

全国大学生数学建模竞赛论文模板

摘要

摘要

对于问题一,

对于问题二,

对于问题三,

对于问题四,

最后,

关键字: 关键词 关键词 关键词 关键词 关键词

目录

1	问题重述	4
1.1	问题背景	4
1.2	问题要求	4
1.3	我们的工作	4
2	模型假设	4
3	符号说明	4
4	问题一的模型的建立和求解	5
4.1	问题一的描述与分析	5
4.2	预备工作	5
4.3	模型建立	5
4.3.1	传输速率计算	5
4.3.2	服务质量评估函数	6
4.3.3	优化模型	7
4.4	模型求解	7
4.5	求解结果	8
5	问题二的模型的建立和求解	9
5.1	问题二的描述与分析	9
5.2	预备工作	9
5.3	模型建立	9
5.4	模型求解	9
5.5	求解结果	9
6	问题三的模型的建立和求解	9
6.1	问题三的描述与分析	9
6.2	预备工作	9
6.3	模型建立	9
6.4	模型求解	9
6.5	求解结果	9
7	模型的分析与检验	9
7.1	灵敏度分析	9

7.2 误差分析	9
8 模型的评价	9
8.1 模型的优点	9
8.2 模型的缺点	10
A 附录 文件列表	11
B 附录 代码	11

1 问题重述

1.1 问题背景

1.2 问题要求

问题 1

问题 2

问题 3

问题 4

1.3 我们的工作

2 模型假设

为简化问题，本文做出以下假设：

- 假设 1
- 假设 2
- 假设 3

3 符号说明

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

4 问题一的模型的建立和求解

4.1 问题一的描述与分析

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

4.2 预备工作

为便于复现与对比，本问采用如下统一的数据、参数与约定：

- 数据来源 (附件 1, 单时刻数据)：任务量 `q1_ 任务流.csv` (单位：Mbit)、大规模衰减 `q1_ 大规模衰减.csv` (单位：dB)、小规模瑞利衰减 `q1_ 小规模瑞利衰减.csv` (幅度 $|h|$)。按列名一一对应同名用户，忽略非数值列 (如 `Time`)。
- 系统与物理层参数：单小区、无同频干扰；发射功率 $p_{tx} = 30 \text{ dBm}$ ；单 RB 带宽 $b = 360 \text{ kHz}$ ；噪声系数 $NF = 7 \text{ dB}$ 。白噪声按如下公式计算：

$$N_0 (\text{dBm}) = -174 + 10 \log_{10}(ib) + NF \quad (1)$$

并换算为 mW。

- 资源占用粒度 (同表 1)：URLLC/eMBB/mMTC 用户并发占用 RB 数分别为 $v_U = 10$ 、 $v_e = 5$ 、 $v_m = 2$ 。为避免 RB 碎片化，约束切片 RB 分配满足 $n_U \bmod 10 = 0$ 、 $n_e \bmod 5 = 0$ 、 $n_m \bmod 2 = 0$ ，且 $n_U + n_e + n_m = 50$ 。
- SLA 与 QoS：URLLC 时延 SLA $L_U^{\text{SLA}} = 5 \text{ ms}$ 、折扣因子 $\alpha = 0.95$ 、惩罚 $M_U = 5$ ；eMBB 速率 SLA $r_e^{\text{SLA}} = 50 \text{ Mbps}$ 、时延 SLA $L_e^{\text{SLA}} = 100 \text{ ms}$ 、惩罚 $M_e = 3$ ；mMTC 时延 SLA $L_m^{\text{SLA}} = 500 \text{ ms}$ 、惩罚 $M_m = 1$ 。
- 排队与评估口径：同一决策下允许在切片内“编号靠前优先”的串并行调度，后到用户可在前序用户完成后接续占用 RB；URLLC/eMBB 以用户级 QoS 加和；mMTC 以满足 SLA 的接入比例计分 (当期存在任务的 mMTC 用户数作分母)。

4.3 模型建立

4.3.1 传输速率计算

根据附录中的信号传输模型，用户 k 获得 i_k 个资源块时的接收功率为：

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

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

考虑噪声功率的影响, 噪声功率谱密度为:

$$N_0 = -174 + 10 \log_{10}(i_k \cdot b) + 7 \quad (\text{dBm}) \quad (3)$$

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。

信干噪比 (SINR) 在无干扰情况下简化为信噪比 (SNR):

$$\gamma_k = \frac{p_{\text{rx},k}}{10^{\frac{N_0}{10}}} \quad (4)$$

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

根据香农公式, 用户 k 的传输速率为:

$$r_k = i_k \cdot b \cdot \log_2(1 + \gamma_k) \quad (\text{bps}) \quad (5)$$

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

4.3.2 服务质量评估函数

根据附录中的用户服务质量定义, 不同切片的 QoS 评估函数如下:

(1) U 切片 (URLLC)

用户 k 的传输时延为:

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

总时延为:

$$L_k^s = Q_k + T_k, \quad s \in \{U, e, m\} \quad (7)$$

其中, D_k 为任务数据量 (Mbit), Q_k 为排队时延, T_k 为传输时延。

服务质量函数为:

$$y_k^U = \begin{cases} \alpha^{L_k^U} & \text{若 } L_k^U \leq L_U^{\text{SLA}} \\ -M_U & \text{若 } L_k^U > L_U^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (8)$$

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

(2) e 切片 (eMBB)

e 切片用户采用三段式 QoS 函数：

$$y_k^e = \begin{cases} 1 & \text{若 } r_k \geq r_e^{\text{SLA}} \text{ 且 } L_k^e \leq L_e^{\text{SLA}} \\ \frac{r_k}{r_e^{\text{SLA}}} & \text{若 } r_k < r_e^{\text{SLA}} \text{ 且 } L_k^e \leq L_e^{\text{SLA}} \\ -M_e & \text{若 } L_k^e > L_e^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (9)$$

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

(3) m 切片 (mMTC)

m 切片的 QoS 基于接入成功率（满足时延 SLA 时按接入比例计分）：

$$y_k^m = \begin{cases} \frac{\sum_{i \in \mathcal{U}_m} c'_i}{\sum_{i \in \mathcal{U}_m} c_i} & \text{若 } L_k^m \leq L_m^{\text{SLA}} \\ -M_m & \text{若 } L_k^m > L_m^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (10)$$

其中， \mathcal{U}_m 为 m 切片用户集合， c_i 表示是否有任务需求， c'_i 表示是否成功接入， L_k^m 为用户 k 的总时延（同上定义）， M_m 为惩罚系数。

4.3.3 优化模型

基于上述分析，建立如下优化模型：

$$\begin{aligned} \max_{n_U, n_e, n_m} \quad & Q = \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{k \in \mathcal{U}_s} y_k^s \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} n_U + n_e + n_m \leq N \\ n_s \geq 0, \quad \forall s \in \mathcal{S} \\ n_s \in \mathbb{Z}, \quad \forall s \in \mathcal{S} \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

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； y_k^U 、 y_k^e 为用户级 QoS 得分， y^m 为 m 切片的聚合式接入比例得分。

其中，第一个约束为资源块总数限制，第二个约束为非负约束，第三个约束为整数约束。

4.4 模型求解

为求解最优切片 RB 分配与同周期排队调度，采用“离散枚举 + 切片内串并行调度”的流程：

1. 切片 RB 枚举：枚举 $R_U \in \{0, 10, \dots, 50\}$ 、 $R_e \in \{0, 5, \dots, 50 - R_U\}$ ，令 $R_m = 50 - R_U - R_e$ ，若 $R_m < 0$ 或 $R_m \bmod 2 \neq 0$ 则跳过。各切片并发容量 $\text{cap}_U = \lfloor R_U/10 \rfloor$ 、 $\text{cap}_e = \lfloor R_e/5 \rfloor$ 、 $\text{cap}_m = \lfloor R_m/2 \rfloor$ 。

2. 切片内调度：对切片 $s \in \{U, e, m\}$ ，所有用户按“编号靠前优先”的固定顺序进入队列。以固定占用 v_s 计算其独占传输时延 T_k 与速率 r_k ，并采用 cap_s 台并行服务器的无抢占调度：先填满并行槽位，之后每当最早完成的会话释放，队列头用户即时接续，占用直至完成。由此得到等待 Q_k 与总时延 $L_k = Q_k + T_k$ 。
3. QoS 计算与聚合：对 URLLC 与 eMBB 逐用户按 L_k （及 r_k ）代入其 QoS 定义计分并求和；对 mMTC 统计满足 $L_k \leq L_m^{\text{SLA}}$ 的用户数占比作为 y^m 。
4. 目标计算与最优解提取：

$$Q(R_U, R_e, R_m) = \sum_{k \in \mathcal{U}_U} y_k^U + \sum_{k \in \mathcal{U}_e} y_k^e + y^m$$

取 Q 最大的切片 RB 分配与相应调度结果作为最优解。

该方法在分配层面保持小规模枚举，调度层面采用线性对数复杂度的最早完成时间堆维护，整体复杂度低、可复现，并严格符合题目“编号靠前优先、可在同一决策中依次占用 RB”的处理规则。

4.5 求解结果

基于附件 1 数据与上述流程，得到允许排队后的最优分配与接入如下（发射功率固定为 30 dBm）：

- 最优切片 RB 分配： $R_U = 20$, $R_e = 10$, $R_m = 20$ （合计 50）。
- 接入选择： URLLC 接入 $\{U1, U2\}$ ； eMBB 接入 $\{e1, e2, e3, e4\}$ ； mMTC 全部接入 $\{m1 \sim m10\}$ 。
- 关键指标： mMTC 接入比例 $y^m = 1.0000$ ； URLLC QoS 合计 $\sum y^U = 1.9870$ ； eMBB QoS 合计 $\sum y^e = 3.7953$ ； 目标函数 $Q = 6.7823$ 。

为便于阅览，给出最优方案下各用户关键指标表。

表 1 URLLC 用户关键指标（最优分配 $R_U = 20$, $R_e = 10$, $R_m = 20$ ）

用户	r(Mbps)	L(ms)	QoS
U1	71.028	0.145	0.9926
U2	100.783	0.110	0.9944

表 2 eMBB 用户关键指标（最优分配 $R_U = 20$, $R_e = 10$, $R_m = 20$ ）

用户	r(Mbps)	L(ms)	QoS
e1	54.217	2.017	1.0000
e2	51.686	2.182	1.0000
e3	39.766	4.546	0.7953
e4	57.878	5.605	1.0000

表 3 mMTC 用户关键指标（最优分配 $R_U = 20$, $R_e = 10$, $R_m = 20$ ）

用户	r(Mbps)	L(ms)	是否满足 SLA
m1	19.524	0.623	是
m2	19.607	0.639	是
m3	17.219	0.747	是
m4	21.306	0.580	是
m5	20.234	0.607	是
m6	23.069	0.596	是
m7	21.489	0.610	是
m8	19.334	0.709	是
m9	17.815	0.713	是
m10	19.062	0.672	是

5 问题二的模型的建立和求解

5.1 问题二的描述与分析

5.2 预备工作

5.3 模型建立

5.4 模型求解

Step1:

Step2:

Step3:

5.5 求解结果

6 问题三的模型的建立和求解

6.1 问题三的描述与分析

6.2 预备工作

6.3 模型建立

6.4 模型求解

Step1:

Step2:

Step3:

6.5 求解结果

7 模型的分析与检验

7.1 灵敏度分析

7.2 误差分析

8 模型的评价

8.1 模型的优点

- 优点 1
- 优点 2
- 优点 3

8.2 模型的缺点

- 缺点 1
- 缺点 2

附录 A 文件列表

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

附录 B 代码