

两用户非正交多址接入的最优时延均衡和功率控制方法

黄 盛*

(中国电子科技集团公司第十研究所 成都 610036)

摘 要: 该文针对采用非正交多址接入(NOMA)技术的两用户单小区网络, 考虑信道衰落的随机性和业务到达的动态性, 以均衡用户排队时延并最大化网络总吞吐量为目标, 构建了资源管理的随机优化问题。基于李雅普诺夫优化方法, 推导了随机优化问题的最优解的闭式表达式, 并提出一种低复杂度的联合时延均衡和功率控制的最优资源管理方法。对比了采用NOMA时的次优资源管理方法与采用时分多址接入方法时的最优资源管理方法, 仿真结果表明所提方法能够显著提升网络性能。

关键词: 非正交多址接入; 时延均衡; 功率控制

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)08-1902-07

DOI: 10.11999/JEIT180818

Optimal Delay Equilibrium and Power Control Method for Two-user Non-orthogonal Multiple Access

HUANG Sheng

(No. 10 Institute of China Electronic Technology Corporation, Chengdu 610036, China)

Abstract: A two-user single cell network employing Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) technique is studied. Accounting for time-varying channel fading and dynamic traffic arrival, a stochastic optimization issue is formulated, which aims to balance the queue delay of users and maximize the network total throughput. Based on Lyapunov optimization method, the closed-form optimal solution of the stochastic optimization issue is derived, and a low-complexity optimal delay equilibrium and power control method is proposed. The method is compared with a NOMA scheme using a non-optimal resource management method and a Time Division Multiple Access (TDMA) scheme with an optimal resource management method. Simulation results show that the proposed method can significantly improve network performance.

Key words: Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); Delay equilibrium; Power control

1 引言

未来无线通信网络将面临高密度用户、高速率及低时延业务等网络需求的挑战^[1]。传统的通信系统常采用正交多址接入(Orthogonal Multiple Access, OMA)技术, 如时分多址接入(Time-Division Multiple Access, TDMA)、频分多址接入(Frequency-Division Multiple Access, FDMA)、码分多址接入(Code-Division Multiple Access, CDMA)、正交频分复用(Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA)等技术。正交多址接入技术将网络资源在时域、频域或码域划分成正交的资源块, 从而避免了用户之间的干扰。但是, 正交的资源块也限制了单个网络的接入用户数。为了应对高密度用户的通信网络需求, 在有限的频谱资源下, 亟需更高效

的多址接入技术来提升接入用户容量和频谱利用率。因此, 非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)已成为5G通信系统中的研究热点之一。

NOMA技术在功率域为不同的用户提供不同的增益, 并采用叠加编码(Superposition Coding, SC)实现多路信号在相同时域、频域或码域的资源块上传输^[2]。同时, 接收端通过串行干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)技术来区别多路用户信号, 并提取本接收端所需的信息^[3]。因此, NOMA技术能够成倍地提升通信网络系统的接入用户容量, 并显著地提升频谱资源利用率。在前人研究工作中, 文献^[4]考虑了多用户功率分配、信令负载、SIC错误率和高移动性等网络因素, 通过系统级仿真评估了NOMA技术的性能, 实验结果表明NOMA技术的优越性。文献^[5]分析了两用户非正交多址接入场景下网络容量与功率控

制参数的变化关系,并验证了采用NOMA技术的网络总能够为用户提供不差于采用OMA技术时的性能。此外,由于NOMA技术需要在功率域区分不同用户的信号并通过SIC解调用户信号,因此NOMA技术的应用需要配合高效的功率控制算法。在不完美信道状态信息的场景下,文献[6]考虑了信道状态信息误差、用户服务质量需求等因素,以最小化发送功率为目标,研究了联合功率控制、速率控制、用户调度和SIC技术的多维度资源分配算法;文献[7]考虑以最大化网络能效为优化目标,提出了一种次优的联合用户调度与功率控制算法;文献[8]基于统计的信道状态信息提出了联合速率与功率分配的资源管理方法,在满足各用户的吞吐量需求的条件下最小化网络的总传输功率。基于完美信道状态信息的情况下,文献[9]提出了以最大化能量效率为目标的最优功率控制策略;文献[10]通过松弛方法研究了最小化功率消耗的方法;文献[11]提出了以最大化网络吞吐量为目标的联合用户配对与功率分配方法;文献[12]考虑传统电网与可再生能源的融合电能,研究了联合用户接入与功率分配的资源管理方法;文献[13]研究了异构无线网络下以最大化微小区用户的总吞吐量为目标的资源分配方法。但是,上述资源管理方法均需要通过循环迭代的方式来获得功率控制的次优解或最优解,通常具有较高的时间复杂度。因此,本文致力于研究简单可行的资源管理方法,通过推导功率分配的最优解的闭式表达式,使得基站能够在不需要循环迭代的情况下将各个时隙的瞬时信道状态信息与瞬时队列状态信息直接映射为该时隙下的功率控制结果,从而极大地降低了基站的计算开销。

此外,随着视频分享网络、在线游戏、社交网络等时延敏感性业务的飞速发展,数据流的时延性能逐渐地成为了用户体验的重要指标,单纯最优化吞吐量无法提供良好的时延性能。例如,网络中某个节点具有较差的信道条件和很长的数据队列,仅基于信道条件的资源管理方法倾向于给该节点分配少量的网络资源以提升全网的资源利用率,进一步恶化了该节点的时延性能。因此,高效的资源管理方法应联合信道状态信息和队列状态信息,从而均衡节点排队时延并优化全网吞吐量。基于马尔科夫决策过程和贝尔曼方程,文献[14]设计了时延感知的联合信道分配和功率控制算法来最小化D2D终端的平均时延与平均丢弃率之和。基于李雅普诺夫优化方法(Lyapunov optimization),文献[15]提出了一种在线的功率控制算法来处理能量效率与排队时延之间的均衡关系。文献[16]研究了联合时延均衡和串行干扰消除的多能源融合网络资源管理方法。

文献[17]研究了大规模多小区中联合时延均衡和功率控制的分布式资源管理方法。

本文致力于研究在采用NOMA技术的单小区网络中联合时延均衡和功率控制的资源管理算法。由于功率控制在多条数据流之间的耦合性以及时延均衡和功率控制在长时间维度上的相互影响,联合时延均衡和功率控制的资源管理算法通常具有较高的复杂度。本文的主要贡献如下:

(1) 考虑信道衰落的随机性、业务到达的动态性以及控制变量的耦合性,本文建模了联合时延均衡和功率控制的随机优化问题,在保障各用户的队列稳定性与基站的功率约束下,最大化网络的总吞吐量。其次,针对目标函数的时间平均特性和约束条件的参数在不同时隙的随机特性,本文采用李雅普诺夫优化方法将随机优化问题等效地分解为单时隙的时延均衡问题与功率控制问题。

(2) 本文设计了一种低复杂度的最优时延均衡和功率控制的资源管理方法(DEPC-NOMA)。虽然单时隙的功率控制问题仍为非凸的优化问题,但是本文利用该优化问题的KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件的数学特征,通过理论推导获得了最优解在每个时隙的闭式表达式,极大地降低了功率控制算法的复杂度。

(3) 本文通过仿真对比了DEPC-NOMA方法与其它方法的性能。仿真结果表明了本文提出的DEPC-NOMA方法能够有效地均衡各节点的排队时延并且显著地提升网络总吞吐量。

2 系统模型

本文研究单小区下行链路,一个基站采用NOMA技术在一个信道上同时服务两个用户,用户集合定义为 $\mathbf{U} = \{1, 2\}$ 。网络系统在时域上采用时隙结构,其中时隙 $t \in \{1, 2, \dots, \infty\}$ 。定义时隙 t 的信道状态为 $\mathbf{G}(t) = \{g_u(t)\}_{u \in \mathbf{U}}$,其中, $g_u(t)$ 的取值受限于路径损耗、多径快衰落和阴影慢衰落。在信道的频谱带宽小于信道的相干带宽的情况下,本文考虑信道状态 $\mathbf{G}(t)$ 在不同时隙上是独立同分布的,且 $\mathbf{G}(t)$ 在单个时隙内保持恒定而在时隙边界上可能变化。在每个时隙 t 对 $g_1(t)$ 和 $g_2(t)$ 进行排序,并定义 $g_l(t)$ 和 $g_s(t)$ 分别为集合 $\mathbf{G}(t) = \{g_1(t), g_2(t)\}$ 中较大值的元素和较小值的元素,其下标 l 和 s 对应地分别等于 $g_1(t)$ 和 $g_2(t)$ 中较大值的下标和较小值的下标。通过在基站侧采用叠加编码(Superposition Coding, SC),在任意的功率控制分配结果下,基站利用自适应编码调制保证其给用户 s 传输的数据包能够被用户 s 成功地解调,则具有较优信道条件的用户 l 必定能够成功解调基站给用户 s 传输的数据

包,并在用户 l 采用串行干扰消除技术剥离用户 s 的数据包带来的干扰^[3]。因此,基站在时隙 t 给用户 l 和用户 s 的传输数据量可分别表示为

$$R_l(t) = w\tau \log_2 \left(1 + \frac{P_l(t)g_l(t)}{\sigma^2} \right) \quad (1)$$

$$R_s(t) = w\tau \log_2 \left(1 + \frac{P_s(t)g_s(t)}{P_l(t)g_s(t) + \sigma^2} \right) \quad (2)$$

其中, w 表示信道带宽, τ 表示时隙长度, $P_u(t)$ 为基站在时隙 t 给用户 u 发送数据的发射功率, σ^2 为白噪声功率。由于设备能力和功率节约的约束,基站的发射功率存在瞬时功率约束与时间平均的功率约束。基站的瞬时发射功率需大于等于零并且小于等于其允许的最大发射功率 P_{\max} , 而基站的时间平均发射功率需小于等于门限值 P_{mean} , 即

$$P_u(t) \geq 0, \forall u \in \mathcal{U}, \forall t \quad (3)$$

$$\sum_{u \in \mathcal{U}} P_u(t) \leq P_{\max}, \forall t \quad (4)$$

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E \left\{ \sum_{u \in \mathcal{U}} P_u(t) \right\} \leq P_{\text{mean}} \quad (5)$$

为了均衡数据排队时延,本文采用接纳控制方法来动态调整数据的接纳过程。考虑动态业务到达模型,将时隙 t 内到达基站的用户 u 的到达数据量表示为 $A_u(t)$, 而实际填入数据队列的接入数据量表示为 $r_u(t)$ 。由于接入数据量必定小于到达数据量,可得

$$r_u(t) \in [0, A_u(t)], \forall u \in \mathcal{U}, \forall t \quad (6)$$

基站为每个用户 u 维护一个缓存接入数据的数据队列。令 $Q_u(t)$ 表示发送节点 u 在时隙 t 的数据队列长度,则节点 u 的数据队列更新方程可定义为

$$Q_u(t+1) = \max\{Q_u(t) - R_u(t), 0\} + r_u(t), \quad \forall u \in \mathcal{U} \quad (7)$$

其中, $r_u(t)$ 和 $R_u(t)$ 的取值受约束于业务产生速率和调制编码方案,因此两者分别存在上界值 r_u^{\max} 和 R_u^{\max} 。此外,数据队列的稳定性需要保证时间平均上的数据队列长度为有限值,从而保障接入的业务数据能够在有限时间内离开数据队列,即

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E\{Q_u(t)\} < \infty, \forall u \in \mathcal{U} \quad (8)$$

用户 u 的吞吐量是数据队列 Q_u 在单位时间内输出的数据量。在有限排队时延的条件下,数据队列将趋于稳定状态,从而在时间平均上数据队列的输入数据量等于输出数据量。因此,由数据队列更新式(7)可得,在队列稳定状态下,网络 u 的吞吐量定义为

$$\begin{aligned} & \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E\{\min\{R_u(t), Q_u(t)\}\} \\ & = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E\{r_u(t)\} \triangleq \bar{r}_u \end{aligned} \quad (9)$$

综上,在保障基站功率限制和数据队列稳定性的约束下,以最大化网络总吞吐量为目标的联合时延均衡和功率控制的随机优化问题可建模为

$$\begin{aligned} \text{P1: } & \max_{\{\mathbf{r}(t), \mathbf{P}(t)\}} \sum_{u \in \mathcal{U}} \bar{r}_u \\ & \text{s.t. 式(3)—式(6), 式(8)} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{r}(t) = [r_u(t)]_{u \in \mathcal{U}}$ 和 $\mathbf{P}(t) = [P_u(t)]_{u \in \mathcal{U}}$ 为随机优化问题的控制变量。首先,任意节点的在任意时隙的传输数据量不但取决于自身的信道条件,而且受其他节点的功率控制结果的影响。其次,由于网络变量的随机性以及时间平均上的约束条件式(5)和式(8),控制变量 $\{\mathbf{r}(t), \mathbf{P}(t)\}$ 在不同时隙间的耦合性给求解优化问题P1带来了挑战。虽然本文采用李雅普诺夫优化方法^[18]将问题P1转换为单时隙的时延均衡与功率控制问题,然而功率控制优化问题的非凸目标函数使得求解该优化问题具有较高的复杂度。

3 单时隙的时延均衡与功率控制

本节通过李雅普诺夫优化方法分析随机稳定性的特点,依据瞬时的网络状态进行每个时隙的控制决策,设计了低复杂度的最优联合时延均衡与功率控制方法,并推导了最优解的闭式表达式。

为了处理时间平均上的功率约束式(5),本节定义虚拟队列 $Z(t)$ 的队列长度更新方程定义为

$$Z(t+1) = \max \left\{ Z(t) + \sum_{u \in \mathcal{U}} P_u(t) - P_{\text{mean}}, 0 \right\} \quad (11)$$

依据队列稳定理论(Rate stability theorem)^[18],通过保证虚拟队列 $Z(t)$ 在时间平均上的队列长度是有限的,即可确保虚拟队列 $Z(t)$ 在时间平均上流入速率小于等于流出速率,从而满足时间平均上的功率约束式(5)。

令 $\mathbf{S}(t) = [Q_u(t), Z(t)]$ 表示时隙 t 的队列状态信息,依据Lyapunov Drift定理^[18],定义李雅普诺夫函数(Lyapunov function)和单时隙的条件李雅普诺夫偏移(One-slot conditional Lyapunov drift)分别为 $L(\mathbf{S}(t)) = \left[\sum_{u \in \mathcal{U}} Q_u^2(t) + Z^2(t) \right] / 2$ 和 $\Delta(\mathbf{S}(t)) = E\{L(\mathbf{S}(t+1)) - L(\mathbf{S}(t)) | \mathbf{S}(t)\}$ 。随后,依据Lyapunov优化定理^[18],优化问题P1的李雅普诺夫优化函数(Lyapunov drift-plus-penalty function)构建为

$$\Delta(\mathbf{S}(t)) - \text{VE} \left\{ \sum_{u \in \mathcal{U}} r_u(t) | \mathbf{S}(t) \right\}, \quad (12)$$

其上界可通过定理1给出。

定理1 假设 $\mathbf{G}(t)$ 在不同时隙上是独立同分布的, 则对于任意的联合时延均衡和功率控制的资源管理方法, 所有可能的 $\mathbf{S}(t)$ 和任意的大于零的控制参数 V , 优化问题P1的李雅普诺夫优化函数式(12)的上界为

$$F_{\text{upper}} = \text{E} \left\{ \sum_{u \in \mathcal{U}} (Q_u(t) - V)r_u(t) - \sum_{u \in \mathcal{U}} Q_u(t)R_u(t) + \sum_{u \in \mathcal{U}} Z(t)P_u(t) | \mathbf{S}(t) \right\} + B + Z(t)P_{\text{mean}} \quad (13)$$

其中,

$$B = \sum_{u \in \mathcal{U}} \frac{(R_u^{\max})^2 + (r_u^{\max})^2}{2} + \frac{P_{\max}^2 - P_{\text{mean}}^2}{2} \quad (14)$$

证明 首先, 对数据队列更新式(7)与虚拟队列更新式(11)分别在等式两边进行取平方、移位、累加等操作可得

$$\sum_{u \in \mathcal{U}} \frac{Q_u^2(t+1) - Q_u^2(t)}{2} \leq \sum_{u \in \mathcal{U}} \frac{R_u^2(t) + r_u^2(t)}{2} - \sum_{u \in \mathcal{U}} Q_u(t)(R_u(t) - r_u(t)) \quad (15)$$

$$\frac{Z^2(t+1) - Z^2(t)}{2} \leq \frac{\left(\sum_{u \in \mathcal{U}} P_u(t) \right)^2 - P_{\text{mean}}^2}{2} + Z(t) \left(\sum_{u \in \mathcal{U}} P_u(t) - P_{\text{mean}} \right) \quad (16)$$

其中, 不等式符号源自于不等式 $(\max[Q - R, 0] + r)^2 \leq Q^2 + R^2 + r^2 + 2Q(R - r)$ 。进一步, 将不等式(15)和不等式(16)相加可得

$$\begin{aligned} & L(\mathbf{S}(t+1)) - L(\mathbf{S}(t)) \\ & \leq \sum_{u \in \mathcal{U}} \frac{R_u^2(t) + r_u^2(t)}{2} + \frac{\left(\sum_{u \in \mathcal{U}} P_u(t) \right)^2 - P_{\text{mean}}^2}{2} \\ & \quad + \sum_{u \in \mathcal{U}} Q_u(t)r_u(t) - \left[\sum_{u \in \mathcal{U}} Q_u(t)R_u(t) \right. \\ & \quad \left. + Z(t) \left(\sum_{u \in \mathcal{U}} P_u(t) - P_{\text{mean}} \right) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

给定 $\mathbf{S}(t)$, 对不等式(17)两边同时取条件期望

并减去 $\text{VE} \left\{ \sum_{u \in \mathcal{U}} r_u(t) | \mathbf{S}(t) \right\}$ 可得

$$\begin{aligned} & \Delta(\mathbf{S}(t)) - \text{VE} \left\{ \sum_{u \in \mathcal{U}} r_u(t) | \mathbf{S}(t) \right\} \\ & \leq B + \text{E} \left\{ \sum_{u \in \mathcal{U}} (Q_u(t) - V)r_u(t) | \mathbf{S}(t) \right\} \\ & \quad - \text{E} \left\{ \left[\sum_{u \in \mathcal{U}} Q_u(t)R_u(t) - Z(t) \left(\sum_{u \in \mathcal{U}} P_u(t) - P_{\text{mean}} \right) \right] | \mathbf{S}(t) \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $B = \sum_{u \in \mathcal{U}} \frac{(R_u^{\max})^2 + (r_u^{\max})^2}{2} + \frac{P_{\max}^2 - P_{\text{mean}}^2}{2}$ 。

证毕

依据Min Drift-Plus-Penalty定理^[18], 对于给定的 $\mathbf{S}(t)$, 优化问题P1可以转换为最小化上界函数式(13)的优化问题, 并受限于瞬时约束式(3)、式(4)和式(6)。研究上界函数式(13)的结构可得:

(1) 给定 $\mathbf{S}(t)$, 该上界函数的最后2项在时隙 t 内是常数;

(2) 给定 $\mathbf{S}(t)$, 最小化该上界函数的期望等同于根据当前的信道状态信息和队列状态信息的情况来最小化该期望内部的函数;

(3) 给定 $\mathbf{S}(t)$, 该上界函数中期望内部的函数可以分解为2个相互独立的函数并独立地进行最小化操作。具体地, 最小化上界函数式(13)中期望内部的函数可独立地分解为: (a) 最小化该期望中的第1项对应的时延均衡问题, 该时延均衡问题依据各用户的数据队列长度对当前到达的数据进行接纳控制, 从而有效地均衡数据传输的时延; (b) 最小化该期望中的第2项对应的功率控制问题, 该功率控制问题依据各用户的数据队列长度与信道条件建模功率控制对吞吐量的增益并维持关于功率消耗的虚拟队列 $Z(t)$ 的有限队列长度。

3.1 时延均衡

最小化上界函数式(12)的期望中的第1项可建模为如下优化问题P2

$$\begin{aligned} \text{P2: } \min_{r^{(t)}} & \sum_{u \in \mathcal{U}} (Q_u(t) - V)r_u(t) \\ \text{s.t. } & \text{式(6)} \end{aligned} \quad (19)$$

优化问题P2为线性规划问题^[19], 其在时隙 t 的最优解 $\mathbf{r}^*(t)$ 为

$$\mathbf{r}_u^*(t) = A_u(t) \cdot \mathbf{1}_{\{Q_u(t) < V\}}, \forall u \in \mathcal{U} \quad (20)$$

最优解 $\mathbf{r}^*(t)$ 表明, 调整控制参数 V 可以限制

数据队列的最大队列长度,从而达到均衡排队时延的目的。

3.2 功率控制

在每个时隙 t 下,功率控制的决策是从信道状态信息 $\mathbf{G}(t)$ 和队列状态信息 $\mathbf{S}(t)$ 到发射功率向量 $\mathbf{P}(t)$ 的映射。在两用户的场景下,最小化上界函数式(12)的期望中的第2项可建模为如下优化问题P3

P3:

$$\min_{\hat{\mathbf{P}}(t)} Z(t)(P_l(t) + P_s(t))$$

$$- Q_l(t)w\tau \log_2 \left(1 + \frac{P_l(t)g_l(t)}{\sigma^2} \right) \\ - Q_s(t)w\tau \log_2 \left(1 + \frac{P_s(t)g_s(t)}{P_l(t)g_s(t) + \sigma^2} \right)$$

$$\text{s.t.} \quad \text{式(3), 式(4)} \quad (21)$$

其中, $\hat{\mathbf{P}}(t) = \{P_l(t), P_s(t)\}$ 。需要注意的是, $R_u(t)$ 的信干噪比中发射功率的相互耦合关系使得优化问题P3的目标函数为非凸函数。如定理2所示,本节分析了优化问题P3的KKT条件^[19],并利用KKT条件的函数特性推导了优化问题P3的最优解的闭式表达式,极大地减少了功率控制方法的复杂度。

定理2: 如果优化问题P3取得了最优解 $\hat{\mathbf{P}}^*(t)$,则最优解 $\hat{\mathbf{P}}^*(t)$ 必定为最优解集合 $\tilde{\mathbf{P}}(t)$ 中的元素

$$\tilde{\mathbf{P}}(t) = \left\{ \left(P_l^{(1)}(t), P_s^{(1)}(t) \right), \left(P_l^{(2)}(t), P_s^{(2)}(t) \right), \right. \\ \left. \left(P_l^{(3)}(t), P_s^{(3)}(t) \right) \right\} \quad (22)$$

其中,

$$P_l^{(1)}(t) = \frac{(Q_s(t)g_s(t) - Q_l(t)g_l(t))\sigma^2}{(Q_l(t) - Q_s(t))g_l(t)g_s(t)} \quad (23)$$

$$P_s^{(1)}(t) = \min \left\{ \frac{w\tau Q_s(t)}{Z(t)} - \frac{\sigma^2}{g_s(t)} - P_l^{(1)}(t), \right. \\ \left. P_{\max} - P_l^{(1)}(t) \right\} \quad (24)$$

$$P_l^{(2)}(t) = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{w\tau Q_l(t)}{Z(t)} - \frac{\sigma^2}{g_l(t)}, P_{\max} \right\} \right\} \quad (25)$$

$$P_s^{(2)}(t) = 0 \quad (26)$$

$$P_l^{(3)}(t) = 0 \quad (27)$$

$$P_s^{(3)}(t) = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{w\tau Q_s(t)}{Z(t)} - \frac{\sigma^2}{g_s(t)}, P_{\max} \right\} \right\} \quad (28)$$

证明 依据KKT条件定义^[19],优化问题P3的最优解满足KKT条件式(29)–式(33)

$$\frac{Q_l(t)w\tau g_l(t)}{P_l(t)g_l(t) + \sigma^2} - \frac{Q_s(t)w\tau g_s(t)}{P_l(t)g_s(t) + \sigma^2} \\ + \frac{Q_s(t)w\tau g_s(t)}{(P_l(t) + P_s(t))g_s(t) + \sigma^2} - Z(t) + \lambda_l - \mu = 0 \quad (29)$$

$$\frac{Q_s(t)w\tau g_s(t)}{(P_l(t) + P_s(t))g_s(t) + \sigma^2} - Z(t) + \lambda_s - \mu = 0 \quad (30)$$

$$\lambda_l P_l(t) = 0 \quad (31)$$

$$\lambda_s P_s(t) = 0 \quad (32)$$

$$\mu(P_l(t) + P_s(t) - P_{\max}) = 0 \quad (33)$$

其中, λ_l 与 λ_s 的取值可分为以下3种情况:

(1) 当 $\lambda_l = \lambda_s = 0$ 时,优化问题P3的最优解满足条件式(34)–式(36)

$$\frac{Q_l(t)w\tau g_l(t)}{P_l(t)g_l(t) + \sigma^2} - \frac{Q_s(t)w\tau g_s(t)}{P_l(t)g_s(t) + \sigma^2} \\ + \frac{Q_s(t)w\tau g_s(t)}{(P_l(t) + P_s(t))g_s(t) + \sigma^2} - Z(t) - \mu = 0 \quad (34)$$

$$\frac{Q_s(t)w\tau g_s(t)}{(P_l(t) + P_s(t))g_s(t) + \sigma^2} - Z(t) - \mu = 0 \quad (35)$$

$$\mu(P_l(t) + P_s(t) - P_{\max}) = 0 \quad (36)$$

求解式(34)–式(36)可得

$$P_l^{(1)}(t) = \frac{(Q_s(t)g_s(t) - Q_l(t)g_l(t))\sigma^2}{(Q_l(t) - Q_s(t))g_l(t)g_s(t)} \quad (37)$$

$$P_s^{(1)}(t) = \min \left\{ \frac{w\tau Q_s(t)}{Z(t)} - \frac{\sigma^2}{g_s(t)} - P_l^{(1)}(t), \right. \\ \left. P_{\max} - P_l^{(1)}(t) \right\} \quad (38)$$

(2) 当 $\lambda_s \neq 0$ 时,则优化问题P3的最优解满足 $P_s^{(2)}(t) = 0$ 且

$$\frac{Q_l(t)w\tau g_l(t)}{P_l(t)g_l(t) + \sigma^2} - Z(t) + \lambda_l - \mu = 0 \quad (39)$$

$$\lambda_l P_l(t) = 0 \quad (40)$$

$$\mu(P_l(t) - P_{\max}) = 0 \quad (41)$$

求解式(39)–式(41)可得

$$P_l^{(2)}(t) = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{w\tau Q_l(t)}{Z(t)} - \frac{\sigma^2}{g_l(t)}, P_{\max} \right\} \right\} \quad (42)$$

(3) 当 $\lambda_l \neq 0$ 时,则优化问题P3的最优解满足 $P_l^{(3)}(t) = 0$ 且

$$\frac{Q_s(t)w\tau g_s(t)}{P_s(t)g_s(t) + \sigma^2} - Z(t) + \lambda_s - \mu = 0 \quad (43)$$

$$\lambda_s P_s(t) = 0 \quad (44)$$

$$\mu(P_s(t) - P_{\max}) = 0 \quad (45)$$

求解式(43)–式(45)可得

$$P_s^{(3)}(t) = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{w\tau Q_s(t)}{Z(t)} - \frac{\sigma^2}{g_s(t)}, P_{\max} \right\} \right\} \quad (46)$$

综上，优化问题P3的最优解必定属于最优解集合 $\tilde{P}(t)$ 的元素。 证毕

4 仿真结果与数值分析

依据Min Drift-Plus-Penalty定理^[18]，数据队列式(7)和虚拟队列式(11)是稳定的，从而满足了时间平均上的有限队列长度约束式(8)和功率约束式(5)。本节通过MATLAB仿真验证本文提出的最优时延均衡和功率控制的非正交多址接入方法(DEPC-NOMA)在网络吞吐量和数据队列长度上的性能。本文采用如下2种方法做性能对比：

(1) DEEP-NOMA：该方法的时延均衡方法与DEPC-NOMA方法相同。其次，该方法的功率控制采用均分的方式(Equal Power, EP)，基站在每个时隙 t 给两个用户分配相同的发射功率，并保证满足功率约束。

(2) DEPC-TDMA：该方法的时延均衡方法与DEPC-NOMA方法相同。其次，两用户通过时分多址接入(TDMA)的方式共享频率与功率资源，则该方法的功率控制的最优解 $\tilde{P}^*(t)$ 属于集合式(47)

$$\tilde{P}_{\text{TDMA}}(t) = \left\{ \left(P_l^{(2)}(t), P_s^{(2)}(t) \right), \left(P_l^{(3)}(t), P_s^{(3)}(t) \right) \right\} \quad (47)$$

4.1 仿真设置

考虑一个半径为250 m的圆形小区，基站位于中心位置，用户1和用户2分别随机分布在距离基站125 m和200 m的圆环上。信道带宽 w 为10 MHz。每个时隙长度 τ 为1 ms。基站的瞬时功率约束 P_{\max} 与时间平均的功率约束 P_{mean} 分别为20 dBm与18 dBm。噪声功率谱密度 σ^2 为-174 dBm/Hz。每个时隙内的平均数据到达量为50 kbit/slot。路径损耗模型采用 $PL = 128.1 + 37.6\log_2 d$ ，其中，路径距离 d 单位为km。多径快衰落服从相互独立的均值为1的指数分布。阴影慢衰落模型采用标准方差为8 dB的独立对数正态分布。在仿真中，数值结果为50次拓扑生成且每个拓扑运行2000个时隙所获得的平均值结果。

4.2 仿真结果

图1描述了参数 V 的取值范围为[1, 400]时平均数据队列长度与网络总吞吐量的权衡关系。在平均数据队列长度较小时，随着平均数据队列长度逐渐增加，用户有充足的缓存数据来保证网络传输机会得到高效的利用，从而网络总吞吐量迅速地上升。

而在平均数据队列长度较大时，网络传输机会的利用趋于饱和状态，从而网络总吞吐量随着平均数据队列长度的增加而缓慢上升。此外，对比DEEP-NOMA方法和DEPC-TDMA方法，本文提出的DEPC-NOMA方法能够显著地提升网络吞吐量并降低排队时延。

图2和图3分别说明了各用户的吞吐量和平均数据队列长度与控制参数 V 的关系。各用户的吞吐量随着控制参数 V 的增大而增大，但是各用户的平均数据队列长度及排队时延也随着控制参数 V 的增大而增大。相对于DEPC-TDMA方法，DEPC-NOMA方法能够创造更多的传输机会，从而有效地提升用户的吞吐量性能，同时保持良好的排队时延性能。此外，在DEEP-NOMA方法中，由于其功率控制未考虑时延均衡的需求，虽然信道条件较

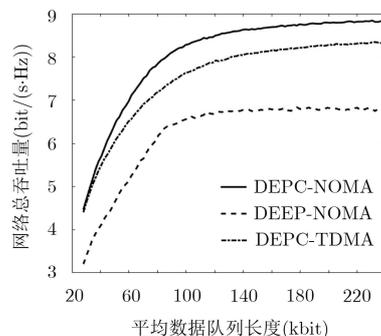


图1 平均数据队列长度与网络总吞吐量的权衡关系

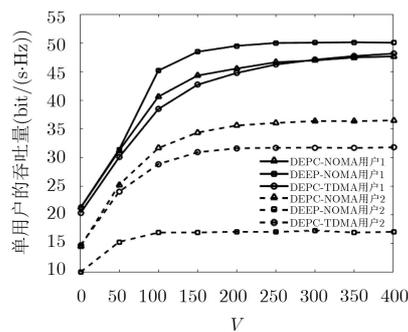


图2 各用户的吞吐量与控制参数 V 的关系

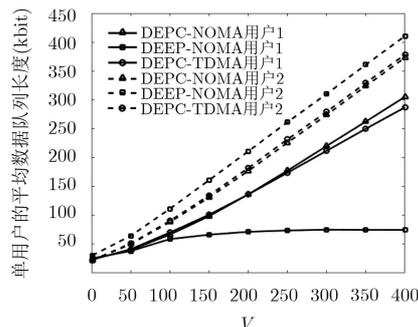


图3 各用户的平均数据队列长度与控制参数 V 的关系

好的用户1能够获得很高的吞吐量与很低的排队时延,但是信道条件较差的用户2却忍受着极低的吞吐量与极高的排队时延,用户间的公平性极差。在本文提出的DEPC-NOMA方法中,通过联合时延均衡与功率控制,虽然用户1的吞吐量与排队时延性能稍微下降,但是用户2的吞吐量与排队时延能够获得极大地性能提升。

5 结束语

针对采用非正交多址接入技术的两用户单小区网络,考虑信道衰落的随机性、业务到达的动态性以及控制变量的耦合性,本文提出了一种低复杂度的最优时延均衡和功率控制的资源管理方法(DEPC-NOMA),以期最大化网络总吞吐量,并满足数据队列稳定性与基站功率约束。仿真结果表明,本文提出的DEPC-NOMA方法能够显著地提升网络总吞吐量并均衡用户的排队时延。

参考文献

- [1] 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).
- [2] COVER T. Broadcast channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1972, 18(1): 2–14. doi: [10.1109/TIT.1972.1054727](https://doi.org/10.1109/TIT.1972.1054727).
- [3] TSE D and VISWANATH P. *Fundamentals of Wireless Communication*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [4] BENJEBBOU A, LI Anxin, SAITO Y, *et al.* System-level performance of downlink NOMA for future LTE enhancements[C]. 2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Atlanta, 2013: 66–70. doi: [10.1109/GLOCOMW.2013.6824963](https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2013.6824963).
- [5] OVIEDO J A and SADJADPOUR H R. A fair power allocation approach to NOMA in multiuser SISO systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(9): 7974–7985. doi: [10.1109/TVT.2017.2689000](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2689000).
- [6] WEI Zhiqiang, NG D W K, YUAN Jinhong, *et al.* Optimal resource allocation for power-efficient MC-NOMA with imperfect channel state information[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(9): 3944–3961. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2709301](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2709301).
- [7] FANG Fang, ZHANG Haijun, CHENG Julian, *et al.* Energy-efficient resource scheduling for NOMA systems with imperfect channel state information[C]. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, 2017: 1–5. doi: [10.1109/ICC.2017.7996360](https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7996360).
- [8] CHOI J. Joint rate and power allocation for NOMA with statistical CSI[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(10): 4519–4528. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2720176](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2720176).
- [9] ZHANG Yi, WANG Huiming, ZHENG Tongxing, *et al.* Energy-efficient transmission design in non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(3): 2852–2857. doi: [10.1109/TVT.2016.2578949](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2578949).
- [10] LEI Lei, YUAN Di, and VÄRBRAND P. On power minimization for non-orthogonal multiple access (NOMA)[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(12): 2458–2461. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2606596](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2606596).
- [11] SHI Lanjie, LI Bo, and CHEN Hailua. Pairing and power allocation for downlink nonorthogonal multiple access systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(11): 10084–10091. doi: [10.1109/TVT.2017.2748145](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2748145).
- [12] XU Bingyu, CHEN Yue, CARRIÓN J R, *et al.* Resource allocation in energy-cooperation enabled two-tier NOMA HetNets toward green 5G[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(12): 2758–2770. doi: [10.1109/JSAC.2017.2726398](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2726398).
- [13] ZHAO Jingjing, LIU Yuanwei, CHAI K K, *et al.* Resource allocation for non-orthogonal multiple access in heterogeneous networks[C]. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, 2017: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2017.7997327](https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7997327).
- [14] MI Xiang, ZHAO Ming, XIAO Limin, *et al.* Delay-aware resource allocation and power control for device-to-device communications[C]. 2015 IEEE WCNC Wkshps, New Orleans, USA, 2015: 311–316. doi: [10.1109/WCNCW.2015.7122573](https://doi.org/10.1109/WCNCW.2015.7122573).
- [15] SHENG Min, LI Yuzhou, WANG Xijun, *et al.* Energy efficiency and delay tradeoff in device-to-device communications underlying cellular networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(1): 92–106. doi: [10.1109/JSAC.2015.2471395](https://doi.org/10.1109/JSAC.2015.2471395).
- [16] LI Jiandong and HUANG Sheng. Delay-aware power control for D2D communication with successive interference cancellation and hybrid energy source[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, 6(6): 806–809. doi: [10.1109/LWC.2017.2744625](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2744625).
- [17] HUANG Sheng, LIANG Ben, and LI Jiandong. Distributed interference and delay aware design for D2D communication in large wireless networks with adaptive interference estimation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(6): 3924–3939. doi: [10.1109/TWC.2017.2690280](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2690280).
- [18] NEELY M J. *Stochastic Network Optimization with Application to Communication and Queueing Systems*[M]. San Rafael, CA: Morgan & Claypool, 2010.
- [19] BOYD S and VANDENBERGHE L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2004.

黄 盛: 男, 1989年, 工程师, 主要研究方向为无线通信网络的时延均衡和资源分配方法、数据链系统的组网协议等。