

面向6G的全域覆盖：空天通信深度研究报告

基于网络切片无线资源管理的空地高通量通信系统设计

一、研究背景与问题重构

1.1 原建模题核心架构分析

原题目为5G网络切片无线资源管理，核心要素：

原题要素	技术描述	数据特征
宏基站(MBS)	大范围覆盖，100个RB，功率10-40dBm	MBS_1.xlsx: 70用户信道数据
微基站(SBS)	边缘增强，50个RB，功率10-30dBm	SBS_1/2/3.xlsx: 三站协同
网络切片	URLLC/eMBB/mMTC三类切片	10+20+40=70用户
频率复用干扰	微基站间同频干扰	信干噪比SINR计算
资源调度	时域100ms周期决策	1000ms任务流数据

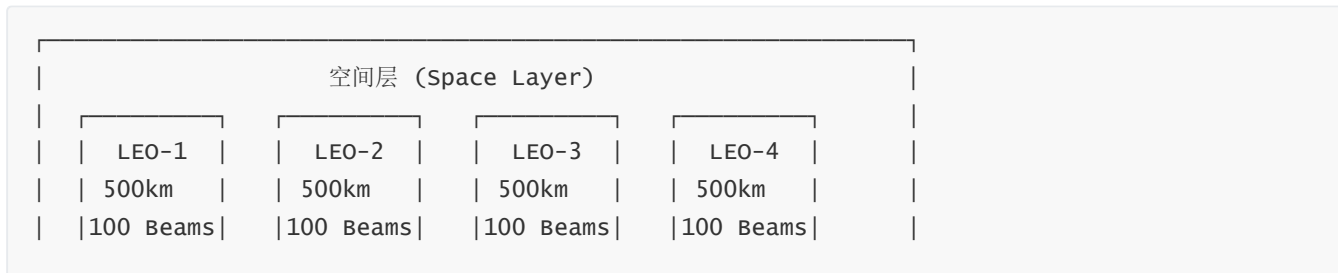
1.2 6G空天通信场景重构

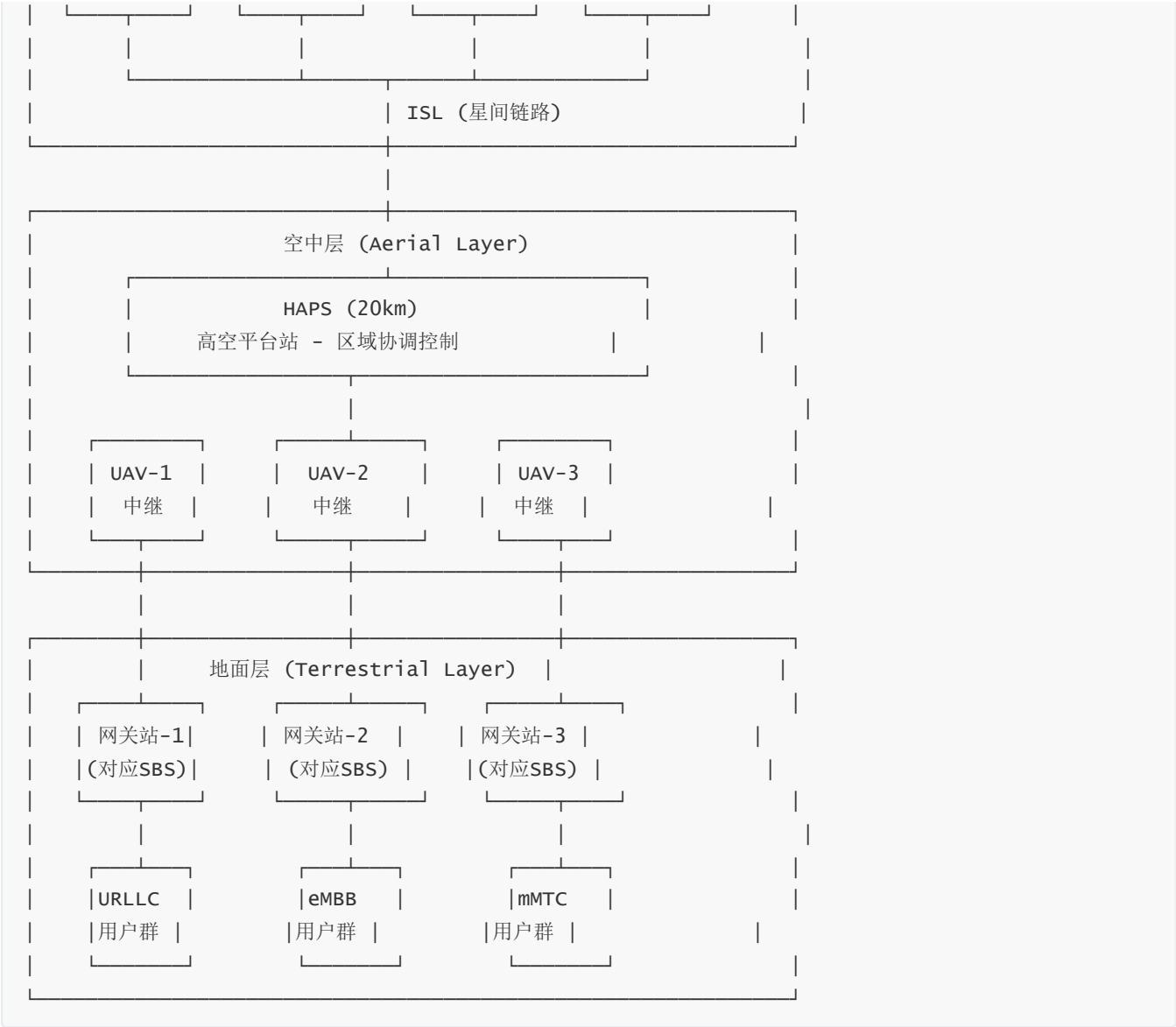
核心改造思路：将地面异构网络映射为空地异构网络

原5G架构	6G空天架构	技术对应
宏基站(MBS)	LEO卫星/HAPS高空平台	全域覆盖层
微基站(SBS)	地面网关站/无人机中继	边缘增强层
基站位置固定	高动态星座轨道运动	时变拓扑
频率复用干扰	星间干扰/多波束干扰	空间干扰协调
OFDMA	OTFS/多波束OFDMA	抗多普勒调制

二、6G空地集成网络架构设计

2.1 系统架构：三层异构网络





2.2 参数映射表

原题参数	6G空天参数	物理意义	典型值
MBS位置(0,0)	LEO轨道高度	卫星高度	500-1200 km
SBS位置($\pm 433, \pm 250$)	网关站坐标	地面站分布	间距500-1000 km
大规模衰减 ϕ	自由空间损耗+大气衰减	路径损耗	170-190 dB
小规模瑞利衰减h	Shadowed-Rician衰落	星地信道	Loo模型参数
资源块带宽360kHz	子载波带宽	OFDM参数	360kHz (Ka波段)
时隙10ms	波束驻留时间	Beam Hopping	10ms
功率10-40dBm	EIRP	等效全向辐射功率	40-60 dBW

三、核心技术模块深度解析

3.1 多点波束技术 (Multi-Beam Technology)

3.1.1 技术原理

多波束卫星通过相控阵天线产生多个独立波束，每个波束可独立服务不同地理区域。

波束增益模型：

$$G(\theta) = G_{\max} \times [J_1(u)/2u + 36 \cdot J_3(u)/u^3]^2$$

其中：

- G_{\max} ：波束峰值增益（典型值45-50 dBi）
- $u = 2.07123 \times \sin(\theta)/\sin(\theta_{3dB})$
- θ ：偏离波束中心角度
- θ_{3dB} ：3dB波束宽度
- J_1, J_3 ：第一类贝塞尔函数

与原题对应：

- 原题中每个用户的"大规模衰减"对应**波束增益+路径损耗**
- 原题的用户位置数据可转化为**用户相对波束中心的偏离角**

3.1.2 数据改造方案

将原 channel_data.xlsx 中的大规模衰减改造为：

```
# 原数据: phi_n,k (dB) - 用户k到基站n的大规模衰减
# 改造后: L_total = L_free + L_atm + G_beam(theta)

def transform_path_loss(original_phi, user_pos, beam_center, sat_height=500):
    """
    将原题大规模衰减转换为星地链路损耗
    """
    # 自由空间损耗 (Ka波段, 30GHz)
    distance = np.sqrt((user_pos[0]-beam_center[0])**2 +
                      (user_pos[1]-beam_center[1])**2 +
                      sat_height**2)
    L_free = 20*np.log10(distance*1e3) + 20*np.log10(30e9) - 147.55

    # 大气衰减 (典型值)
    L_atm = 0.5 * (sat_height / 500) # dB

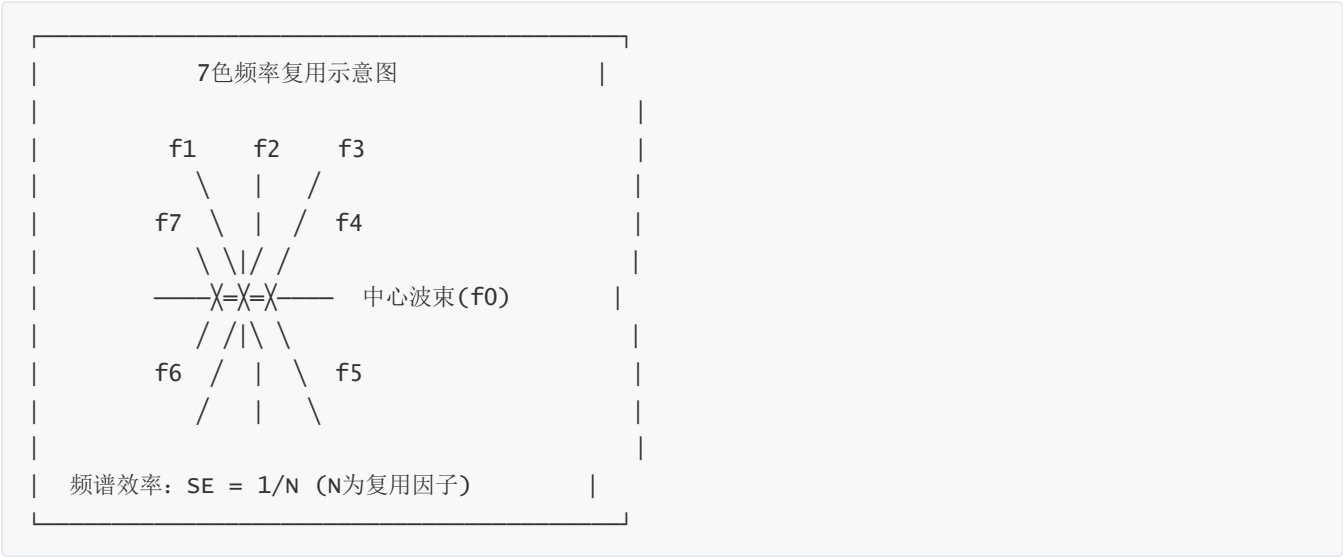
    # 波束增益
    theta = np.arctan(np.sqrt((user_pos[0]-beam_center[0])**2 +
                              (user_pos[1]-beam_center[1])**2) / sat_height)
    G_beam = calculate_beam_gain(theta, G_max=48)

    return L_free + L_atm - G_beam
```

3.2 频率复用技术 (Frequency Reuse)

3.2.1 多色频率复用

传统卫星系统采用4色或7色频率复用方案降低同频干扰：



3.2.2 全频复用+预编码

6G趋势：采用全频复用(N=1)配合多波束预编码消除干扰

干扰模型对应原题：

原题干扰模型：
$$\gamma = (p_{n,k} \times \phi_{n,k} \times |h_{n,k}|^2) / (\sum_{u \neq n} p_{u,k} \times \phi_{u,k} \times |h_{u,k}|^2 + N_0)$$

6G星地干扰模型：
$$\gamma_{sat} = (P_{tx} \times G_{tx} \times G_{rx} \times |h|^2) / (\sum_{interference} + N_0)$$

其中干扰项包括：
1. 波束间干扰(IBE)： 同卫星不同波束
2. 星间干扰(ISI)： 不同卫星同频波束 ← 对应原题"微基站间干扰"
3. 星地干扰(LTI)： 与地面网络共频

3.3 高波束增益技术

3.3.1 相控阵天线与波束赋形

大规模MIMO波束赋形：

发射信号： $x = W \times s$
其中：

- $W \in \mathbb{C}^{N_t \times K}$ ： 预编码矩阵
- $s \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ ： K个用户的信息符号
- N_t ： 发射天线数 （典型值： 256~1024）

波束增益： $G = 10 \times \log_{10}(N_t) + G_{element}$

- 示例：
- 256元相控阵： $G \approx 24\text{ dB} + 5\text{ dB} = 29\text{ dB}$ （元件增益）
 - 1024元相控阵： $G \approx 30\text{ dB} + 5\text{ dB} = 35\text{ dB}$

3.3.2 与原题资源块的对应

原题的"资源块(RB)"可以重新定义为**波束-时间-频率**三维资源单元：

6G资源块定义：

Resource Unit (RU) = (Beam, Time, Freq)

频域： $\Delta f = 360\text{ kHz}$ （子载波带宽）

时域： $T_{\text{slot}} = 10\text{ ms}$ （时隙）

空域： $\text{Beam_id} \in \{1, 2, \dots, N_{\text{beam}}\}$

原题50个RB → 50个RU可分配给不同波束

3.4 高阶调制与自适应编码调制(ACM)

3.4.1 调制方案

调制方式	频谱效率	所需SNR (BER=10 ⁻⁶)	适用场景
QPSK	2 bit/s/Hz	10.5 dB	边缘用户/恶劣信道
8PSK	3 bit/s/Hz	14.0 dB	一般信道
16APSK	4 bit/s/Hz	16.5 dB	良好信道
32APSK	5 bit/s/Hz	19.5 dB	优质信道
64APSK	6 bit/s/Hz	22.5 dB	6G目标
256QAM	8 bit/s/Hz	28.0 dB	6G高阶目标

3.4.2 ACM与原题速率计算的对应

原题香农公式：

$r = i \times b \times \log_2(1 + \gamma)$

6G ACM实际速率：

$$r_{ACM} = \eta(MODCOD) \times B \times (1 - FER)$$

其中：

- $\eta(MODCOD)$ ：编码调制效率查表
- B：带宽
- FER：帧错误率

DVB-S2X标准定义了28种MODCOD组合，
效率范围：0.43 - 5.51 bit/s/Hz

四、空地信道编码技术

4.1 6G信道编码方案对比

编码类型	5G用途	6G空天适用性	优势	劣势
LDPC	数据信道	★★★★★	高吞吐、低误码平层	短码性能差
Polar	控制信道	★★★★☆	理论最优、可达容量	串行译码延迟
Turbo	4G遗留	★★★☆☆	成熟稳定	误码平层
GLDPC-PC	6G研究	★★★★★	结合LDPC+Polar优势	尚未标准化

4.2 星地链路编码特殊考虑

星地信道特点：

1. 长传播延迟（LEO：3-10ms，GEO：250ms）
→ ARQ不适用，必须强FEC
2. 多普勒频移（LEO：±40kHz）
→ OTFS调制 + 交织编码
3. 大气湍流/雨衰
→ 深度交织 + ACM

推荐编码方案：

- URLLC切片：Polar码（K=64-256），SCL译码
- eMBB切片：LDPC码（K=8192），码率0.5-0.9
- mMTC切片：Polar码 + Grant-Free NOMA

4.3 编码参数与原题QoS的对应

原题QoS定义中的可靠性要求可映射为编码参数：

```
# URLLC切片：高可靠低时延
urllc_coding = {
    'code_type': 'Polar',
    'code_length': 256,
```

```
'code_rate': 0.5,
'target_BLER': 1e-5, # 对应原题 $\alpha^t$ 惩罚
'max_iterations': 8,
'decoder': 'SCL-8'
}

# eMBB切片：高吞吐
embb_coding = {
    'code_type': 'LDPC',
    'code_length': 8192,
    'code_rate': 0.75,
    'target_BLER': 1e-3,
    'max_iterations': 50,
    'decoder': 'Min-Sum'
}

# mMTC切片：海量连接
mmtc_coding = {
    'code_type': 'Polar',
    'code_length': 128,
    'code_rate': 0.33,
    'target_BLER': 1e-2,
    'max_iterations': 4,
    'decoder': 'SC' # 简化译码降低复杂度
}
```

五、网络切片资源管理模型重构

5.1 三类切片在空天网络中的应用

切片类型	6G空天应用场景	关键指标	资源需求特征
URLLC	远程手术、自动驾驶、工业控制	时延<1ms, 可靠性99.9999%	预留资源、优先调度
eMBB	卫星宽带、AR/VR、8K视频	速率>1Gbps, 时延<10ms	大带宽、高效复用
mMTC	卫星物联网、全球资产追踪	连接密度 $10^6/\text{km}^2$, 功耗极低	Grant-Free接入

5.2 优化目标函数重构

原题目标：最大化用户服务质量

6G空天重构目标：

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_k \omega_k \times Q_k(r_k, d_k) - \lambda \times E_{\text{total}} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_b N_b^{\text{slice}} \leq N_{\text{total}} && \text{(资源约束)} \\ & p_b \in [P_{\text{min}}, P_{\text{max}}] && \text{(功率约束)} \\ & d_k^{\text{URLLC}} \leq 1 \text{ ms} && \text{(URLLC时延)} \\ & r_k^{\text{eMBB}} \geq 50 \text{ Mbps} && \text{(eMBB速率)} \end{aligned}$$

$$\sum_k a_k^{\text{mMTC}} / \sum_k b_k \geq 0.99 \quad (\text{mMTC接入率})$$
$$I_{\text{inter-beam}} \leq I_{\text{threshold}} \quad (\text{波束间干扰})$$

- 其中：
- Q_k ：用户k的服务质量函数（沿用原题定义）
 - E_{total} ：系统总能耗（6G绿色通信约束）
 - λ ：能效权重因子

5.3 决策变量重构

原题决策变量	6G空天决策变量	说明
切片RB分配	波束-频率-时间资源分配	三维资源管理
基站功率	波束功率+预编码矩阵	干扰协调
用户接入(MBS/SBS)	用户接入(卫星/地面/HAPS)	异构接入选择

六、数据集改造方案

6.1 信道数据改造

原数据：channel_data.xlsx, BS1/2/3.xlsx, MBS_1.xlsx, SBS_1/2/3.xlsx

改造方案：

```
def transform_channel_data(original_data):  
    """  
    将原5G信道数据改造为6G星地信道数据  
    """  
  
    transformed = {}  
  
    # 1. 大规模衰减 → 星地路径损耗  
    # 原:  $\phi_{n,k}$  (dB), 范围约30-80dB  
    # 新:  $L_{\text{sat}}$  (dB), 范围约160-190dB  
    transformed['path_loss'] = original_data['大规模衰减'] + 130 # 偏移量  
  
    # 2. 小规模瑞利衰减 → Shadowed-Rician衰落  
    # 原:  $h_{n,k}$ , 瑞利分布  
    # 新: 莱斯因子 $K=10$ dB的Shadowed-Rician  
    # 通过添加确定性分量模拟LOS主径  
    h_original = original_data['小规模瑞利衰减']  
    K_factor = 10 # 莱斯因子 (dB)  
    K_linear = 10**(K_factor/10)  
    h_los = np.sqrt(K_linear / (1 + K_linear)) # LOS分量  
    h_nlos = np.sqrt(1 / (1 + K_linear)) * h_original # NLOS分量  
    transformed['fading'] = h_los + h_nlos  
  
    # 3. 用户位置 → 波束覆盖区内位置 + 多普勒  
    # 添加用户相对运动速度分量 (模拟LEO高速运动)  
    v_sat = 7.5e3 # m/s, LEO轨道速度
```



```
f_c = 30e9 # Hz, Ka波段载频
c = 3e8
elevation = np.arctan(500e3 / original_data['距离']) # 仰角
doppler_shift = (v_sat / c) * f_c * np.cos(elevation)
transformed['doppler'] = doppler_shift

return transformed
```

6.2 任务流数据改造

原数据：taskflow.xlsx - 用户任务到达

6G场景增强：

```
def transform_task_flow(original_taskflow):
    """
    增强任务流数据以反映6G场景特征
    """
    enhanced = original_taskflow.copy()

    # 1. URLLC任务：添加紧急等级
    enhanced['URLLC_priority'] = np.random.choice([1,2,3],
                                                    size=len(enhanced['u1']),
                                                    p=[0.7, 0.2, 0.1])

    # 2. eMBB任务：添加视频编码类型
    enhanced['eMBB_codec'] = np.random.choice(['H.265', 'H.266', 'AV1'],
                                                size=len(enhanced['e1']))

    # 3. mMTC任务：添加设备类型和duty cycle
    enhanced['mMTC_device_type'] = np.random.choice(
        ['sensor', 'tracker', 'meter'],
        size=len(enhanced['m1'])
    )
    enhanced['mMTC_duty_cycle'] = np.random.uniform(0.001, 0.1,
                                                    size=len(enhanced['m1']))

    return enhanced
```

七、关键技术参考文献

7.1 顶会/顶刊论文（2023-2025）

1. **IEEE JSAC 2024**: "Spectrum Sharing and Interference Management for 6G LEO Satellite-Terrestrial Network Integration"
 - 干扰类型：IBI, ISI, LTI
 - 频谱共享策略
2. **IEEE TWC 2024**: "Dynamic Interference Prediction and Receive Beamforming for Dense LEO Satellite Networks"

- LSTM干扰预测
- 深度强化学习波束赋形

3. **Science China Information Sciences 2023**: "Coverage enhancement for 6G satellite-terrestrial integrated networks"

- 覆盖性能指标
- 星座配置优化

4. **IEEE Wireless Communications 2023**: "Satellite-Terrestrial Integrated 6G: An Ultra-Dense LEO Networking Management Architecture"

- MEO-LEO-SES分层管理
- 资源管理框架

5. **arXiv 2024**: "Channel Coding Toward 6G: Technical Overview and Outlook"

- LDPC/Polar码对比
- 6G编码需求分析

6. **IEEE Access 2024**: "Advanced Channel Coding Schemes for B5G/6G Networks"

- 编码技术演进
- 星地链路适用性

7.2 技术标准

1. **3GPP TR 38.811**: Study on Non-Terrestrial Networks (NTN)
2. **DVB-S2X**: Digital Video Broadcasting - Satellite Second Generation Extension
3. **ITU-R M.2083**: IMT Vision – Framework for 6G

附录：核心公式汇总

A.1 星地链路预算

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{fs} - L_{atm} - L_{rain} - L_{pointing}$$

其中：

- P_{tx} : 发射功率 (dBW)
- G_{tx} : 发射天线增益 (dBi)
- G_{rx} : 接收天线增益 (dBi)
- L_{fs} : 自由空间损耗 = $20\log(4\pi d/\lambda)$ (dB)
- L_{atm} : 大气吸收损耗 (dB)
- L_{rain} : 雨衰 (dB)
- $L_{pointing}$: 指向损耗 (dB)

A.2 系统容量

$$C = \sum_b \sum_k W \times \log_2(1 + \text{SINR}_{k,b})$$

$$\text{SINR}_{k,b} = (P_b \times G_b(\theta_k) \times |h_k|^2) / (I_{\text{IBI}} + I_{\text{ISI}} + N_0)$$

A.3 QoS函数 (沿用原题)

$$\text{URLLC: } Q = \alpha^{(d-d_{\text{queue}})}, d \leq d_{\text{SLA}}; -M_{\text{URLLC}}, d > d_{\text{SLA}}$$

$$\text{eMBB: } Q = 1, r \geq r_{\text{SLA}}; r/r_{\text{SLA}}, r < r_{\text{SLA}}; -M_{\text{eMBB}}, d > d_{\text{SLA}}$$

$$\text{mMTC: } Q = \sum a'_i / \sum a_i, d \leq d_{\text{SLA}}; -M_{\text{mMTC}}, d > d_{\text{SLA}}$$