

## 6G 多回程链路选择与功率分配联合优化方法

李庆洋, 李雪婷, 朱晓荣

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 针对 6G 系统热点区域基站单回程链路能力受限的问题, 提出了弹性覆盖系统多回程链路选择与功率分配联合优化方法, 使数据包根据其业务特点和链路状况选择合适的回程链路和功率进行传输。首先, 运用排队论分析了数据包在小基站子队列上的传输时延; 然后, 以最大化时延容忍弹性值为优化目标进行建模; 最后, 采用匈牙利算法和拉格朗日对偶加梯度下降法进行求解。分析和仿真结果表明, 与传统算法相比, 所提算法将超可靠低时延通信 (URLLC, ultra-reliable and low-latency communication) 业务数据包和增强型移动宽带 (eMBB, enhanced mobile broadband) 业务数据包的平均时延分别降低了 17% 和 14%, 有效提高了网络的传输速率。

**关键词:** 6G 基站; 多回程链路; 功率分配; 联合优化; 排队论

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00284

## A joint optimization method of multi backhaul link selection and power allocation in 6G

LI Qingyang, LI Xueting, ZHU Xiaorong

School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

**Abstract:** Aiming at the problem of limited single backhaul link capability of base stations in hotspot areas of the 6G system, a joint optimization method was proposed for multi-backhaul link selection and power allocation in an elastic coverage system, so that the data packets can select the appropriate backhaul link and transmission power according to their service characteristics and link conditions. Firstly, the transmission delay of data packets on the small cell sub-queue was analyzed by using queuing theory. Then, the optimization objective was modeled with the maximum delay tolerance elasticity value. Finally, the optimization problem were solved by the Hungarian algorithm and the Lagrangian duality and gradient descent method. The simulation results show that, compared with the traditional algorithm, the algorithm proposed reduces the average delay of URLLC (ultra-reliable and low-latency communication) service data packets and eMBB (enhanced mobile broadband) service data packets by 17% and 14% respectively, and effectively improves the network transmission rate.

**Key words:** 6G base station, multiple backhaul links, power allocation, joint optimization, queuing theory

### 0 引言

随着 6G 的快速发展, 未来 6G 系统流量密度

和连接密度将大幅增长, 呈现本地化、低时延的特征, 而且对网络提出快速建设、灵活部署、分布式等要求<sup>[1]</sup>。6G 系统热点区域巨大的流量压力与网络

收稿日期: 2022-08-14; 修回日期: 2022-12-02

通信作者: 朱晓荣, xrzhu@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61871237, No.92067101); 江苏省重点研发计划 (No.BE2021013-3); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (No.KYCX21\_0733)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61871237, No.92067101), The Key Research and Development Project of Jiangsu Province (No.BE2021013-3), The Postgraduate Research and Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No.KYCX21\_0733)

广覆盖需求给现有网络提出了新的挑战，但现有的单回程异构网络不能满足要求，且不具有较强的鲁棒性<sup>[2-3]</sup>。

近年来，国内外学者对单回程基站的回程问题与资源分配问题已经进行了深入研究<sup>[4-13]</sup>。文献[4]研究了接入和回程链路优化问题，提出了一种联合资源分配算法来最大化系统吞吐量。文献[5]提出了超密集异构网络中自适应信道分配方案来提高系统吞吐量。文献[6]考虑网络的高异构性，提出了高效的联合回程和接入机制。文献[7]研究了多服务网络的准入控制问题，提出了新的回程和接入网络的联合优化方法。文献[8]研究了双层异构网络的联合下行回程接入功率和子信道分配问题。文献[9-11]讨论了混合回程链路和接入链路的联合设计，提出了混合回程和接入链路的设计问题。文献[12]为解决系统资源利用率和阻塞导致的资源浪费之间的矛盾，提出一种具有阻塞预测的动态规划算法来解决微波毫米波并行连接的功率分配问题。文献[13]考虑网络覆盖范围、频谱效率以及成本等因素，对无线接入和回程之间的资源复用方式、节点定时、保护频带方面进行了一体化增强技术研究。

由此可见，已有研究都是针对异构网络中小基站的单回程链路与接入的联合优化，缺乏针对多业务需求的具有多回程能力的 6G 小基站优化问题的研究。因此，本文在面向 6G 的应用场景下，研究并提出了弹性覆盖系统多回程链路选择与功率分配联合优化方法。

## 1 系统模型

本文研究由宏基站 (MBS, macro-cell base station) 和小基站 (SBS, small-cell base station) 构成的双层多回程弹性覆盖异构网络，多回程接入回传一体化网络场景如图 1 所示。

MBS 支持数百米的覆盖范围，SBS 的覆盖范围约为数十米，SBS 能够满足部分区域的爆炸性流量。假设该区域包括小基站服务的小基站用户 (SBSU, SBS user)，以及由宏基站服务的宏基站用户 (MBSU, MBS user)，所有单天线用户随机均匀地分布在网络的覆盖范围内。假设场景中 SBS 拥有毫米波通信、无线 Mesh 通信和卫星通信的传输能力，可以通过毫米波回程 (MMW, millimeter wave backhaul) 方式、无线 Mesh 回程 (WMB, wireless mesh backhaul) 方式和卫星回程 (SB, satellite backhaul) 方式向 MBS 回传用户数据。SBS 在离散时隙  $t = \{1, 2, \dots, T\}$  传输上行用户业务，一批数据包在很短的时隙  $t$  内排队到达 SBS，因此时隙  $t$  内的无线信道相对稳定。假设 SBS 的接入和回传使用不同的频率传输，各基站间采用正交频分复用方式，因此整个系统的用户与基站之间的干扰忽略不计<sup>[14]</sup>。

本文将用户业务分为三大类，分别为超可靠低时延通信 (URLLC, ultra-reliable and low-latency communication) 业务、增强型移动宽带 (eMBB, enhanced mobile broadband) 业务和大连接物联网 (mMTC, massive machine-type of communication) 业

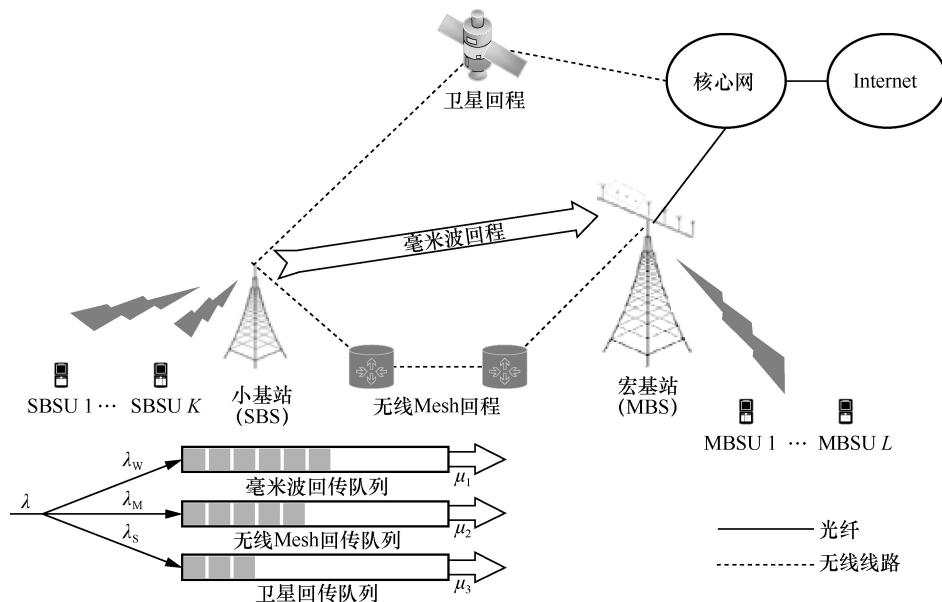


图 1 多回程接入回传一体化网络场景

务。根据文献[15-16], 设 URLLC 业务平均包到达率为  $\lambda_1$ , 数据包的平均大小为  $\varphi_{\text{URLLC}}$ , 且小区内 URLLC 用户数量服从均值为  $\theta_{\text{URLLC}}$  的泊松分布; eMBB 数据包的到达率服从均值为  $D$  的泊松分布, 且数据包的大小为固定值  $\varphi_{\text{eMBB}}$ , eMBB 用户均匀分布在小区内, 均值为  $\theta_{\text{eMBB}}$ , 因此 eMBB 业务平均包到达率为  $\lambda_2 = \theta_{\text{eMBB}} \times D$ ; mMTC 用户在基站小区内的数量服从均匀分布, 假设均值为  $\theta_{\text{mMTC}}$ , 且 mMTC 用户每秒上传固定大小为  $\varphi_{\text{mMTC}}$  的数据包, 因此 mMTC 业务平均包到达率为  $\lambda_3 = \theta_{\text{mMTC}}$ 。因此, 可以得到该场景下用户发送数据包的平均大小  $\bar{\varphi}$  为 3 种业务数据包大小和的平均值。

假设工作在离散时隙  $t, t \in \{1, 2, \dots, T\}$  的毫米波回程链路、无线 Mesh 回程链路和卫星回程链路的传输速率分别为  $R_{\text{MMW}}(t)$ 、 $R_{\text{WMB}}(t)$  和  $R_{\text{SB}}(t)$ 。毫米波回程链路是视距传输, 带宽大、传输速率大, 但是范围小、链路状态不稳定; 无线 Mesh 回程链路通过多跳访问节点传输数据, 带宽与传输速率相对于毫米波较小, 但是传输距离远、稳定性高; 卫星回程链路通过卫星连接小基站与宏基站, 其覆盖范围很大, 但是传输速率最小, 因此不适用于时延敏感业务的传输<sup>[17-18]</sup>。

根据文献[19]的建议, 本文假设星地链路采用 Ka 波段, 将 SBS 卫星回程链路信道衰落设置为服从大尺度衰落和莱斯衰落。在  $t$  时隙, SBS 卫星回程链路总传输速率为

$$R_{\text{SB}}(t) = B_{\text{SB}} \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{\text{SB}}(t) G_{\text{SB}} |h_{\text{SB}}(t)|^2}{\sigma_{\text{SB}}^2} \right) \quad (1)$$

其中,  $P_{\text{SB}}(t)$  表示  $t$  时隙 SBS 的发射功率;  $G_{\text{SB}}$  表示天线增益;  $|h_{\text{SB}}(t)|^2$  表示卫星回程链路信道增益;  $\sigma_{\text{SB}}^2$  表示加性高斯白噪声的噪声方差,  $\sigma_{\text{SB}}^2 = N_0 B_{\text{SB}}$ , 其中  $B_{\text{SB}}$  表示卫星回程链路分配带宽。

基于香农公式可得, 在  $t$  时隙的 SBS 毫米波回程链路总传输速率为<sup>[20]</sup>

$$R_{\text{MMW}}(t) = B_{\text{MMW}} \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{\text{r}}^{\text{MMW}}(t)}{N_0 B_{\text{MMW}}} \right) \quad (2)$$

其中,  $N_0$  表示白噪声功率谱密度,  $B_{\text{MMW}}$  表示毫米波回程链路分配带宽, SBS 使用毫米波通信进行回传的接收功率为  $P_{\text{r}}^{\text{MMW}}(t)$ 。

同样地, 使用  $\text{SINR}_{\text{WMB}}^{\text{min}}(t)$  表示  $t$  时隙 SBS 计算

得到的整个无线 Mesh 回程链路上最小的信干噪比, 根据香农公式可以得到  $t$  时隙的 SBS 无线 Mesh 回程链路的最大传输速率

$$R_{\text{WMB}}(t) = B_{\text{WMB}} \text{lb}(1 + \text{SINR}_{\text{WMB}}^{\text{min}}(t)) \quad (3)$$

## 2 SBS 排队模型

假设在 SBS 处 3 个回传队列集合为  $Q = \{Q_{\text{MMW}}, Q_{\text{WMB}}, Q_{\text{SB}}\}$ , 表示数据包分别通过毫米波、无线 Mesh 和卫星通信回传至 MBS, 每个子队列最大长度为  $N$ 。假设在时隙  $t$ ,  $M$  个业务不同且相互独立的数据包到达 SBS, SBS 选择一个适合的子队列用于回传 SBSU 数据包。一般来说, 设置每个子队列的阈值为  $N$ 。根据所设定的队列规则, SBS 子队列排队模型属于生灭过程。设  $\lambda$  为子队列数据包的平均到达率,  $\mu$  表示子队列平均服务率。该子队列的使用率为到达率与服务率之比, 记  $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$ , 根据排队论的分析方法<sup>[21]</sup>, 由子队列各状态概率的稳态方程可知, 当  $n = 1, 2, \dots, N$  时, 子队列  $Q_i$  队列长度为  $n$  时的概率为

$$p_{i,n} = \rho_i^n p_{i,0} \quad (4)$$

根据队列状态的正则性与  $\sum_{n=0}^N p_{i,n} = 1$ , 求得队列

$Q_i$  的空闲概率为  $p_{i,0} = \frac{1 - \rho_i}{1 - \rho_i^{N+1}}$ , 由此求出子队列达到平衡状态后的平均队长

$$L_i = \sum_{n=0}^{N-1} n p_{i,n+1} + 1 - p_{i,0} \quad (5)$$

根据 Little 公式可得  $Q_i$  中单个数据包平均逗留时间  $D_i$ , 即数据包的平均时延为

$$D_i = \frac{L_i}{\lambda_i(1 - p_{i,N})} = \frac{L_i}{\mu_i(1 - p_{i,0})} = \frac{(\rho_i^N - 1 - \rho_i^{N+1})(1 - \rho_i^{N+1}) + \rho_i^{2(N+1)}(N+1)(\rho_i - 1)}{\mu_i(1 - \rho_i^N)(1 - \rho_i^{N+1})(\rho_i - 1)} \quad (6)$$

假设时隙  $t$  中, 3 个子队列的到达率分别为  $\lambda_{\text{MMW}}(t)$ 、 $\lambda_{\text{WMB}}(t)$ 、 $\lambda_{\text{SB}}(t)$ , 服务率分别为  $\{\mu_{\text{MMW}}(t), \mu_{\text{WMB}}(t), \mu_{\text{SB}}(t)\}$ 。使用回程链路的回传速率来表示对应子队列的服务率, 在  $t$  时隙,  $Q_i$  队列的回传速率为  $R_i(t)$ , 则 SBS 子队列系统的服务率可以表示为

$$\mu_i(t) = R_i(t) / \bar{\varphi}, i \in \{\text{MMW}, \text{WMB}, \text{SB}\} \quad (7)$$

进一步地可以得到数据包  $a_{m,x}(t)$  接入 SBS 的平均排队时延为

$$\bar{D}_{a_{m,x}(t)} = \left( \delta_{\text{MMW}} D_{\text{MMW},a_{m,x}(t)} + \delta_{\text{WMB}} D_{\text{WMB},a_{m,x}(t)} + \delta_{\text{SB}} D_{\text{SB},a_{m,x}(t)} \right) / \sum_i \delta_i \quad (8)$$

其中,  $\delta_i \in \{0,1\}$ ,  $\delta_i = 0$  表示该队列发生了拥塞, 反之则没有发生拥塞。

### 3 多回程链路选择和功率分配联合优化问题

本文使用时延阈值表示数据包在系统中的剩余存活时间, 使用  $Z$  型效用函数表明数据包传输时延与时延阈值之间的关系, 称为时延容忍弹性值<sup>[22]</sup>, 表示为

$$Z(\tilde{R}_m^i(t)) = \frac{\chi_x}{1 + e^{-\phi \left( T(a_{m,x}(t)) - \tilde{R}_m^i(t) \right)}} \quad (9)$$

其中,  $\tilde{R}_m^i(t)$  表示数据包  $a_{m,x}(t)$  在回传队列  $i$  上的回传速率,  $T(a_{m,x}(t))$  表示数据包  $a_{m,x}(t)$  的时延阈值,  $\phi$  为灵敏度因子,  $\chi_x$  表示数据包业务增益, 不同业务数据包的业务增益不同, 体现了 SBS 对不同业务用户提供差异性服务<sup>[23]</sup>。

设矩阵  $\mathcal{G}$  为一个  $M$  行 3 列的链路分配矩阵,  $M$  为一批数据包的个数。二进制矩阵元素  $\mathcal{G}_{m,i} = 1$  表示数据包  $a_{m,x}(t)$  通过回传队列  $i$  进行回传,  $\mathcal{G}_{m,i} = 0$  表示不在该队列回传, 其中  $i = \{0,1,2\}$ , 分别表示 SBS 毫米波、无线 Mesh 和卫星子队列。  $\sum_{i=0}^2 \mathcal{G}_{m,i} = 0$  则表示  $a_{m,x}(t)$  在分配过程中被 SBS 抛弃。

最大化时延容忍弹性值为目标的接入与回传一体化系统资源分配模型为

$$\text{Pl: } \max_{\xi_{m,i}, P_{m,i}} \sum_{m=1}^M Z(\tilde{R}_m^x(t)) \quad (10)$$

$$\text{s.t. } \mathcal{G}_{m,i} \in \{0,1\}, \forall m,i \quad (11a)$$

$$\sum_{i=0}^2 \mathcal{G}_{m,i} \leq 1, \forall m \quad (11b)$$

$$D_i \leq d_i, \forall i \quad (11c)$$

$$\frac{\text{MD}_{\min}}{3} \leq \sum_{m=1}^M \mathcal{G}_{m,i} \bar{D}_{a_{m,x}(t)} \leq \frac{\text{MD}_{\max}}{3}, \forall i \quad (11d)$$

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{m=1}^M \mathcal{G}_{m,i} P_{m,i} \leq P_{\max} \quad (11e)$$

$$P_{m,i} \geq 0, \forall m,i \quad (11f)$$

$$-\tau_i \leq \tilde{R}_m^x - \frac{\varphi(a_{m,x}(t))}{\bar{D}_{a_{m,x}(t)}} \leq \tau_i, \forall m \quad (11g)$$

其中,  $d_i$  表示回传子队列  $i$  允许的最大平均时延,  $D_{\min}$  表示数据包在子队列中的最小平均排队时延, 同理  $D_{\max}$  表示数据包在子队列中的最大平均排队时延,  $P_{m,i}$  表示数据包在回程链路  $i$  上的发送功率,

$P_{\max}$  表示 SBS 的总瞬时发送功率最大值,  $\frac{\varphi(a_{m,x}(t))}{\bar{D}_{a_{m,x}(t)}}$

表示业务类型为  $x$  的数据包的平均回传速率,  $\tau_i$  为设定的阈值。约束(11a)和(11b)表示时隙  $t$  内每个数据包只能被分配到一个回传队列中, 且允许传输系统抛弃数据包。约束(11c)限制了子队列的最大时延。约束(11d)限制了 SBS 分配给每个子队列的用户包数量, 防止回传质量好的子队列频繁拥塞, 质量差的子队列无包可传的情况。约束(11g)限制相同业务类型数据包之间的回传速率差异。

上述优化问题属于 NP-hard 问题, 因为其约束条件中包括了 0-1 整数变量  $\mathcal{G}_{m,i}$  和连续变量  $P_{m,i}$ , 所以该优化问题是作为 NP-hard 问题之一的混合整数非线性规划 (MINLP, mixed-integer nonlinear programming) 问题。为了方便求解该优化问题, 本文采取经典两步法将优化问题分解为回程链路选择和回传功率分配两个子问题, 依次求解  $\mathcal{G}$  和  $P_{m,i}$ 。

#### 3.1 回程链路选择策略

由于数据包发送功率变量  $P_{m,i}$  与求解回程链路分配变量无关, 因此根据业务的不同, 将数据包发送功率初始化为

$$P_{m,i} = \frac{P_{\max} \chi_x}{3} \quad (12)$$

其中,  $\chi_x$  表示数据包业务增益, 初始功率满足约束(11d)和(11e)。将原优化问题简化为回程链路分配子问题为

$$\text{P2: } \max_{\xi_{m,i}, P_{m,i}} \sum_{m=1}^M Z(\tilde{R}_m^x(t)) \quad (13)$$

$$\text{s.t. } (11a) - (11d) \quad (14)$$

子问题 P2 和约束条件不含有非线性变量, 原问题中的变量  $\mathcal{G}_{m,i}$  为 0-1 变量, 因此子问题 P2 被简化表述为 0-1 指派问题。子队列处理数据包的效率将使用大小为  $M \times 3$  的时延容忍弹性矩阵表示。匈牙利算法能够精确求解指派问题, 获得最优的分配方案<sup>[24]</sup>。本文采用匈牙利算法求解该 0-1 指派问题, 解出二进制回程链路分配矩阵  $\mathcal{G}$ 。回程链路分配策略被用于求解回程链路分配问题, 回程链路分配策略为

**步骤 1** 初始化  $D_{\min}$ 、 $D_{\max}$ 、 $d_{\text{URLLC}}$ 、 $d_{\text{eMBB}}$ 、 $d_{\text{mMTC}}$ 、 $\lambda$  具体数值。

**步骤 2** 初始化每个数据包的发送功率, 对于业务为  $x$  的第  $m$  个数据包, 该数据包的发送功率初始化为  $P_{m,i} \leftarrow \frac{P_{\max} \lambda_x}{3}$ 。

**步骤 3** 初始化每个子队列允许长度的具体范围, 初始化  $\lambda_{\text{MMW}}$ 、 $\lambda_{\text{WMB}}$ 、 $\lambda_{\text{SB}}$  为总到达率的 1/3。

**步骤 4** 计算每一对数据包和子队列的时延容忍弹性值并填入时延容忍弹性矩阵。

**步骤 5** 将时延容忍弹性矩阵转化为方阵, 使问题简化为一对一指派问题。

**步骤 6** 将最大化时延弹性容忍值作为目标, 执行匈牙利算法求解问题, 得到回程链路分配矩阵  $\mathcal{G}_n$ , 更新  $\lambda_{\text{MMW}}$ 、 $\lambda_{\text{WMB}}$ 、 $\lambda_{\text{SB}}$ 。

**步骤 7** 根据回程链路分配矩阵计算每个子队列的时延大小  $D_i$ , 如果满足  $D_i \leq d_i, \forall i$ , 则执行步骤 9, 否则继续执行步骤 8。

**步骤 8** 如果满足  $D_i \geq d_i, \forall i$ , 则每个子队列抛弃各自时延容忍弹性值最小的数据包, 然后转至步骤 4; 否则, 将不满足  $D_i \leq d_i$  的子队列中时延容忍弹性值最小的数据包重新分配到满足式子的其他子队列中, 得到回程链路分配矩阵  $\mathcal{G}_{n+1}$  并转至步骤 4。

**步骤 9** 得到回程链路分配矩阵  $\mathcal{G}$  和最大总时延弹性容忍值。

### 3.2 回传功率分配策略

本节将求解用户数据包的回传功率分配子问题, 该子问题被描述为

$$\text{P3: } \max_{\xi_{m,i}, P_{m,i}} \sum_{m=1}^M Z(\tilde{R}_m^x(t)) \quad (15)$$

$$\text{s.t. } (12\text{e}) - (12\text{g}) \quad (16)$$

子问题 P3 属于非线性规划问题, 采用拉格朗日对偶法将子问题 P3 转化为凸问题<sup>[25]</sup>, 构造拉格朗日函数处理非线性约束条件, 定义拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L(P_{m,i}, \kappa_m, \psi_m, \pi) = & \sum_{m=1}^M Z(\tilde{R}_m^x(t)) + \sum_{m=1}^M (\kappa_m + \psi_m) \tau_m + \\ & \sum_{m=1}^M (\psi_m - \kappa_m) \left( \tilde{R}_m^x - \frac{\varphi(a_{m,x}(t))}{\bar{D}_{a_{m,x}(t)}} \right) - \\ & \pi \sum_{i=0}^2 \sum_{m=1}^M \mathcal{G}_{m,i} P_{m,i} + \pi P_{\max} \end{aligned} \quad (17)$$

其中,  $\kappa$ 、 $\psi$  和  $\pi$  分别为子问题 P3 的约束条件对应的拉格朗日乘子矢量, 对偶目标函数可表示为

$$\text{P4: } D(\kappa_m, \psi_m, \pi) = \max_{P_{m,i}} L(P_{m,i}, \kappa_m, \psi_m, \pi) \quad (18)$$

使用共轭函数来表示对偶问题 P4, 可以得到拉格朗日对偶函数式(19)。观察式(19)可以看到,  $f^*(y)$  与  $P_{m,i}$  相关, 而式子中的其他项则与  $P_{m,i}$  无关, 所以对  $f^*(y)$  求导并令其等于 0 可以取到最优解。

$$\begin{aligned} D(\kappa_m, \psi_m, \pi) = & \max_{P_{m,i}} \sum_{m=1}^M Z(\tilde{R}_m^x(t)) + \\ & \max_{P_{m,i}} \sum_{m=1}^M \kappa_m \left( \tau_m - \tilde{R}_m^x + \frac{\varphi(a_{m,x}(t))}{\bar{D}_{a_{m,x}(t)}} \right) + \\ & \max_{P_{m,i}} \sum_{m=1}^M \psi_m \left( \tau_m + \tilde{R}_m^x - \frac{\varphi(a_{m,x}(t))}{\bar{D}_{a_{m,i}(t)}} \right) - \\ & \max_{P_{m,i}} \pi \sum_{i=0}^2 \sum_{m=1}^M \mathcal{G}_{m,i} P_{m,i} + \max_{P_{m,i}} \pi P_{\max} = \\ & \sum_{m=1}^M (\kappa_m - \psi_m) \frac{\varphi(a_{m,x}(t))}{\bar{D}_{a_{m,i}(t)}} + \\ & \sum_{m=1}^M (\kappa_m + \psi_m) \tau_m + \pi P_{\max} - f^*(y) \end{aligned} \quad (19)$$

梯度下降法是求解无约束规划问题的经典方法, 梯度下降法对初始点的要求不高, 每次迭代的代价小, 只需要计算梯度, 计算强度不大, 所以本节使用梯度下降法求解满足 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件的最优回传功率分配值  $P_{m,i}$ , KKT 条件是为线性规划最佳解的必要条件。回传功率分配策略如下。

**步骤 1** 置步长  $\gamma$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ , 最大迭代次数  $\varepsilon$  和迭代精度  $\Delta$ ; 初始化对偶变量  $P_{m,i}^0$ 、 $\kappa_m^0$ 、 $\psi_m^0$ 、 $\pi^0$ , 当前迭代步数  $n=0$ 。

**步骤 2** 迭代计算功率值  $P_{m,i}^n$ 。

$$P_{m,i}^n \leftarrow \left[ P_{m,i}^{n-1} + \eta \frac{\partial L}{\partial P_{m,i}} \right]^+$$

**步骤 3** 根据梯度法更新对偶变量  $\kappa_m$ 、 $\psi_m$ 、 $\pi_m$  为

$$\begin{aligned} \kappa_m^{n+1} = & \left[ \kappa_m^n + \beta_1 \frac{\partial D}{\partial \kappa_m} \right]^+ = \\ & \left[ \kappa_m^n + \beta_1 \left( \tilde{R}_m^x - \tau_m - \frac{\varphi(a_{m,x}(t))}{\bar{D}_{a_{m,x}(t)}} \right) \right]^+, n=1, 2, \dots, K \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi_m^{n+1} &= \left[ \psi_m^n + \beta_2 \frac{\partial D}{\partial \psi_m} \right]^+ \\ &= \left[ \psi_m^n - \beta_2 \left( \tilde{R}_m^x + \tau_m - \frac{\varphi(a_{m,x}(t))}{D_{a_{m,x}(t)}} \right) \right]^+, n=1,2,\dots,K \\ \pi_m^{n+1} &= \left[ \pi_m^n + \beta_3 \frac{\partial D}{\partial \pi_m} \right]^+ \\ &= \left[ \pi_m^n + \beta_3 \left( \sum_{i=0}^2 \sum_{m=1}^M \mathcal{G}_{m,i} P_{m,i} - P_{\max} \right) \right]^+, n=1,2,\dots,K \end{aligned}$$

其中,  $[x]^+ = \max(x, 0)$ 。

**步骤 4** 如果满足判定式  $\|P_{m,i}^{n+1} - P_{m,i}^n\| \leq \Delta$  则执行步骤 6, 否则继续执行。

**步骤 5**  $n \leftarrow n+1$ , 如果  $n \leq \varepsilon$  则跳转到步骤 2, 否则执行步骤 6 结束迭代。

**步骤 6** 得到最优解  $P_{m,i}^* \leftarrow P_{m,i}^{n+1}$ 。

对于回程链路分配策略, 在一次迭代后, 不满足时延要求的子队列会将数据包分配至其他队列或者抛弃数据包。所以算法 1 的迭代次数不超过  $(M - N)$  次, 其中  $M$  为时隙  $t$  内一批数据包的数量, 时隙  $t$  很小, 故  $M$  的数量有限且一般不会超过 100,  $N$  为子队列的最大长度。算法 1 采用匈牙利算法通过修正效益矩阵得到回程链路分配矩阵, 保证了总是在有限步内收敛于一个最优解<sup>[26]</sup>。回程链路分配策略的信道分配时间复杂度为  $O(M^2 - MN)$ 。回传功率分配策略采用了梯度下降法, 其收敛性得到了保证<sup>[27]</sup>, 采用梯度下降法的回传功率分配策略能够在  $\varepsilon$  以内得到回传功率分配策略结果, 具有时间复杂度  $O(\varepsilon M^3)$ 。将两个算法结合起来可以得到 6G 多回程链路选择与功率分配联合优化算法。

#### 4 性能分析与评估

本文模拟了一个上行双层异构网络模型, 场景与前文描述相同。为了验证本文所提出的算法性能, 在此引入两种相关的链路资源分配算法。平均链路选择算法是将所有到达 SBS 的用户数据包, 不分业务地平均分配到 3 个子队列中。文献[28]提出了一种自适应高效计算 (CEA, computationally efficient adaptive) 算法, CEA 算法使用归一化最小均方法来逼近 MINLP 问题的最优解, 通过调整目标函数区分不同业务。

本文参考文献[29]的研究报告与文献[30]中的综

合接入和回程 (IAB, integrated access and backhaul) 场景建议, 以及文献[16]中信道模型参数。主要仿真参数<sup>[20]</sup>见表 1。

表 1 主要仿真参数<sup>[20]</sup>

参数描述	数值
白噪声功率谱密度 $N_0$	-174 dBm
SBS 卫星回程链路分配带宽 $B_{SB}$	20 MHz
SBS 最大发射功率 $P_{\max}$	33 dBm
MBS 覆盖半径 $R_{0b}$	1 000 m
SBS 覆盖半径 $R_{0s}$	100 m
天线增益 $G$	18 dB
误差范围 $\Delta$	0.01
路径损耗系数 $\alpha_{SB}$	3.76
毫米波回程链路分配带宽 $B_{MMW}$	1 GHz
卫星回程链路载频 $f_c^{SB}$	20 GHz
无线 Mesh 回程链路载频 $f_c^{WMB}$	2.4 GHz
毫米波回程链路载频 $f_c^{MMW}$	28 GHz
无线 Mesh 回程链路分配带宽 $B_{WMB}$	20 MHz
遮挡因子 $\alpha_0$	1
用户发射功率 $P_{UE}$	20 dBm

为了验证多队列模型数据包时延推导的正确性, 本文对多队列分批到达模型进行仿真, 并将仿真值与理论值进行对比, 子队列服务率与排队时延关系如图 2 所示。结果显示, 3 种业务的排队时延随着子队列服务率的增加而减少。虽然仿真值略有波动, 但是其曲线趋势与理论值变化趋势相同, 因此可以有效验证排队时延推导过程与所得到的平均时延结果的正确性。

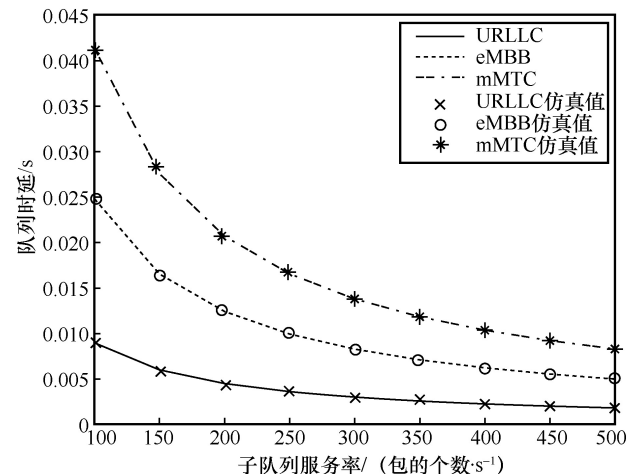


图 2 子队列服务率与排队时延关系

不同算法的数据包平均时延对比如图 3 所示。平均链路选择算法将数据包平均地分配给 3 个回程链路，这就导致了 URLLC 业务数据包平均时延超出时延阈值，URLLC 数据包的需求得不到满足。相比 CEA 算法，本文所提算法使 URLLC 数据包和 eMBB 数据包的平均时延分别减少 17% 和 14%，但是 mMTC 数据包的平均时延增加了 6%。相对于 CEA 算法，本文所提算法将回传资源向对时延相对敏感的 URLLC 业务和传输优先级相对较高的 eMBB 业务进行合理的倾斜，并且在满足 mMTC 需求的情况下，适当地减少了 mMTC 数据包的回传资源。

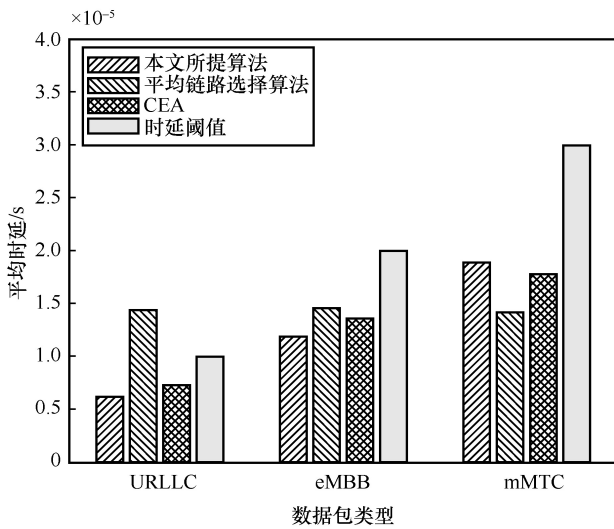


图 3 不同算法的数据包平均时延对比

不同业务数据包在不同算法的时延性能对比如图 4 所示，3 种算法的平均时延与数据包到达率成正比，但是时延大小有所不同。可以看出，对于 URLLC 数据包和 eMBB 数据包，本文所提算法的平均时延低于 CEA 算法和平均链路选择算法。原因在于，所提算法为 URLLC 数据包和 eMBB 数据包分配了更好的回程链路和更合理的回传功率。在数据包到达率较小时，本文所提算法令 URLLC 数据包和 eMBB 数据包占据了更好的传输资源，导致 mMTC 数据包的平均时延大于另外两种算法的平均时延。在数据包到达率增大到 27 以后，所提算法的 mMTC 平均时延小于其他两种算法，这是因为本文所提算法在数据包到达率增大时，为了满足 mMTC 数据包的时延需求，分配给其更多的资源。

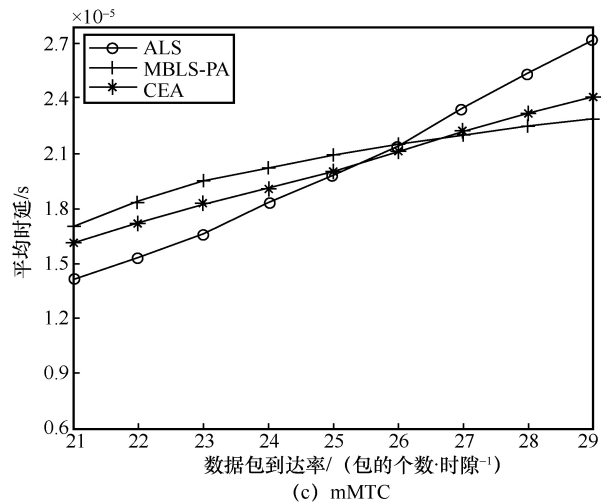
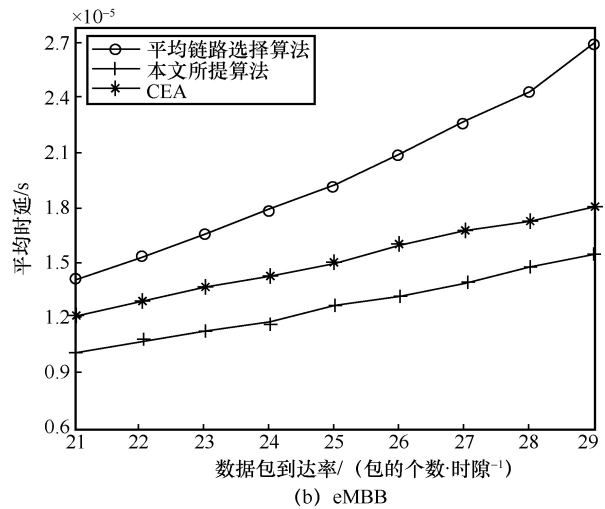
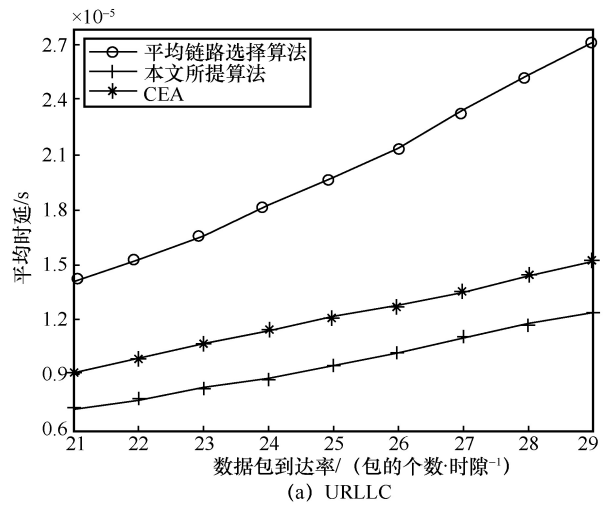


图 4 不同业务数据包在不同算法的时延性能对比

### 5 结束语

本文研究了有接入与回传一体化能力的上行双层异构网络场景，提出了多回程链路选择与功率分

配联合优化算法。分析和仿真表明了本文所提算法在满足业务 QoS 的同时能够显著提高回程链路的性能。本文的后续研究工作将进一步深入研究小基站之间的用户接入与多回程链路的联合优化问题。

### 参考文献:

- [1] 张小茜. 全双工集成接入和回程系统遍历容量表征及优化算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.  
ZHANG X Q. Research on ergodic capacity analysis and optimization algorithm of full-duplex integrated access and backhaul system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [2] 孙韶辉, 戴翠琴, 徐晖, 等. 面向 6G 的星地融合一体化组网研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 891-901.  
SUN S H, DAI C Q, XU H, et al. Survey on satellite-terrestrial integration networking towards 6G[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(6): 891-901.
- [3] 李子凡. 无线回程网资源分配与优化机制[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.  
LI Z F. Resource allocation and optimization for wireless backhaul networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [4] YUAN X X, TIAN H, NIE G F. Joint access and backhaul link optimization in multiple UAV-assisted emergency network[C]//Proceedings of 2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 735-740.
- [5] HUANG P H, KAO H, LIAO W. Cross-tier cooperation for optimal resource utilization in ultra-dense heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(12): 11193-11207.
- [6] RONY R I, JAIN A, LOPEZ-AGUILERA E, et al. Joint access-backhaul perspective on mobility management in 5G networks[C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking. Piscataway: IEEE Press, 2017: 115-120.
- [7] MIRAHSAN M, FARMANBAR H, YANIKOMEROGLU H. Joint backhaul and access optimization for service-segment-based VN admission control[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [8] MENG X Y, YEOH P L, KRONGOLD B. Joint backhaul-access optimization in full-duplex heterogeneous networks[C]//Proceedings of 2018 IEEE Globe com Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [9] DHIFALLAH O, DAHROUJ H, AL-NAFFOURI T Y, et al. Joint hybrid backhaul and access links design in cloud-radio access networks[C]//Proceedings of 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [10] SHARIAT M, PATEROMICHELAKIS E, QUDDUS A U, et al. Joint TDD backhaul and access optimization in dense small-cell networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(11): 5288-5299.
- [11] TRAN T D, LE L B. Joint wireless access-backhaul network slicing and content caching optimization[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [12] 樊超, 孙长印, 江帆. 异构网络中基于系统公平性和阻塞性对功率分配的一种动态规划算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 187-194.  
FAN C, SUN C Y, JIANG F. A dynamic programming algorithm for power allocation based on system fairness and blocking in heterogeneous networks[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 187-194.
- [13] 毕峰. 基于 5G 无线接入和无线回程一体化的增强技术研究[J]. 电信科学, 2022, 38(5): 173-178.  
BI F. Research on the enhancement technology based on the 5G wireless access and wireless backhaul integration[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(5): 173-178.
- [14] 贾向东, 纪珊珊, 范巧玲, 等. 基于非正交接入的多层全双工异构网回程方案及性能研究[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 945-951.  
JIA X D, JI S S, FAN Q L, et al. Backhaul scheme and performance study of full-duplex multi-tier heterogeneous networks based on non-orthogonal multiple access[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(4): 945-951.
- [15] 管清琴, 赵新胜. URLLC 业务建模与仿真[EB]. 2019.  
GUAN Q Q, ZHAO X S. Service modeling and simulation for URLLC[EB]. 2019.
- [16] MET16-D21 ICT-671680 METIS-II. Performance evaluation framework[R]. 2016.
- [17] 罗峻锋. 星地融合网络中的用户关联和流量卸载研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.  
LUO J F. Research on user association and traffic offloading in satellite-terrestrial integrated networks[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [18] 冯宏. 超密集网络中无线回程算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.  
FENG H. Research on wireless backhaul algorithms in ultra-dense networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [19] DI B Y, ZHANG H L, SONG L Y, et al. Ultra-dense LEO: integrating terrestrial-satellite networks into 5G and beyond for data offloading[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(1): 47-62.
- [20] YANG B, MAO G Q, DING M, et al. Dense small cell networks: from noise-limited to dense interference-limited[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(5): 4262-4277.
- [21] KAMEL M, HAMOUDA W, YOUSSEF A. Ultra-dense networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2522-2545.
- [22] HOSSAIN E, LEUNG K. Wireless mesh networks[M]. Boston, MA: Springer US, 2007.
- [23] RAZZAQA A, MEHAOU A A. Layered video transmission using wireless path diversity based on grey relational analysis[C]//Proceedings of 2011

- IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [24] KUHN H W, CORNUEJOLS G, ZAMBELLI G. Integer programming (graduate texts in mathematics)[M]. USA: Springer, 2014.
- [25] 付奕威. 异构无线网络中基于用户特征的接入与回程一体化资源分配方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- FU Y W. Research on integrated resource allocation method of access and backhaul based on user characteristics in heterogeneous wireless networks[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [26] KUHN H W. The Hungarian method for the assignment problem[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1955, 2(1/2): 83-97.
- [27] CAUCHY A. Methode generale pour la resolution des systems d'equations simultanees[J]. Comp. Rend. Sci. Paris, 25 (1847), 46-89.
- [28] RAEIS M, SHAHTALEBI K, FOROUZAN A R. Computationally efficient adaptive algorithm for resource allocation in orthogonal frequency-division multiple-access-based cognitive radio networks[J]. IET Communications, 2015, 9(12): 1442-1449.
- [29] 3GPP. Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9): TR 36.814 V9.0.0[R]. 2010.
- [30] POLESE M, GIORDANI M, ROY A, et al. End-to-end simulation of integrated access and backhaul at mmWaves[C]//Proceedings of 2018 IEEE 23rd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.

## [作者简介]



李庆洋 (1998- ), 男, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线通信。



李雪婷 (2000- ), 女, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为场域网。



朱晓荣 (1977- ), 女, 博士, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为 5G/6G 通信系统、异构网络、物联网等关键技术及系统研发。