

System Model

数学建模 (ILP)

决策变量

- $x_{ij} \in \{0, 1\}$: 用户 i 是否被分配到分辨率 j 。
- $m_{lk,j} \in \{0, 1\}$: 链路 ($l \rightarrow k$) 是否传输分辨率 j 。
- $b_{lk} \geq 0$: 链路 ($l \rightarrow k$) 的实际带宽占用。
- $x'_i \geq 0$: 用户 i 的服务需求松弛变量, 用于未满足最低服务需求时的惩罚。

参数定义

- $B(j)$: 分辨率 j 的带宽需求 (如 8 Mbps, 16 Mbps, 35 Mbps, ...)。
- C_{lk} : 链路 ($l \rightarrow k$) 的最大带宽容量。
- q_j : 分辨率 j 的质量得分 (如 $8K > 4K > 2K > 1K$)。
- α, γ, λ : 分别表示用户覆盖率、高分辨率优先权以及松弛变量惩罚的权重。
- $\max_bitrate(i)$: 用户 i 的最大带宽 (由其客户端最大接收带宽决定)。

目标函数

最大化用户体验, 并对未满足服务的情况施加惩罚:

$$\text{最小化: } - \left(\alpha \cdot \sum_i \sum_j q_j \cdot x_{ij} + \gamma \cdot \sum_i \sum_j x_{ij} \right) + \lambda \cdot \sum_i x'_i \quad (1)$$

约束条件

1. 用户分辨率分配约束

每个用户最多被分配到一个分辨率, 或通过松弛变量保证可解性:

$$\sum_j x_{ij} + x'_i = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

用户请求的分辨率不能超过其能力限制:

$$x_{ij} = 0 \quad \forall j \text{ 且 } B(j) > \max_bitrate(i) \quad (3)$$

2. 链路带宽约束

链路 $(l \rightarrow k)$ 的实际带宽占用由需要传输的所有分辨率的带宽叠加决定：

$$b_{lk} = \sum_j m_{lk,j} \cdot B(j) \quad \forall (l, k) \quad (4)$$

链路的带宽占用不能超过其容量：

$$b_{lk} \leq C_{lk} \quad \forall (l, k) \quad (5)$$

3. 多播逻辑约束

如果用户 i 被分配到分辨率 j ，则其路径上的所有链路 $(l \rightarrow k)$ 都必须传输分辨率 j ：

$$m_{lk,j} \geq x_{ij} \quad \forall i, j, \forall (l, k) \in \text{路径}(i) \quad (6)$$

4. 变量范围

$$x_{ij}, m_{lk,j} \in \{0, 1\}, \quad b_{lk} \geq 0, \quad x'_i \geq 0 \quad (7)$$

解释

- 目标函数综合考虑用户体验和高分辨率优先权，同时对未满足的服务需求进行惩罚。
- 约束条件确保：
 - 每个用户被分配到一个分辨率（或通过松弛变量满足最低服务）。
 - 用户请求的分辨率不能超过其最大带宽限制。
 - 链路的带宽占用不超过其容量。
 - 多播逻辑最小化链路上的冗余传输。

Optimization Formulation

Objective

$$\text{minimize: } - \left(\alpha \cdot \sum_i \sum_j q_j \cdot x_{ij} + \gamma \cdot \sum_i \sum_j x_{ij} \right) + \lambda \cdot \sum_i x'_i \quad (8)$$

Subject to:

1. User Assignment Constraint:

$$\sum_j x_{ij} + x'_i = 1, \quad \forall i \quad (9)$$

2. User Capability Constraint:

$$x_{ij} = 0, \quad \forall j \text{ 且 } B(j) > \max_bitrate(i) \quad (10)$$

3. Link Bandwidth Usage:

$$b_{lk} = \sum_j m_{lk,j} \cdot B(j), \quad \forall(l, k) \quad (11)$$

4. Link Bandwidth Capacity:

$$b_{lk} \leq C_{lk}, \quad \forall(l, k) \quad (12)$$

5. Multicast Logic:

$$m_{lk,j} \geq x_{ij}, \quad \forall i, j, \forall(l, k) \in \text{Path}(i) \quad (13)$$

6. Variable Domains:

$$x_{ij}, m_{lk,j} \in \{0, 1\}, \quad b_{lk} \geq 0, \quad x'_i \geq 0 \quad (14)$$

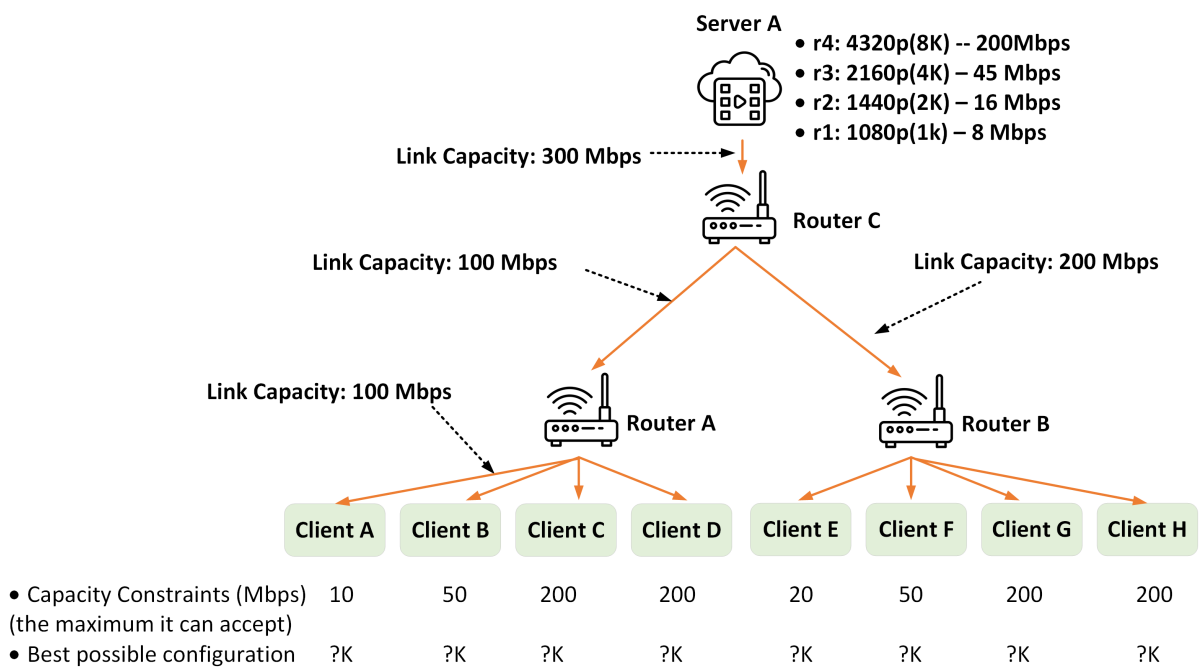


图 1: Network Topology