.6,22.9,23.4)	(20,0,30)	(21.6,22.9,21.7)	38.16	8.40	30.00	76.56
1	(10,0,40)	(21.1,21.0,25.6)	(10,20,20)	(20.2,24.2,20.9)	(20,20,10)	(21.7,24.3,23.2)	51.03	6.81	30.00	87.84
2	(10,0,40)	(21.9,20.1,25.1)	(0,40,10)	(18.9,25.4,22.7)	(20,0,30)	(20.5,24.8,21.0)	38.35	9.87	30.00	78.22
3	(30,0,20)	(19.9,22.5,18.0)	(20,0,30)	(20.4,20.3,22.4)	(0,30,20)	(19.4,23.7,20.2)	49.26	7.79	30.00	87.05
4	(10,20,20)	(23.2,26.2,24.0)	(30,0,20)	(21.6,20.7,21.6)	(10,0,40)	(20.5,21.8,22.2)	46.43	5.90	30.00	82.33
5	(0,30,20)	(19.2,24.1,21.4)	(20,0,30)	(21.3,21.3,20.2)	(30,0,20)	(22.4,21.3,22.8)	52.02	7.28	30.00	89.30
6	(10,0,40)	(21.9,21.3,20.6)	(10,0,40)	(22.5,21.5,22.7)	(20,20,10)	(21.3,25.5,21.0)	52.08	6.25	30.00	88.33
7	(10,0,40)	(21.6,22.9,22.0)	(10,20,20)	(19.2,26.2,17.5)	(20,0,30)	(24.7,21.5,20.6)	48.68	6.40	30.00	85.08
8	(20,0,30)	(22.5,18.6,22.9)	(20,0,30)	(18.7,17.9,23.3)	(10,20,20)	(22.3,29.8,23.0)	51.45	7.59	30.00	89.04
9	(0,30,20)	(21.4,27.3,22.7)	(30,0,20)	(24.5,22.0,20.7)	(10,0,40)	(21.6,23.2,21.1)	56.80	7.88	30.00	94.69
累计目标函数							853.37			

3.4 问题四：异构网络 GA-MPC 优化结果

表 9 问题四异构网络前 5 窗口资源分配结果

窗口	MBS_1-RB 分配	MBS_1-功率 (dBm)	SBS_1-RB 分配	SBS_2-RB 分配	SBS_3-RB 分配	URLLC	eMBB	目标
0	(30,40,30)	(25.1,23.8,24.6)	(20,20,10)	(20,0,30)	(20,0,30)	93.42	14.26	147.68
1	(30,0,70)	(25.7,25.2,26.9)	(0,0,50)	(30,0,20)	(10,0,40)	85.68	0.00	125.68
2	(50,0,50)	(25.8,24.1,22.9)	(0,0,50)	(0,0,50)	(10,0,40)	64.61	0.00	104.61
3	(0,0,100)	(22.5,22.7,23.3)	(30,0,20)	(30,0,20)	(20,0,30)	50.85	0.00	90.85
4	(0,0,100)	(24.9,24.8,27.8)	(0,0,50)	(30,0,20)	(20,0,30)	43.16	0.00	83.16
5	(0,0,100)	(21.2,26.5,25.9)	(30,0,20)	(30,0,20)	(30,0,20)	50.27	0.00	90.27
6	(0,0,100)	(22.0,29.6,22.4)	(20,0,30)	(30,0,20)	(20,0,30)	47.51	0.00	87.51
7	(0,0,100)	(27.4,24.9,29.0)	(20,0,30)	(30,0,20)	(30,0,20)	48.32	0.00	82.42
8	(0,0,100)	(23.2,22.8,26.9)	(10,0,40)	(20,0,30)	(0,0,50)	19.48	0.00	29.50
9	(0,0,100)	(22.3,23.9,29.8)	(30,0,20)	(50,0,0)	(0,0,50)	11.74	0.00	-7.64
累计目标函数						1041.28		

3.5 问题五：能耗优化 GA-MPC 结果

表 10 问题五能耗优化结果（前 5 窗口）

窗口	MBS_1-RB	SBS_1-RB	SBS_2-RB	SBS_3-RB	URLLC	eMBB	mMTC	目标	能耗 (J)
0	(0,0,100)	(10,10,30)	(30,0,20)	(0,10,40)	54.25	1.50	40.00	95.75	19.68
1	(0,0,100)	(0,0,50)	(30,0,20)	(0,0,50)	35.11	0.00	37.03	72.13	18.10
2	(0,0,100)	(0,0,50)	(30,0,20)	(0,0,50)	3.34	0.00	37.03	40.37	18.12
3	(0,0,100)	(0,0,50)	(20,0,30)	(0,0,50)	52.88	0.00	40.00	92.88	18.25
4	(0,0,100)	(0,0,50)	(30,0,20)	(0,0,50)	24.74	0.00	37.03	61.77	17.97
5	(0,0,100)	(0,0,50)	(30,0,20)	(0,0,50)	46.51	0.00	37.03	83.54	18.10
6	(0,0,100)	(0,10,40)	(30,10,10)	(0,10,40)	47.89	-42.00	7.60	13.49	19.48
7	(0,0,100)	(0,0,50)	(30,0,20)	(0,0,50)	36.74	0.00	-33.10	3.64	18.09
8	(0,0,100)	(0,0,50)	(30,0,20)	(0,0,50)	28.47	0.00	-40.00	-11.53	17.84
9	(0,0,100)	(0,0,50)	(30,0,20)	(0,0,50)	16.55	0.00	-40.00	-23.45	18.05
累计目标函数					381.17		总能耗:183.68J		