

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

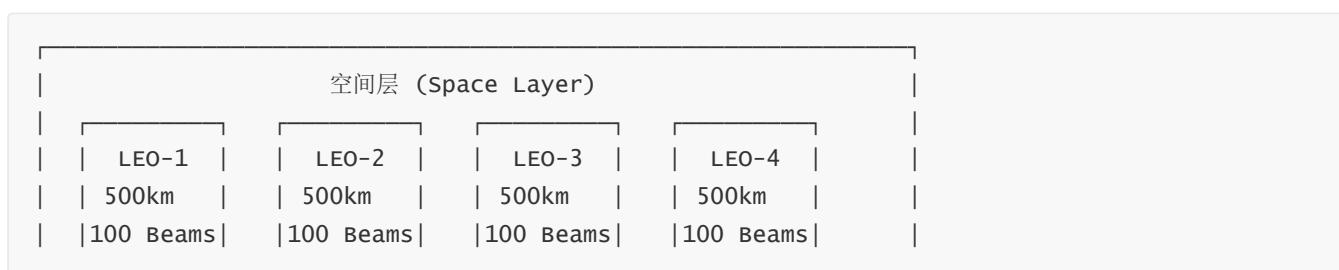
1.2 6G空天通信场景重构

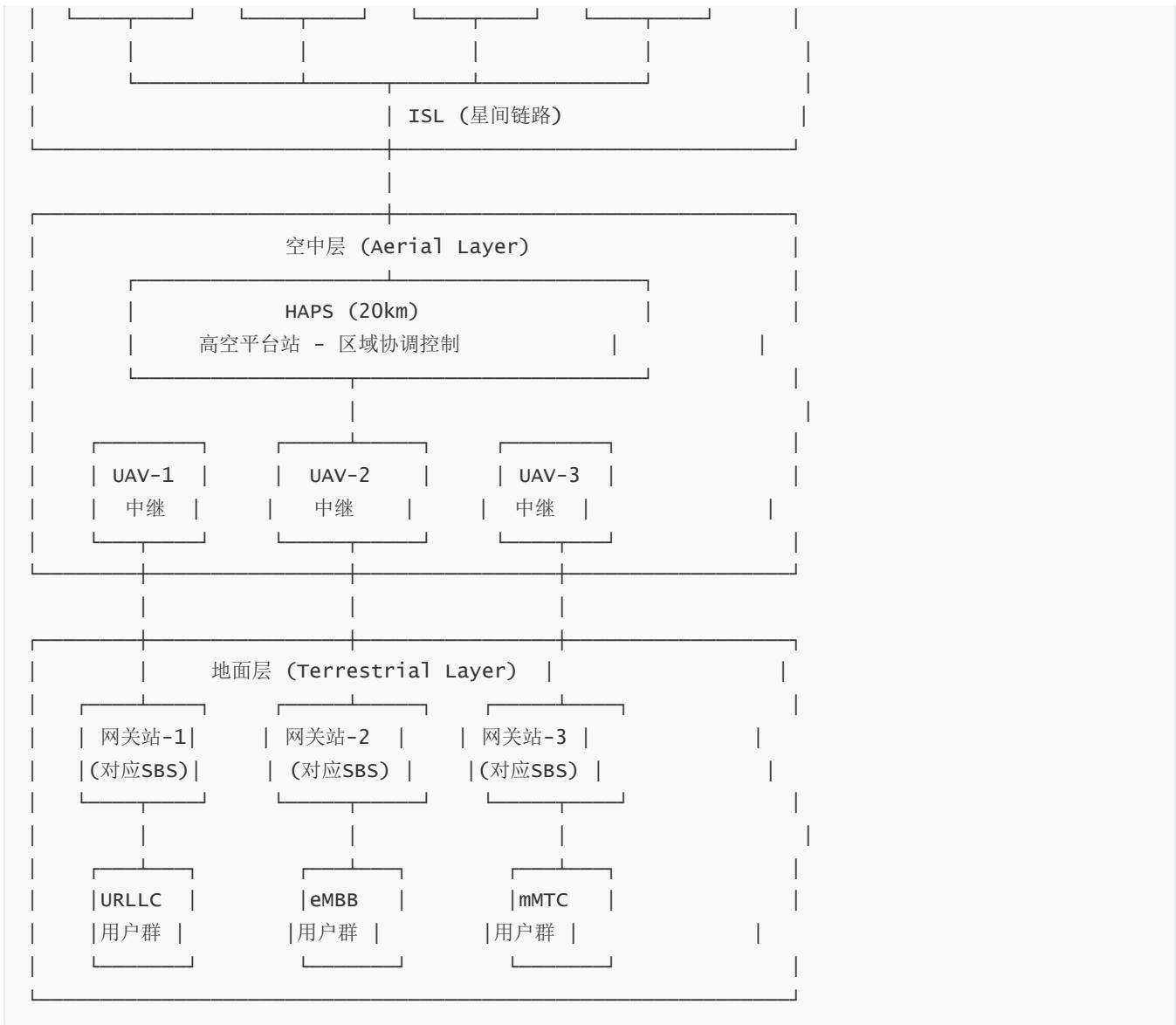
核心改造思路：将地面异构网络映射为空地异构网络

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 dB)
- $u = 2.07123 \times \sin(\theta)/\sin(\theta_{3dB})$
- 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

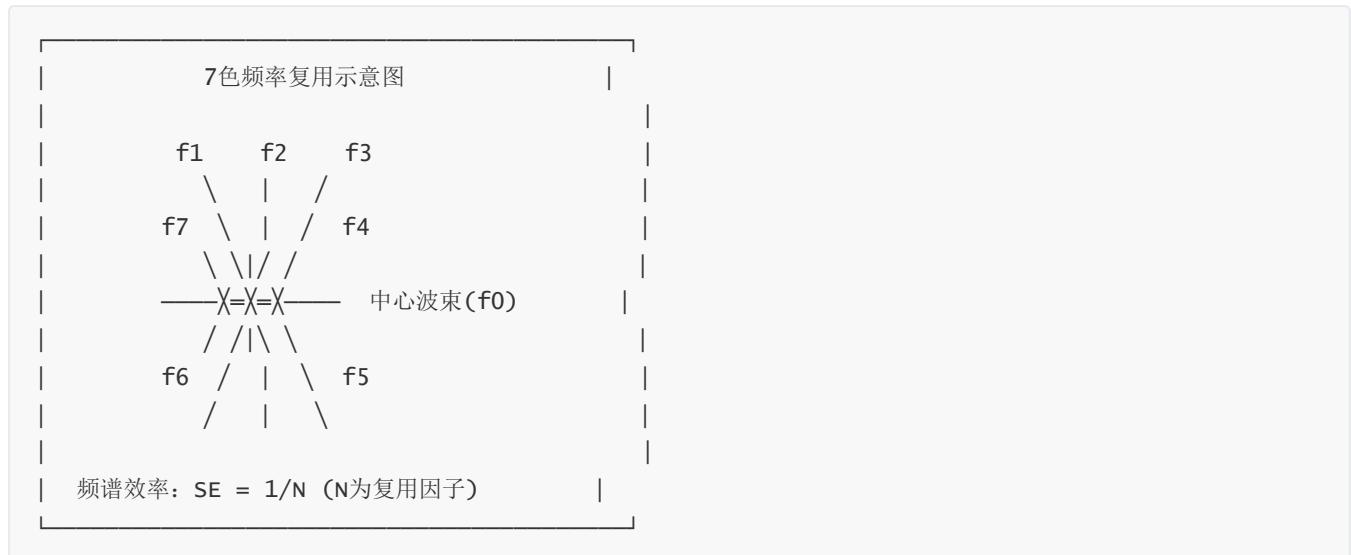
    # 波束增益
    theta = np.arctan(np.sqrt((user_pos[0]-beam_center[0])**2 +
                               (user_pos[1]-beam_center[1])**2) / sat_height)
    G_beam = calculate_beam_gain(theta, G_max=48)

    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(ICI)：同卫星不同波束
2. 星间干扰(ISI)：不同卫星同频波束 \leftarrow 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：

- $W \in C^{\{N_t \times K\}}$: 预编码矩阵
- $s \in C^{\{K \times 1\}}$: 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: Δf = 360 kHz (子载波带宽)          |
| 时域: T_slot = 10 ms (时隙)              |
| 空域: Beam_id ∈ {1, 2, ..., N_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. 大多普勒频移 (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α^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 /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：

```

max  Σ_k ω_k × Q_k(r_k, d_k) - λ × E_total

s.t.
    Σ_b N_b^slice ≤ N_total          (资源约束)
    p_b ∈ [P_min, P_max]            (功率约束)
    d_k^URLLC ≤ 1 ms                (URLLC时延)
    r_k^eMBB ≥ 50 Mbps              (eMBB速率)

```

$$\sum_k a_k \wedge mMTC / \sum_k b_k \geq 0.99 \quad (mMTC\text{接入率})$$

$$I_{\text{inter-beam}} \leq I_{\text{threshold}} \quad (\text{波束间干扰})$$

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: φ_n,k (dB), 范围约30-80dB
    # 新: L_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=10dB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

$$C = \sum_b \sum_k w \times \log_2(1 + SINR_{k,b})$$

$$SINR_{k,b} = (P_b \times G_b(\theta_k) \times |h_{k,b}|^2) / (I_{IBI} + I_{ISI} + N_0)$$

A.3 QoS函数 (沿用原题)

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

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

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