

# 一种基于接入与回传一体化小基站的用户满意度最大化算法

唐伦 刘云龙 赵旭 马润琳 陈前斌\*  
(重庆邮电大学移动通信技术重点实验室 重庆 400065)

**摘要:** 针对接入与回传一体化小基站场景下用户个性化视频流业务需求问题, 该文提出一种基于接入与回传一体化小基站的用户满意度最大化算法。该算法首先根据系统实际可达速率和用户满意度需求速率间的不匹配程度, 动态调整下一周期队列传输所需频谱资源, 并建立用户质量满意度最大化模型, 其次运用Lyapunov优化方法把初始问题转化为Lyapunov偏移加罚项的优化, 将溢出概率约束转化为关于自变量的不等式, 最后基于拉格朗日对偶分解的用户接入带宽分配算法和基于内点法的回传和接入带宽分配算法进行求解。仿真结果表明, 该算法提高了系统用户质量满意度, 同时保证了系统稳定性。

**关键词:** 接入与回传一体化小基站; 视频流业务; 用户质量满意度; 李雅普诺夫优化方法

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)09-2088-08

DOI: 10.11999/JEIT171169

## A User Satisfaction Maximization Algorithm Based on Access and Backhaul Integrated Small Base Station

TANG Lun LIU Yunlong ZHAO Xu MA Runlin CHEN Qianbin  
(Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** To meet the personal quality requirement of video streaming service under the access and backhaul integrated small base station scene, a user satisfaction maximization algorithm is proposed. The algorithm adjusts dynamically the spectrum resources used for next-cycle queue transmission by analysis the mismatch degree between the actual system reachable rate and user satisfaction demand rate. The corresponding optimization model of the quality satisfaction of all users is established. Then, the Lyapunov stochastic optimization method is used to transform the initial problem into drift plus penalty, the overflow probability constraint is transformed into inequality of variables. Finally, using the proposed user access bandwidth allocation algorithm based on Lagrange dual decomposition and the backhaul and access bandwidth allocation algorithm based on interior point method. The simulation results show that the algorithm can improve the quality satisfaction of all users and ensure the system stability.

**Key words:** Access and backhaul integrated small base station; Video streaming; Quality satisfaction of all users; Lyapunov-based optimization

### 1 引言

随着智能终端的普及和移动宽带业务的丰富, 网络流量与日俱增。为了满足移动数据业务的快速发展, 运营商通过提升频谱效率来提升网络容量<sup>[1]</sup>。宏基站(Macro Base Station, MBS)通过小区分裂或增加基站数量来提升小区密度。5G通信系统

中, 低功率无线接入与回传一体化小基站(Small Base Station, SBS)作为实现超密集网络部署的关键技术<sup>[2]</sup>。如何对接入与回传一体化小基站资源进行高效分配是有效实现小基站灵活部署首要考虑的因素, 也是提高频谱利用率的有效方法。

无线接入与回传一体化小基站资源分配现已成为当下研究的热点。文献<sup>[3]</sup>中移动前传和回传承载以有线光纤直连的方式, 存在资源消耗严重、部署复杂等问题。文献<sup>[4]</sup>为了降低部署成本、提高资源利用率, 提出用微波通信, 该文献未考虑非视距传播场景, 需要增加节点数量, 这样不免增加CAPEX和OPEX。文献<sup>[5]</sup>为了提高无线容量, 在

收稿日期: 2017-12-12; 改回日期: 2018-05-07; 网络出版: 2018-07-12

\*通信作者: 陈前斌 cqbc@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61571073)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61571073)

无线接入与回传中采用点到多点毫米波传输方式和自回传技术，该文献仅仅考虑了频谱资源。文献[6]研究了两跳异构网络下的无线资源分配问题，提出了一种以吞吐量最大化作为优化目标的动态资源分配算法，文中只考虑了静态优化，未考虑用户服务质量满意度问题。

基于以上研究，本文首先联合考虑用户数据包到达的随机性和信道状态的时变性，在保证溢出概率约束、平均回传速率约束、队列稳定性的前提下建立了用户质量满意度最大化的动态优化模型。其次运用Lyapunov随机优化方法把初始问题转化为Lyapunov偏移加惩罚项的优化<sup>[7]</sup>。相关研究证明其为非凸优化问题，最后，为了解决此问题，将原问题分解成用户回传带宽分配子问题和用户接入带宽分配子问题、回传和接入带宽分配子问题，分别采用拉格朗日对偶分解的用户接入带宽分配算法和基于内点法的回传和接入带宽分配算法进行求解。

## 2 系统模型与小基站资源调度问题数学建模

### 2.1 场景部署

本文系统场景图如图1所示，设用0代表MBS，该MBS使用大规模MIMO天线，天线阵列数为 $K_T$ ，波束赋形组大小为 $K_g$ ，使用迫零波束赋形方法给波束赋形组分配正交的频谱-时间域资源<sup>[8]</sup>。在MBS覆盖范围内有一个SBS，用1代表SBS，SBS和MBS之间采用带内毫米波传输。有 $K$ 个用户(Users, UEs)随机分布，UEs集合记为 $U = \{1, 2, \dots, k\}$ ，且都采用单天线技术。

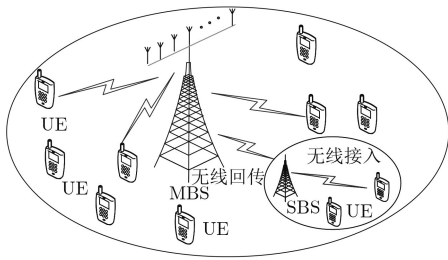


图1 系统场景图

### 2.2 用户业务模型

时隙 $t$ 时，用户 $k$ 在MBS和SBS处的队列长度分别为 $Q_k^0(t)$ 和 $Q_k^1(t)$ ，则用户队列的更新过程是

$$Q_k^0(t+1) = \max[Q_k^0(t) + A_k^0(t) - D_k^{bh}(t), 0] \quad (1)$$

$$Q_k^1(t+1) = \max[Q_k^1(t) + D_k^{bh}(t) - D_k^{ra}(t), 0] \quad (2)$$

其中， $A_k^0(t)$ 是用户 $k$ 在时隙 $t$ 到达的数据包数量，且到达过程服从参数为 $\lambda_k$ 的泊松分布， $D_k^{bh}(t)$ 为MBS在时隙 $t$ 向SBS发送的数据包数量， $D_k^{ra}(t)$ 为

SBS在时隙 $t$ 向用户发送的数据包数量。

对于回程链路，只传输MBS处排队的数据包，而接入链路包含MBS和SBS处排队的数据包发送给用户。因此，定义用户 $k$ 在时隙 $t$ 时回程链路的队列长度 $Q_k^{ba}(t)$ 和接入链路的队列长度 $Q_k^{ra}(t)$ 分别是

$$Q_k^{ba}(t) = Q_k^0(t) \quad (3)$$

$$Q_k^{ra}(t) = Q_k^0(t) + Q_k^1(t) \quad (4)$$

为了保证系统队列稳定性，将UEs需要通过回程和接入链路传送的数据包数量相加作为用户的等效队列长度 $Q_k(t)$ ，则UE下一时隙的队列长度 $Q_k(t+1)$ 动态更新过程是

$$Q_k(t+1) = \max[2Q_k^0(t) + Q_k^1(t) + 2A_k^0(t) - D_k^{bh}(t) - D_k^{ra}(t), 0] \quad (5)$$

**定义 1** 每个用户 $k$ ，若关于时间的平均队列长度 $\bar{Q}_k \triangleq \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E\{|Q_k(t)|\} < \infty, \forall k \in U$ ，则队列是稳定的。其中， $T$ 为观察的周期， $E$ 为在周期 $T$ 内对用户 $k$ 的队列长度取平均值。

### 2.3 用户满意度问题建模

根据文献[8]，SBS接入和回传链路共享相同频谱能有效加倍无线容量，提高部署的灵活性。因此，假定系统中无线接入和回传使用同频传输，信道模型是瑞利信道，总频谱带宽是单位1，系统中SBS带内无线回传带宽分配比例 $\beta \in [0, 1]$ ，在整个系统中不考虑干扰，且只考虑下行状态时的自回传传输。

时隙 $t$ 时，可得UE $k$ 无线接入SBS的理论传输速率是

$$R_{kh}(t) = (1 - \beta)\eta_{1,k} \log_2(1 + \gamma_{1,k}(t)) \quad (6)$$

SBS无线接入的理论总吞吐量是

$$R_{th}(t) = \sum_{k \in U} R_{kh}(t) \quad (7)$$

其中， $\eta_{1,k}$ 既是用户 $k \in U$ 和SBS的关联因子，也是每个UE接入带宽的分配比例，且有 $0 < \eta_{1,k} \leq 1$ 。对于所有SUEs总的带宽分配比例 $0 < \sum_{k \in U} \eta_{1,k} \leq 1$ ，保证了任一时隙每个UE最多只能连接到一个基站， $\gamma_{1,k}(t)$ 表示UE $k$ 与SBS之间的SNR，表示为

$$\gamma_{1,k}(t) = P\bar{L}_{1,k}(t)/N_0 \quad (8)$$

其中， $P$ 是SBS的传输功率， $\bar{L}_{1,k}(t)$ 是时隙 $t$ 时SBS到UE的信道增益，且服从均值为 $l$ 的指数分布， $N_0$ 为噪声功率。

SBS无线回传的理论吞吐量是

$$C_{th}(t) = \beta \log_2 \left( 1 + \frac{K_T - K_g + 1}{K_g} \gamma_{0,k}(t) \right) \quad (9)$$

其中,  $\gamma_{0,k}(t)$ 表示MBS与UE间的SNR, 表示为

$$\gamma_{0,k}(t) = P_0 \overline{H_{0,k}}(t) / N_0 \quad (10)$$

其中,  $P_0$ 是MBS的传输功率,  $\overline{H_{0,k}}(t)$ 是时隙 $t$ 时MBS到UE的信道增益, 且服从均值为 $h$ 的指数分布。

所以, UE  $k$ 无线回传的理论传输速率是

$$C_{k_{th}}(t) = \mu_k C_{th}(t) \quad (11)$$

其中,  $\mu_k$ 为每个UE  $k$ 回传带宽的分配比例, 且有  $0 < \mu_k \leq 1$ , 对于所有UEs总的带宽分配比例  $0 < \sum_{k \in U} \mu_k \leq 1$ 。

在模型中一个时隙长度是1 ms, SBS在接收回传数据时, 由于时间较短不能马上转发给相应的UEs, 且用户实际的传输速率取决于每秒传输的最大比特数和瞬时信道质量。则UE  $k$ 接入和回程链路实际的传输速率 $R_k(t)$ 和 $C_k(t)$ 分别为

$$R_k(t) = \min\{R_{k_{th}}(t), Q_k^1(t) \times 1000S\} \quad (12)$$

$$C_k(t) = \min\{C_{k_{th}}(t), [Q_k^0(t) + A_k^0(t)] \times 1000S\} \quad (13)$$

其中,  $S$ 是数据包长度, 取值为200 bit。

因此, SBS实际可达接入速率为

$$R(t) = \sum_{k \in U} R_k(t) \quad (14)$$

SBS实际可达回传速率为

$$C(t) = C_k(t) / \mu_k, k \in U \quad (15)$$

为了防止UEs的数据在SBS处无限积压, 常在某一时刻 $t$ 上设置无线自回传SBS的回传速率约束<sup>[4]</sup>。文中考虑无线信道的时变性, 所以, 本文为SBS提供长时平均回传速率保证。

$$\overline{R} \leq \overline{C} \quad (16)$$

其中,  $\overline{R}, \overline{C}$ 分别是SBS接入和回传的平均速率。

在本文优化模型中, 假定网络中只有视频流业务。根据文献[9]引入用户服务质量满意度等级  $U(R_k(t)) = \text{PSNR}_k(t) = \zeta \log_2(R_k(t))$ , 其中,  $\zeta$ 是和UE业务类型相关的系数, PSNR为峰值信噪比。为了优化数值, 定义相对用户质量满意度等级:

$$s_k(t) = \begin{cases} \frac{U(R_k(t))}{U^E}, & 0 \leq U(R_k(t)) \leq U^E \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

其中,  $U^E$ 是UE的服务质量需求等级, 取值为30。

考虑UEs服务质量满意度要求的速率和实际可达速率间的不匹配程度。引入溢出概率的定义, 系统可达速率低于用户服务质量要求的速率值时的概

率。以平均时间内相对用户服务质量满意度

$$\overline{s}_k = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E \left\{ \sum_{k=1}^K s_k(\beta, \eta_{1,k}, \mu_k, t) \right\}$$

最大化为

$$\left. \begin{aligned} & \max \quad \overline{s}_k \\ & \text{s.t.} \quad P(C_t > R(t))_{\text{over}} < \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式(18)表示溢出概率需要限定在一定范围内,  $C_t$ 为Qos要求的速率, 且总有实际速率 $R(t) \geq R_{\min}$ 且 $R(t) \leq R_{\max} = R_{th}(t)$ ,  $R_{\min}$ 为UE信干噪比阈值 $r_{\min}$ 对应的速率值,  $\varepsilon$ 是溢出概率需要满足的阈值。

所以, 本文中带内无线接入与回传一体化小基站资源调度的目标函数即可表示为

$$\left. \begin{aligned} \text{P1: } & \max_{\beta, \eta_{1,k}, \mu_k} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E \left\{ \sum_{k=1}^K s_k(\beta, \eta_{1,k}, \mu_k, t) \right\} \\ & \text{s.t.} \quad \text{C1: } \overline{Q}_k < \infty, \forall k \in U \\ & \quad \text{C2: } \overline{R} \leq \overline{C} \\ & \quad \text{C3: } 0 < \eta_{1,k} \leq 1, \forall k \in U \\ & \quad \text{C4: } 0 < \sum_{k \in U} \eta_{1,k} \leq 1, \forall k \in U \\ & \quad \text{C5: } 0 < \mu_k \leq 1, \forall k \in U \\ & \quad \text{C6: } 0 < \sum_{k \in U} \mu_k \leq 1, \forall k \in U \\ & \quad \text{C7: } 0 \leq \beta \leq 1 \\ & \quad \text{C8: } 0 \leq U(R_k(t)) \leq U^E \\ & \quad \text{C9: } P(C_t > R(t))_{\text{over}} < \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

其中, C1为系统队列稳定的限制条件, C2为SBS平均回传速率约束条件, C3, C4和C5, C6分别为接入和回程链路资源分配给每个UE的限制条件, C7是SBS带内无线回传带宽分配约束, C8为相对用户服务质量满意度的约束, C9为溢出概率的约束条件。

### 3 优化性能与算法分析

#### 3.1 优化性能分析

式(19)是一个时间平均的随机优化问题, 为了便于处理约束条件C9, 将其转化为不等式:

$$M = \frac{C_t}{\log_2 \left( \frac{\ln(1-\varepsilon)Pl}{N_0} + 1 \right)} < \sum_{k \in U} \eta_{1,k}(1-\beta) \quad (20)$$

在任一时刻 $t$ 时 $M$ 为一个定值。

参考文献[7], 用Lyapunov优化方法将问题P1转化成单时隙上Lyapunov偏移加罚的上界。为确保C2所需的长时平均不等式约束, 把约束C2转化为单时隙上的虚拟队列 $Y_k(t)$ ,  $Y_k(t)$ 动态更新为

$$Y_k(t+1) = \max[Y_k(t) + R(t) - C(t), 0] \quad (21)$$

其中,  $R(t)$ 和 $C(t)$ 分别表示在时隙 $t$ 虚拟队列中开始到达的和离开的数据包数量, 但虚拟队列 $Y_k(t)$ 并不表示任何实际队列或数据。

**引理 1** 若资源调度算法可保证虚拟队列 $Y_k(t)$ 回传速率大于等于接入速率是稳定的, 则它自动满足平均约束C2。证明过程参考文献[10]。

基于引理1, 定义时隙 $t$ 时用户队列状态为 $Q(t) = (Q_1(t), Q_2(t), \dots, Q_k(t))$ , 令 $\Psi(t) = [Q(t), Y(t)]$ 为级联向量, 表示系统队列状态向量。定义Lyapunov函数为

$$L(\Psi(t)) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K Q_k^2(t) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K Y_k^2(t) \quad (22)$$

假设当 $t = 0$ 时所有队列为空, 有 $L(\Psi(0)) = 0$ ,

$$\begin{aligned} \Delta(\Psi(t)) - VE \left\{ \sum_{k=1}^K s_k(\eta_{1,k}, \beta, \mu_k, t) | \Psi(t) \right\} &\leq B + E \left\{ \sum_{k=1}^K \{ [2Q_k^0(t) + Q_k^1(t)] [2A_k^0(t) - D_k^{bh}(t) - D_k^{ra}(t)] | \Psi(t) \} \right. \\ &\quad + E \left\{ \sum_{k=1}^K Y_k(t) (R(t) - C(t)) | \Psi(t) \right\} \\ &\quad \left. - VE \left\{ \sum_{k=1}^K s_k(\eta_{1,k}, \beta, \mu_k, t) | \Psi(t) \right\} \right\} \quad (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{P2: } \min_{\beta, \eta_{1,k}, \mu_k} \sum_{k \in U} f(\eta_{1,k}(t), \mu_k(t), \beta(t)) \\ = \sum_{k=1}^K [2Q_k^0(t) + Q_k^1(t)] [(-C_{k_{th}}(t)/S - R_{k_{th}}(t)/S) + \sum_{k=1}^K Y_k(t) \left( \sum_{k \in U} R_{k_{th}}(t) - \frac{C_{k_{th}}(t)}{\mu_k} \right) + V \left[ -\frac{\zeta}{UE} \log_2(R_{k_{th}}(t)) \right]] \\ \text{s.t. C3} \sim \text{C7; C8: } \frac{1}{\log_2(1 + \gamma_{1,k}(t))} \leq (1 - \beta)\eta_{1,k} \leq \frac{2^{\frac{UE}{\zeta}}}{\log_2(1 + \gamma_{1,k}(t))}; \quad \text{C9: } M < \sum_{k \in U} \eta_{1,k}(1 - \beta) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\mu_k^* = \begin{cases} 1, & k = \arg \min \left\{ \sum_{k=1}^K [2Q_k^0(t) + Q_k^1(t)] \left[ -\beta \log_2 \left( 1 + \frac{K_T - K_g + 1}{K_g} \gamma_{0,k}(t) \right) / S \right] \right\} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (27)$$

### 3.2 算法分析

由于目标方程式(26)是一个非凸优化问题, 且方程中变量规模比较庞大, 使得求解变得十分复杂。参考文献[11]的层次分解法将问题P2分成UE回传带宽分配问题P2.1和UE接入带宽分配问题P2.2、回传和接入带宽分配问题P2.3并分别求解, 首先假设 $\beta$ 变量固定, 分别获得P2.1和P2.2的局部最优解 $\mu_k^*$ 和 $\eta_{1,k}^*$ , 然后基于方案 $\mu_k^*$ ,  $\eta_{1,k}^*$ 对初始 $\beta$ 值更新, 并多次迭代后得到问题P2的全局最优解 $\mu_k^*$ ,  $\eta_{1,k}^*$

该函数表明系统的拥塞程度, 其值越大, 队列越长。

定义单时隙的Lyapunov偏移为

$$\Delta(\Psi(t)) \triangleq E\{L(\Psi(\tau+1)) - L(\Psi(t)) | \Psi(t)\} \quad (23)$$

得到Lyapunov 偏移加罚为

$$\Delta(\Psi(t)) - VE \left\{ \sum_{k=1}^K s_k(\eta_{1,k}, \beta, \mu_k, t) | \Psi(t) \right\} \quad (24)$$

其中,  $V > 0$ 是权衡偏移与罚函数的控制参数。

**引理 2** 在任意时隙 $t$ , 系统队列状态 $\Psi(t)$ 和控制参数 $V > 0$ 时, 式(24)一定存在一个上界, 表示为式(25)。其中,  $B$ 是一个有限正常数, 证明过程参考文献[7]。

当 $C_{k_{th}}(t)/S < [Q_k^0(t) + A_k^0(t)] \times 1000$ ,  $R_{k_{th}}(t)/S < Q_k^1(t) \times 1000$ 时, 将P1问题转化为偏移加罚项的上界, 表示为式(26)。

和 $\beta^*$ 。

无线接入与回传一体化小基站的UE回传带宽分配问题决定了每一时隙 $t$ 时用户队列的积压, 由P2.1可得出UE回传带宽分配局部最优解 $\mu_k^*$ 为式(27)。式(27)表示在每一时隙 $t$ , 基站通过联合选择队列积压较多且信道质量较好的用户服务。

UE接入带宽分配方案决定了用户的实际可达速率, 由凸优化理论可证明P2.2在定义域上是关于自变量 $\eta_{1,k}$ 的凸优化问题。使用拉格朗日对偶分解

法求最优解, 利用KKT条件, 对拉格朗日函数求 $\eta_{1,k}$ 的导数, 得到局部最优解必要条件为

$$\eta_{1,k} = \frac{V\zeta}{UE \ln 2} \frac{1}{\phi} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \phi = & [2Q_k^0(t) + Q_k^1(t)] [-(1-\beta)\log_2(1+\gamma_{1,k}(t))/S] \\ & + Y_k(t) \left( \sum_{k \in U} (1-\beta)\log_2(1+\gamma_{1,k}(t)) \right) \\ & + \pi_k - o_k + \delta_k - \sigma_k \end{aligned} \quad (29)$$

可看出每个用户 $k$ 可通过具体的拉格朗日乘子 $\pi$ 和 $o$ 和 $\delta$ 和 $\sigma$ 和求出对应的 $\eta_{1,k}$ 。随后采用梯度法更新 $\pi^{(n)}$ ,  $o^{(n)}$ ,  $\delta^{(n)}$ ,  $\sigma^{(n)}$ , 当迭代次数足够多时可以求

$$\begin{aligned} a = & [2Q_k^0(t) + Q_k^1(t)] \left[ -\mu_k^* \log_2 \left( 1 + \frac{K_T - K_g + 1}{K_g} \gamma_{0,k}(t) \right) / S + \eta_{1,k}^* \log_2(1 + \gamma_{1,k}(t)) / S \right] \\ & + Y_k(t) \left( -\eta_{1,k}^* \log_2(1 + \gamma_{1,k}(t)) - \log_2 \left( 1 + \frac{K_T - K_g + 1}{K_g} \gamma_{0,k}(t) \right) \right), \\ b = & -V \frac{\zeta}{UE \ln 2} - \chi_k, \quad c = \eta_{1,k}^* \log_2(1 + \gamma_{1,k}(t)), \quad d = 2^{\frac{V\zeta}{c}}, \quad e = \sum_{k \in U} \eta_{1,k}^* \end{aligned}$$

基于内点法的回传和接入带宽分配方案具体算法步骤见表2的算法2。

综上各个子问题的分析, 基于接入与回传一体化小基站的用户满意度最大化全局算法可总结为表3的算法3。实际上, 算法3是一个分布式迭代算法。

当迭代次数足够多时可以通过分布式迭代算法求得初始问题的近似全局最优解。

#### 4 性能仿真与结果分析

为验证本文为最大化相对用户质量满意度(Relative Quality Satisfaction of All Users, RQSAU)而提出的基于Lyapunov优化的动态资源调度算法(Lyapunov-based Dynamic Resource Scheduling, LDRS)的有效性。搭建1个宏基站固定部署在中心、1个小基站和多个用户随机撒点的仿真场景并进行仿真, 先证明Lyapunov优化方法的性能, 再将文献[12]中的理想CQI下资源分配算法

表1 基于拉格朗日对偶分解的用户接入带宽分配算法

算法1 基于拉格朗日对偶分解的用户接入带宽分配算法
步骤1 初始化 $\pi^{(0)}$ , $o^{(0)}$ , $\delta^{(0)}$ , $\sigma^{(0)}$ , $\beta = 0.1$ , 终止条件 $\Delta_1 = 10^{-2}$ ;
步骤2 根据P2.2式(28)求计算UE接入带宽分配 $\eta_{1,k}$ 的表达式;
步骤3 判定式 $\ Y^{(n+1)}(t) - Y^{(n)}(t)\  \leq \Delta_1$ , 若满足, 则执行步骤6, 否则执行步骤4;
步骤4 根据梯度法更新对偶变量 $\pi^{(n)}$ , $o^{(n)}$ , $\delta^{(n)}$ , $\sigma^{(n)}$ ;
步骤5 $n = n + 1$ , 将更新的拉格朗日乘子值代入P2.2式(28)中计算, 得到新的用户接入带宽分配比例, 并跳转步骤3;
步骤6 获得UE接入带宽分配方案 $\eta_{1,k}^*$ 。

得问题P2.2的近似局部最优解。具体算法见表1的算法1。

UE回传带宽分配方案的局部最优解 $\mu_k^*$ 和UE接入带宽分配方案的局部最优解 $\eta_{1,k}^*$ 分别代入问题P2中, 将回传和接入带宽分配问题简化为子问题P2.3。同理, 可知P2.3是一个凸优化问题, 采用内点法获得回传和接入带宽分配方案。令 $\nabla\varphi(\beta, \chi, \rho, \kappa, \varpi) = 0$ , 为方便, 记 $1 - \beta = \partial$ , 得

$$\partial = \frac{b}{a + \frac{\rho_k}{c\partial - 1} + \frac{\kappa_k}{c\partial - d} + \frac{\varpi_k}{e\partial - M}} \quad (30)$$

其中,

(Perfect CQI)和文献[13]中的比例公平资源分配算法(Proportional-Fair algorithms, PF)、基于自回传的静态资源分配(SA-SBL)算法作为基准和本文LDRS算法对比分析。具体仿真参数设置如表4。

图2刻画了连续1000个时隙上虚拟队列的积压包数, 可看出时隙的增加会引起虚拟队列积压的增

表2 基于内点法的回传和接入带宽分配算法

算法2 基于内点法的回传和接入带宽分配算法

步骤1 取初始 $\chi^{(0)}$ ,  $\rho^{(0)}$ ,  $\kappa^{(0)}$ ,  $\omega^{(0)}$ 都 $>0$ , 一般取各自初始值为1, 误差 $\Delta_2 = 10^{-3} > 0$ ;

步骤2 用随机数生成法生成多个初始点, 并选取满足约束条件的初始点 $\beta^{(0)}$ , 令 $n = 1$ ;

步骤3 构造惩罚函数 $\varphi(\beta, \chi^{(n)}, \rho^{(n)}, \kappa^{(n)}, \varpi^{(n)})$ , 从 $\beta^{(n-1)}$ 点出发用无约束优化方法求惩罚函数的极值点:

$$\beta^* \left( \chi^{(n)}, \rho^{(n)}, \kappa^{(n)}, \varpi^{(n)} \right)$$

步骤4 检查迭代终止准则: 如果满足

$$\left| \frac{\Delta\varphi}{\varphi(\beta^*, \chi^{(n-1)}, \rho^{(n-1)}, \kappa^{(n-1)}, \varpi^{(n-1)})} \right| \leq \Delta_2$$

其中,

$$\begin{aligned} \Delta\varphi = & \varphi \left( \beta^*, \chi^{(n)}, \rho^{(n)}, \kappa^{(n)}, \varpi^{(n)} \right) \\ & - \varphi \left( \beta^*, \chi^{(n-1)}, \rho^{(n-1)}, \kappa^{(n-1)}, \varpi^{(n-1)} \right) \end{aligned}$$

则停止迭代计算, 并以 $(\beta^*, \chi^{(n)}, \rho^{(n)}, \kappa^{(n)}, \varpi^{(n)})$ 作为目标函数P2.3的局部最优解, 否则转步骤5;

步骤5 缩小惩罚因子,  $n = n + 1$ , 转向步骤3。递减系数

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 通常取值0.1。

表 3 基于接入与回传一体化小基站的用户满意度最大化全局算法

**算法3** 基于接入与回传一体化小基站的用户满意度最大化全局算法

步骤1 初始化带宽分配比例 $\beta$ 和误差 $\Delta = 10^{-5}$ ;

步骤2 根据式(27)求子问题P2.1UE回传带宽分配方案的局部最优解 $\mu_k^*$ ;

步骤3 根据算法1求问题P2.2每个用户的接入带宽分配方案的局部最优 $\eta_{1,k}^*$ ;

步骤4 将最优解 $\mu_k^*$ 与最优解 $\eta_{1,k}^*$ 代入式(26), 根据算法2求问题P2.3回传带宽分配比例的局部最优解 $\beta^*$ ;

步骤5 将 $\mu_k^*$ 与 $\eta_{1,k}^*$ ,  $\beta^*$ 代入到最初目标问题P2中, 检查收敛条件  $\|f(\eta_{1,k}^{(n)}(t), \mu_k^{(n)}(t), \beta^{(n)}(t)) - f(\eta_{1,k}^{(n-1)}(t), \mu_k^{(n-1)}(t), \beta^{(n-1)}(t))\| \leq \Delta$ 是否满足, 否则令 $\beta = \beta^*$ , 并依此执行步骤2~步骤5; 当满足收敛条件, 则获得最初问题P2的全局最优解 $\beta^*$ ,  $\eta_{1,k}^*$ 和 $\mu_k^*$ 。

表 4 仿真参数

参数	数值	参数	数值
载波频率	3.5 GHz	总用户数	15
天线阵列数 $K_T$	100	波束成形组大小 $K_g$	20
噪声功率谱密度 $N_0$	-174 dBm/Hz	宏基站天线模型	MIMO波束赋形 <sup>[6]</sup>
宏基站发送功率 $P_0$	46 dBm	天线阵列数目是 $K_T$	100
小基站发送功率 $P$	33 dBm	业务相关系数 $\zeta$	6, 9, 12
用户业务模型	到达率1 packet/slot	业务质量需求 $U^E$	30, 45, 60

大, 当时隙到达一定数值后, 虚拟队列积压将会趋于一个稳定值。这与引理1中资源调度算法可保证虚拟队列 $Y_k(t)$ 回传速率大于等于接入速率是稳定的相吻合。图3表明用户数据队列积压随时隙的增加先是增大, 随后逐渐趋于平稳的波动, 说明了Lyapunov优化方法能保证系统队列的稳定性。图3也可看出, 队列大小总会趋于某一个稳定值, 而参

数 $V$ 越大, 稳定值就越高。

图4是不同 $V$ 下, RQSAU和业务类型相关系数 $\zeta$ 、溢出概率的阈值 $\varepsilon$ 之间的关系图。同一阈值 $\varepsilon$ 下, 业务系数 $\zeta$ 越小, RQSAU变化范围越大。由式(17)知, 较小 $\zeta$ 时要达到用户需求, 需要更多的资源去实现更高的传输速率。当 $\zeta$ 一定时, RQSAU随阈值 $\varepsilon$ 减少而增加, 因为当 $\varepsilon$ 减少时, 溢出概率可忍受的范围会缩小, 用户的实际可达速率会更大。

从图5可看出, 在PF, SA-SBL, LDRS 3个算法中, LDRS平均队列积压随平均到达率的增加而增加的速度最慢。当平均到达率增加超过一定值时, LDRS队列积压变化很小且最接近理想CQI方案的平均队列积压。原因在于SA-SBL方案采用静态配置资源的方式, 使得资源需求量和现有量的不匹配, 会造成资源的浪费。算法PF存在信道质量差时用户数据包未提供服务的情况。算法理想CQI是一种在特定假设资源无限且用户信道状态好时的算

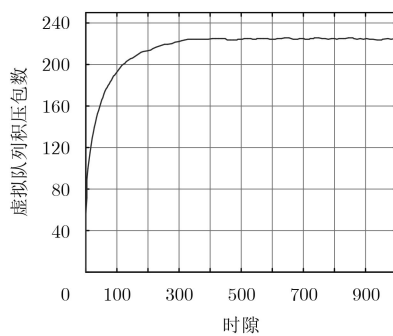


图 2 虚拟队列积压

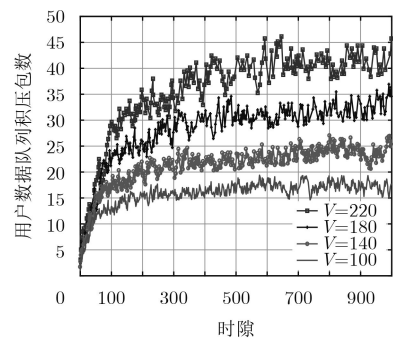


图 3 用户在连续时隙上的队列积压

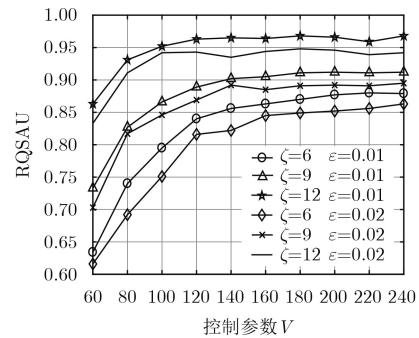


图 4 RQSAU与控制参数 $V$ 的关系

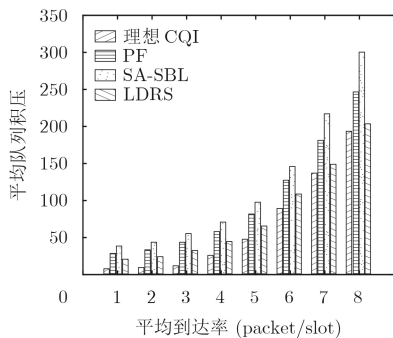


图5 不同资源分配方案的平均队列积压比较

法，当数据包需求量超过资源量时，队列积压会不断增大，且其实现较困难。而本文提出的LDRS算法是在Lyapunov随机优化方法基础上，通过QSI更新、CSI观察和溢出概率来动态调整下一周期频谱资源的分配。综合这4种方案可以看出LDRS算法在平均队列积压方面有了较大提升。

图6比较了4种算法下RQSAU和队列稳定性的比较情况。理想CQI, LDRS和PF这三个方案随着控制参数 $V$ 的增加, RQSAU都会有大幅度提升, 因为理想CQI是一种理想信道状态的以最大化吞吐量为目标的方案, LDRS和PF都采取了动态资源分配的方法。而相比较另外两种方案, 因为LDRS采用了基于Lyapunov优化的动态资源调度算法调整下一时隙的频谱资源分配量。可看出, 当控制参数 $V$ 超过一定值时, LDRS算法的队列稳定性最好, 且此时的RQSAU很逼近理想CQI算法的值。而SA-SBL是静态地对资源进行分配, 也未考虑信道状态情况。因此, 在相同的控制参数下, SA-SBL算法的RQSAU值最小, 且队列稳定性最差。

图7为4种算法随系统总用户数量增加峰值信噪比PSNR的变化比较。从图中看出, 随着用户数增加时, 峰值信噪比PSNR也会逐渐增大并逐渐趋于

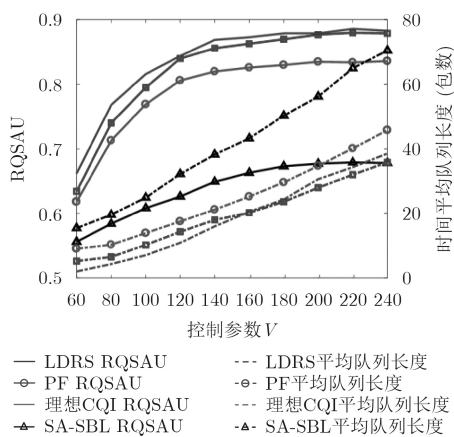


图6 不同资源分配方案的RQSAU和队列稳定性比较

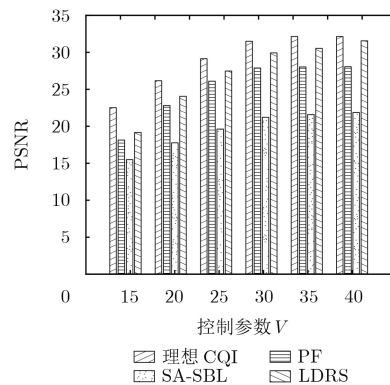


图7 不同资源分配方案的PSNR比较

稳定, 这是因为资源是有限的。图中显示LDRS算法能够实现的最高峰值信噪比接近理想CQI的PSNR, 而且LDRS算法比较容易实现。PF, LDRS算法的PSNR明显高于SA-SBL算法, 很好地体现了资源动态分配的有效性。而LDRS算法在用户数较多时, 其PSNR值会明显高于PF算法的值。这是因为LDRS算法不仅考虑了信道状态信息, 还考虑了用户的排队情况, 可以实时根据队列的积压情况、CQI等来及时动态调整分配的资源。

## 5 结束语

针对接入与回传一体化小基站场景下用户个性化视频流业务需求问题, 本文提出了一种基于无线接入与回传一体化小基站的 用户满意度最大化算法。该算法根据系统实际可达速率和用户满意度需求速率之间的不匹配程度, 动态调整下一周期队列传输所需频谱资源并建立用户质量满意度最大化模型, 最后运用Lyapunov随机优化方法把初始问题转化为单时隙上Lyapunov偏移加罚项, 将溢出概率约束转化为关于自变量的不等式, 在每个时隙上动态地分配频谱资源。仿真结果表明, 本文算法提高了系统用户质量满意度, 同时保证了系统稳定性。

## 参考文献

- [1] JABER M, IMRAN M A, TAFAZOLLI R, *et al.* 5G backhaul challenges and emerging research directions: A survey[J]. *IEEE Access*, 2017, 4: 1743-1766. doi: [10.1109/ACCESS.2016.2556011](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2556011).
- [2] GE Xiaohu, TU Song, MAO Guoqiang, *et al.* 5G ultra-dense cellular networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(1): 72-79. doi: [10.1109/MWC.2016.7422408](https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7422408).
- [3] ROBSON J. Small cell backhaul requirements[R]. A White Paper by the NGMN Alliance, Cambridge: NGMN, 2012.
- [4] SIDDIQUE U, TABASSUM H, and HOSSAIN E. Adaptive in-band self-backhauling for full-duplex small cells[C]. *IEEE*

- International Conference on Communication Workshop, London, UK, 2015: 44–49.
- [5] TAORI R, and SRIDHARAN A. Point-to-multipoint in-band mmwave backhaul for 5G networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(1): 195–201. doi: [10.1109/MCOM.2015.7010534](https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7010534).
- [6] WANG Ning, HOSSAIN E, BHARGAVA V K. Joint downlink cell association and bandwidth allocation for wireless backhauling in two-tier hetNets with large-scale antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(5): 3251–3268. doi: [10.1109/TWC.2016.2519401](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2519401).
- [7] NEELY Michael. Stochastic Network Optimization with Application to Communication and Queueing Systems[M]. San Rafael, USA: Morgan & Claypool, 2010: 149–152.
- [8] CHEN Lei, YU F. Green full-duplex self-backhaul and energy harvesting small cell networks with massive MIMO[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(12): 3709–3724. doi: [10.1109/JSAC.2016.2611846](https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2611846).
- [9] XU Yiran, Hu Rose Qiyang, QIAN Yi, et al. Video quality-based spectral and energy efficient mobile association in heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(2): 805–817. doi: [10.1109/TCOMM.2015.2503760](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2503760).
- [10] LAKSHMINARAYANA S, ASSAAD M, and DEBBAH M. Transmit power minimization in small cell networks under time average QoS constraints[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(10): 2087–2103. doi: [10.1109/JSAC.2015.2435312](https://doi.org/10.1109/JSAC.2015.2435312).
- [11] LIU Yinjun, LU Lu, LI Geoffrey Ye, et al. Joint user association and spectrum allocation for small cell networks with wireless backhauls[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, 5(5): 496–499. doi: [10.1109/LWC.2016.2593465](https://doi.org/10.1109/LWC.2016.2593465).
- [12] HUANG Jianwei, SUBRAMANIAN V, AGRAWAL R, et al. Downlink scheduling and resource allocation for OFDM systems[C]. 2006, IEEE International Conference on Information Sciences and Systems, Princeton, USA, 2007: 288–296.
- [13] YUN H C, KIM H, LEE S H, et al. A QoE-aware proportional fair resource allocation for multi-cell OFDMA networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(1): 82–85. doi: [10.1109/LCOMM.2014.2367115](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2014.2367115).
- 唐 伦：男，1973 年生，教授，博士，主要研究方向为新一代无线通信网络、异构蜂窝网络、软件定义无线网络等。
- 刘云龙：男，1992 年生，硕士生，研究方向为5G无线自回传网络中的资源分配问题。
- 赵 旭：男，1989 年生，硕士生，研究方向为5G移动性管理。
- 马润琳：女，1993 年生，硕士生，研究方向为5G网络切片。
- 陈前斌：男，1967 年生，教授，博士生导师，主要研究方向为个人通信、多媒体信息处理与传输、下一代移动通信网络等。