

文章编号:2095-6134(2016)03-0427-06

# H2H 与 M2M 共存场景的准入控制及资源分配<sup>\*</sup>

王鑫,邱玲<sup>†</sup>

(中国科学技术大学中国科学院无线光电通信重点实验室,合肥 230027)

(2015 年 9 月 8 日收稿;2015 年 12 月 28 日收修改稿)

Wang X, Qiu L. Admission control and resource allocation of H2H&M2M co-existence scenario [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016,33(3):427-432.

**摘 要** 考虑到 MTC D 数量巨大的特性,针对 OFDMA 蜂窝网络中 H2H 与 M2M 共存场景系统过载的情况,提出一种准入控制及资源分配联合优化算法. 针对共存场景系统过载的情况,考虑控制信道的影响,本文形成了最大化准入 MTC D 数目的 MINLP 问题. 由于难以求得其最优解,通过凸松弛将其转化为标准的凸问题,由此得到原问题解的上界,并进一步提出一种低复杂度的求解算法. 仿真结果表明所提算法与上界相比性能损失小,且明显优于两种对比算法.

**关键词** 机器通信;准入控制;资源分配;控制信道

**中图分类号:** TN929.5      **文献标志码:** A      **doi:**10.7523/j.issn.2095-6134.2016.03.021

## Admission control and resource allocation of H2H&M2M co-existence scenario

WANG Xin, QIU Ling

(Key Laboratory of Wireless-Optical Communications of Chinese Academy of Sciences,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract** This study focuses on the massive device characteristic of M2M communication. Considering the overload situation in H2H&M2M co-existence scenario of OFDMA cellular networks, we propose an admission control and resource allocation joint optimization algorithm. Considering the effect of control channel, we formulate a MINLP problem of maximizing the number of MTC Ds admitted. Because of the complexity of MINLP problems, relaxed constraints are used to transform the MINLP problem into a convex problem, which is the upper-bound of the original problem. Furthermore, a low-complicity algorithm is proposed. Simulation results show that the algorithm has minor degradation compared with the upper-bound and is better than two other algorithms.

**Key words** M2M; admission control; resource allocation; control channel

<sup>\*</sup> 863 计划项目(2014AA01A707)资助

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: lqiu@ustc.edu.cn

机器与机器(machine to machine, M2M)通信利用自动控制及网络通信等技术,在没有人干预的情况下实现机器间自主数据通信及信息交互<sup>[1]</sup>. 3GPP 预测未来有万亿级别的机器通信终端(machine type communication device, MTCD)接入无线通信网络中,比人与人(human to human, H2H)通信终端(user equipment, UE)要多出至少 2 个数量级<sup>[2]</sup>. 大规模 M2M 通信的实际部署依赖于网络的广泛覆盖及低复杂的连接,蜂窝网络成为最直接及最现实的解决方案<sup>[3]</sup>. 蜂窝网络主要为相对少量的 UE 而设计,但与 H2H 通信相比, M2M 通信具有终端数量巨大,业务类型多,上行业务为主等显著特性,给蜂窝网络无线资源管理带来严峻挑战<sup>[4]</sup>.

资源分配作为蜂窝网络无线资源管理的重要组成部分,可以有效挖掘系统的复用增益,得到了广泛而深入的研究. 文献[5]研究上行 OFDMA 系统最大化 H2H 加权和速率问题,但没有考虑不同优先级混合业务的资源分配;针对 H2H 与 M2M 共存的场景,文献[4]提出一种基于网络效用最大化的资源分配算法,但其效用仅是 UE 和 MTCD 数据速率的函数,且没有考虑服务质量(quality of service, QoS)的约束;文献[6-7]分别研究共存场景最小化系统上行总发射功率及最大化系统上行能量效率的问题,且考虑了 UE 和 MTCD 的 QoS 约束,但文献[6-7]仅研究了系统不过载情况,即系统资源能同时满足所有用户需求. 对于存在大量 MTCD 的共存场景,需考虑系统过载的情况,此时,系统进行准入控制<sup>[8]</sup>(admission control, AC),文献[9]对次用户进行准入控制,最大化系统所准入的次用户数目,同时保证主用户以及准入次用户的 QoS 需求,但仅考虑了单信道的情况,即仅分配上行发射功率. 当考虑在蜂窝网络中部署 M2M 通信时,充分利用 M2M 通信的特性,研究多信道系统共存场景下系统过载情况的混合资源分配问题具有重要的理论意义及应用价值. 此外,文献[10]指出对于存在大量 MTCD 的场景,控制信道也是制约系统性能的因素,文献[11]仿真分析控制信道对 M2M 通信随机接入过程的影响,因此,研究蜂窝网络中 M2M 通信的资源分配问题也需要考虑控制信道的影响.

针对研究现状,本文利用 M2M 通信的特性,研究上行 OFDMA 系统 H2H 与 M2M 共存场景下

系统过载情况的混合资源分配问题,并同时考虑了控制信道对资源分配的影响,主要贡献总结如下:

关注 MTCD 数量巨大的特性,考虑共存场景系统过载的情况,将优化目标设为最大化系统准入的 MTCD 数目,区别于传统的最小化发射功率、最大化能量效率等目标;对于形成的准入控制及资源分配联合优化混合整形非线性规划(mixed-integer nonlinear programming, MINLP)问题,由于难以求得最优解,本文通过凸松弛将其转化为标准凸问题,由求解凸问题得到原问题解的上界,并进一步提出一种低复杂度的求解算法,仿真结果表明所提算法与上界相比性能损失小,且明显优于 2 种对比算法.

## 1 系统模型

考虑 OFDMA 蜂窝系统单小区上行链路. 小区内设备集合为  $\mathcal{K} \triangleq \{1, \dots, K_1, \dots, K\}$ , 分为 2 个子集, UE 集合  $\mathcal{K}_h \triangleq \{1, \dots, K_1\}$ , MTCD 集合  $\mathcal{K}_m \triangleq \{K_1 + 1, \dots, K\}$ . 系统带宽为  $B$ , 均匀划分成子载波集合  $\mathcal{N} \triangleq \{1, \dots, N\}$ . 设备最大上行发射功率为  $P_k$ , 最小速率要求为  $R_k^T, \rho_{k,n}$  为子载波分配变量(值为 1 代表子载波  $n$  分配给设备  $k$ ),  $p_{k,n}$  代表设备  $k$  在子载波  $n$  上的发射功率,  $\alpha_{k,n} = |h_{k,n}|^2 N / N_0 B$  代表设备  $k$  在子载波  $n$  上的信道 SNR, 其中  $k = 1, 2, \dots, K, n = 1, 2, \dots, N$ .

本文利用信令数据比(ratio of signaling to data, RSD)建模控制信道与数据信道间的数量关系<sup>[12]</sup>, RSD 值反映不同类型的业务对控制信道需求的大小:

$$\text{RSD}: f = \frac{\text{控制信道子载波数}}{\text{数据信道子载波数}}.$$

定义 MTCD 准入控制变量  $X_k = \begin{cases} 1 & R_k \geq R_k^T \\ 0 & R_k < R_k^T \end{cases}, k = K_1 + 1, \dots, K$ , 即系统仅准入满足速率要求的 MTCD, 其中  $R_k = \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} \log_2(1 + p_{k,n} \alpha_{k,n})$ , 表示 MTCD 在分配子载波和功率资源后的可达速率.

## 2 M2M 准入控制及资源分配

### 2.1 问题形成

针对 MTCD 数量巨大的特性,并考虑实际系

统中控制信道的约束,H2H与M2M共存场景下系统过载情况的准入控制及资源分配问题形成如下:

$$\begin{aligned}
 & \text{(P1)} \quad \max_{\{\rho_{k,n}, p_{k,n}\}} \sum_{k=K_1+1}^K X_k \\
 & \text{s. t. } C1: \sum_{n=1}^N p_{k,n} \leq P_k, \forall k \\
 & C2: \sum_{k=1}^K \rho_{k,n} \leq 1, \forall n \\
 & C3: \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N f_k \rho_{k,n} \leq C \\
 & C4: p_{k,n} \geq 0, \forall k, n \\
 & C5: \rho_{k,n} \in \{0, 1\}, \forall k, n \\
 & C6: X_k \in \{0, 1\}, K_1 + 1 \leq k \leq K \\
 & C7: \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} \log_2 \left( 1 + \frac{s_{k,n} \alpha_{k,n}}{\rho_{k,n}} \right) \geq R_k^T, 1 \leq k \leq K_1.
 \end{aligned}$$

在优化问题(P1)中,优化目标为最大化系统准入的MTC数目,约束3反映控制信道的约束( $C$ 表示控制信道的子载波数目),约束7保证所有UE的速率要求.由于约束条件4和5,问题(P1)是一个MINLP问题,对于这类问题通常难以求得最优解.对于子载波分配,共有 $K^N$ 种方案,通过穷举法虽然可以得到最优的资源分配方案,但是复杂度随着用户数以及子载波数目呈指数增长.

## 2.2 问题求解

由于(P1)不易求解,因此分别对 $X_k$ 和 $\rho_{k,n}$ 进行凸松弛<sup>[8]</sup>( $X_k \in [0, 1]$ 表示系统准入所有速率大于0的用户; $\rho_{k,n} \in [0, 1]$ 表示不同的用户可以共享同一个子载波,例如时域共享),将(P1)转化为(P2).

在(P2)中, $s_{k,n} = \rho_{k,n} p_{k,n}$ 表示设备 $k$ 在子载波 $n$ 上实际的能量.对于非线性约束7和8,令 $g(\{\rho_{k,n}\}, \{s_{k,n}\}, X_k) = \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} \log_2 \left( 1 + \frac{s_{k,n} \alpha_{k,n}}{\rho_{k,n}} \right) - X_k R_k^T$ ,其中, $X = \begin{cases} 1, & 1 \leq k \leq K_1 \\ X_k, & K_1 + 1 \leq k \leq K \end{cases}$ ,由于其海森矩阵半负定,因此 $g(\{\rho_{k,n}\}, \{s_{k,n}\}, X_k)$ 为凹函数.

$$\begin{aligned}
 & \text{(P2)} \quad \max_{\{\rho_{k,n}, s_{k,n}, X_k\}} \sum_{k=K_1+1}^K X_k \\
 & \text{s. t. } C1: \sum_{n=1}^N s_{k,n} \leq P_k, \forall k \\
 & C2: \sum_{k=1}^K \rho_{k,n} \leq 1, \forall n \\
 & C3: \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N f_k \rho_{k,n} \leq C
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & C4: s_{k,n} \geq 0, \forall k, n \\
 & C5: \rho_{k,n} \in [0, 1], \forall k, n \\
 & C6: X_k \in [0, 1], K_1 + 1 \leq k \leq K \\
 & C7: \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} \log_2 \left( 1 + \frac{s_{k,n} \alpha_{k,n}}{\rho_{k,n}} \right) \geq R_k^T, 1 \leq k \leq K_1 \\
 & C8: \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} \log_2 \left( 1 + \frac{s_{k,n} \alpha_{k,n}}{\rho_{k,n}} \right) \geq X_k R_k^T, K_1 + 1 \leq k \leq K.
 \end{aligned}$$

由上述分析可知,经过凸松弛后,(P2)是凸可行集、线性目标函数的标准凸问题,最优解存在且唯一.由于(P2)的可行域包含(P1)的可行域,因此,(P2)的最优解为(P1)的性能上界.虽然(P2)的最优值可以用内点法求解,但复杂度仍较高,约为 $O(K^3 N^3)$ .本文后续提出一个低复杂度的算法.

定义(P2)的拉格朗日函数如下:(其中拉格朗日乘子 $\lambda, \beta, \mu, \nu \geq 0$ )

$$\begin{aligned}
 & L(\{\rho_{k,n}\}, \{s_{k,n}\}, \{X_k\}, \lambda, \beta, \mu, \nu) \\
 & = \sum_{k=K_1+1}^K X_k + \sum_{k=1}^{K_1} \lambda_k \left( \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} \log_2 \left( 1 + \frac{s_{k,n} \alpha_{k,n}}{\rho_{k,n}} \right) - R_k^T \right) + \\
 & \quad \sum_{k=K_1+1}^K \lambda_k \left( \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} \log_2 \left( 1 + \frac{s_{k,n} \alpha_{k,n}}{\rho_{k,n}} \right) - X_k R_k^T \right) + \\
 & \quad \sum_{k=1}^K \beta_k \left( P_k - \sum_{n=1}^N s_{k,n} \right) + \sum_{n=1}^N \mu_n \left( 1 - \sum_{k=1}^K \rho_{k,n} \right) + \\
 & \quad \nu \left( C - \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N f_k \rho_{k,n} \right)
 \end{aligned}$$

根据Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件:

$$\beta_k^* (P_k - \sum_{n=1}^N s_{k,n}^*) = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial L}{\partial s_{k,n}^*} = \lambda_k^* \rho_{k,n}^* \frac{\alpha_{k,n}}{(\rho_{k,n}^* + s_{k,n}^* \alpha_{k,n}) \ln 2} - \\
 & \beta_k^* \begin{cases} = 0, & s_{k,n}^* > 0 \\ < 0, & s_{k,n}^* = 0 \end{cases}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial L}{\partial \rho_{k,n}^*} = \lambda_k^* \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{s_{k,n}^* \alpha_{k,n}}{\rho_{k,n}^*} \right) - \right. \\
 & \quad \left. \frac{s_{k,n}^* \alpha_{k,n}}{(\rho_{k,n}^* + s_{k,n}^* \alpha_{k,n}) \ln 2} \right] - \mu_n^* - \nu^* f_k \\
 & \begin{cases} < 0, & \rho_{k,n}^* = 0 \\ = 0, & 0 < \rho_{k,n}^* < 1 \\ > 0, & \rho_{k,n}^* = 1 \end{cases}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

**推论 2.1** 若被分配到子载波,设备在其所分配的子载波上满发射功率注水.

证明 将拉格朗日函数对  $s_{k,n}$  求偏导,可以得到 (2)式,因此相应的功率分配方案为

$$p_{k,n}^* = \frac{s_{k,n}^*}{\rho_{k,n}^*} = \left( \frac{\lambda_k^*}{\beta_k^* \ln 2} - \frac{1}{\alpha_{k,n}} \right)^+, \quad (4)$$

其中,  $(x)^+ = \max(0, x)$ ,  $\frac{\lambda_k^*}{\beta_k^* \ln 2}$  为注水高度. 若

设备  $k$  的功率注水高度不为 0, 由互补松弛条件

(1)式可知, 当  $\beta_k^* \neq 0$  时,  $P_k - \sum_{n=1}^N s_{k,n}^* = 0$ , 即该 MTCD 在其所分配的子载波上满发射功率注水.

**推论 2.2** 子载波倾向于分配给信道条件好, RSD 值小的设备.

证明 将拉格朗日函数对  $\rho_{k,n}$  求偏导,可以得到 (3)式,将(4)式代入(3)式中,可以得到:

$$\rho_{k,n}^* = \begin{cases} 0, & H_{k,n} < \mu_n^* \\ (0, 1), & H_{k,n} = \mu_n^* \\ 1, & H_{k,n} > \mu_n^* \end{cases}, \quad (5)$$

其中  $H_{k,n} = \lambda_k^* \left[ \left( \log \left( \frac{\lambda_k^* \alpha_{k,n}}{\beta_k^* \ln 2} \right) \right)^+ - \frac{1}{\ln 2} \left( 1 - \frac{\beta_k^* \ln 2}{\lambda_k^* \alpha_{k,n}} \right)^+ \right] -$

$v^* f_k$ .  $H_{k,n}$  在子载波分配过程中起着关键作用,

$H_{k,n}$  值越大,  $k$  越趋向于独占子载波  $n$ . 在  $\frac{\lambda_k^* \alpha_{k,n}}{\beta_k^* \ln 2}$

$> 1$  条件下, 将  $H_{k,n}$  对  $\alpha_{k,n}$  求偏导,可以得到  $H_{k,n}$  随着  $\alpha_{k,n}$  单调递增, 因此, 对于每个子载波  $n$ ,  $\alpha_{k,n}$  越大的设备越可能被分配到该子载波; 类似地,  $H_{k,n}$  随着  $f_k$  单调递减, 即  $f_k$  越小的设备越可能被分配到该子载波.

上述在功率和子载波分配中基于 KKT 条件的推论, 对于算法的设计具有重要的启示意义, 本文后续所提算法将主要基于这些推论.

### 2.3 算法步骤

算法以最大化准入的 MTCD 数目为目标, 并将 MTCD 所占用的控制信道容量  $f_k \sum_{n=1}^N \rho_{k,n}$  作为其是否准入的衡量标准, 算法的主要步骤如下:

**步骤 1**(初始化及 UE 的资源分配):

准入 MTCD 集合  $\mathcal{K}_a = \emptyset$ , 未准入 MTCD 集合  $\mathcal{K}_u = \mathcal{K}_m$ , 可用子载波集合  $\mathcal{N}_a = \mathcal{N}$ , 分配给设备  $k$  的子载波集合  $\mathcal{S}_k = \emptyset, 1 \leq k \leq \mathcal{K}$ ; 依次对  $\mathcal{K}_u$  中的 UE 按照信道条件分配子载波并满功率注水, 直至满足速率约束, 并将相应子载波从  $\mathcal{N}_a$  中去除;

**步骤 2**(MTCD 的资源分配):

依次将  $\mathcal{N}_a$  中的子载波添加到  $\mathcal{K}_u$  中  $\alpha_{k,n}$  最大的 MTCD 的  $\mathcal{S}_k$  中, 计算分配当前子载波时该 MTCD 在  $\mathcal{S}_k$  上满功率注水的可达速率  $R_m$ , 若  $R_m \geq R_m^T$ , 则将该 MTCD 添加到  $\mathcal{K}_a$  以及从  $\mathcal{K}_u$  中去除, 直至  $\mathcal{N}_a = \emptyset$ ;

**步骤 3**(控制信道约束):

1) 对  $\mathcal{K}_a$  中的 MTCD、 $\mathcal{K}_u$  中的 UE 以及相应的  $\mathcal{S}_k$ , 计算所占用的控制信道子载波数, 若占满执行 2), 否则执行 3);

2) 从  $\mathcal{K}_a$  中删除  $f_k \sum_{n=1}^N \rho_{k,n}$  最大的 MTCD, 将相应的  $\mathcal{S}_m$  添加到  $\mathcal{N}_a$ , 执行步骤 2);

3) 对  $\mathcal{K}_u$  中的 MTCD, 按照  $f_m(R_m^T - R_m)$  从小到大依次分配资源准入, 直至控制信道或数据信道资源不能满足, 算法结束.

该算法的复杂度近似为  $O(K_u KN)$ , 其中  $K_u$  为系统未准入的 MTCD 数目. 对于存在大量 MTCD 和子载波的系统, 该算法复杂度远低于求解优化问题 (P1) 性能上界的内点法.

## 3 仿真结果与分析

仿真场景为 OFDMA 系统上行单小区系统过载情况, MTCD 和 UE 均匀分布在距离基站 100 m 到 500 m 的环形范围内, 路径损耗为  $PL(\text{dB}) = 128.1 + 37.6 \lg R(\text{km})$ , 基站与设备间的信道服从独立同分布瑞利衰落, UE 和 MTCD 的最大发射功率分别为 20 dBm 和 10 dBm, 系统共有 50 个子载波, 每个子载波带宽为 15 kHz, 噪声功率  $N_0$  为  $-174 \text{ dBm/Hz}$ .

仿真将检验本文所提算法 (proposed) 与问题 (P2) 的最优解, 即原问题 (P1) 的性能上界 (upper bound) 之间的差距, 在此基础上, 为了更好地说明本文所提算法的性能, 将与 CNA<sup>[5]</sup> 及 Random Selecting 算法进行对比. 基于 CNA 的准入控制算法主要思想是: 按照 MTCD 的平均信道条件与目标速率计算所需的子载波数目, 并由此计算所需控制信道容量, 按照其值从小到大的顺序依次准入; Random Selecting 算法的主要思想是: 随机选取 MTCD 准入.

图 1 表示  $R_k^T = 450 \text{ kbits/s}, f_k = 0.5 \forall k, C = 20$  时, 100 个 MTCD 中准入的数目与 UE 数目之间的关系. 随着 UE 数目的增加, UE 占用的资源

增多,准入的 MTCD 数目减少.

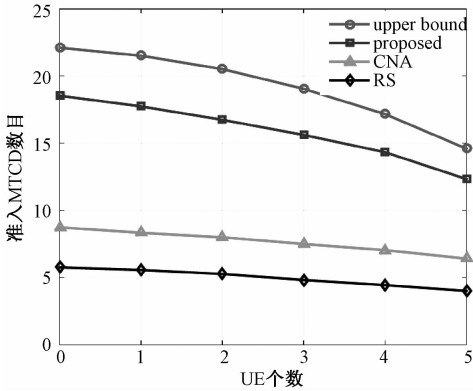


图 1 准入 MTCD 数目与 UE 数目关系

Fig.1 Number of MTCDs admitted versus UE number

当系统中仅存在 1 个 UE 时,图 2 与图 3 分别表示系统准入的 MTCD 数目与目标速率及控制信道子载波数目之间的关系.随着目标速率的增加,每个 MTCD 占用的系统资源增多,准入数目减少;随着控制信道子载波数目的增加,MTCD 可以使用的子载波数目增加,系统准入的 MTCD 数目增加.由于数据传输子载波总数为 50,因此,当控制信道子载波数目大于 25 时,所有用于数据传输的子载波都被分配,因此,系统准入的 MTCD 数目不再增加.

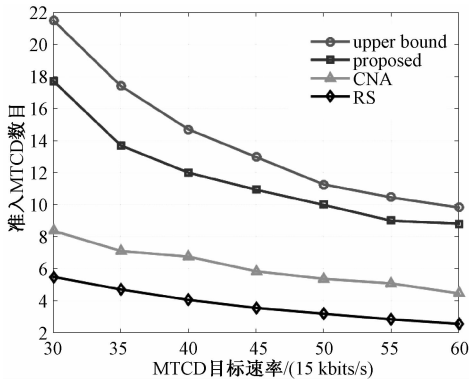


图 2 准入 MTCD 数目与 MTCD 目标速率关系

Fig.2 Number of MTCDs admitted versus data rate

当系统中存在相同数目的 2 类 MTCD,  $f_1 = 0.25, f_2 = 0.5$ , 相应的目标速率分别为  $R_1^T = 600\text{kbits/s}, R_2^T = 300\text{kbits/s}$  时,图 4 对比 4 种算法对不同类型 MTCD 的准入个数,所提算法更均衡地准入 2 种类型的 MTCD. CNA 算法由于按照 MTCD 占用控制信道的大小依次准入,因此,准入的 MTCD 都为第 1 种类型.

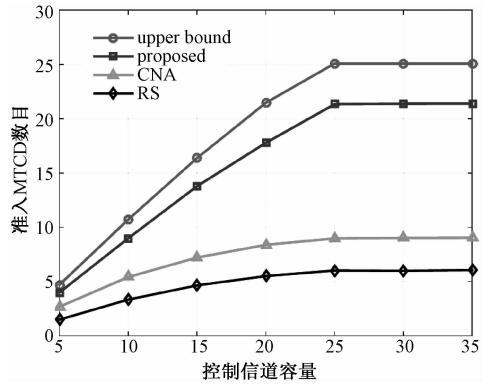


图 3 准入 MTCD 数目与控制信道容量关系

Fig.3 Number of MTCDs admitted versus control channel

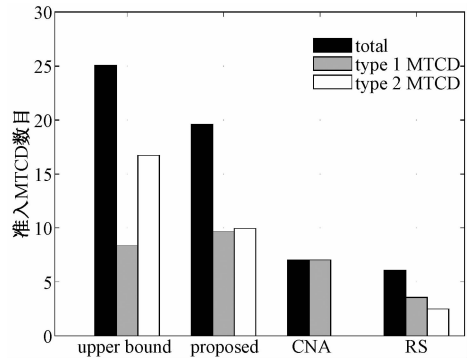


图 4 不同类型 MTCD 的准入数目比较

Fig.4 Numbers of MTCDs admitted of different types

## 4 结束语

本文主要针对 MTCD 数量巨大的特性,研究 OFDMA 蜂窝网络中 H2H 与 M2M 共存场景下系统过载情况的准入控制以及资源分配问题.针对共存场景系统过载的情况,并且考虑控制信道的影响,形成了最大化准入 MTCD 数目的 MINLP 问题.由于 MINLP 问题难以求得最优解,本文通过凸松弛将其转化为标准凸问题,由求解凸问题得到原问题解的上界,并依据 KKT 条件的相关推论进一步提出一种低复杂度的求解算法,仿真结果表明所提算法与上界相比性能损失小,且明显优于 2 种对比算法.

## 参考文献

- [1] 3GPP. Study on facilitating machine to machine communication in 3GPP systems (release 8) [R]. Technical Report 22.868 V8.0.0, 2007,3.
- [2] 3GPP. Service requirements for machine-type communications (release 11) [R]. Technical Specification, 22.368 V11.5.0,

- 2012,6.
- [ 3 ] Zanelle A, Zorzi M, dos Santos A F, et al. M2M massive wireless access: challenges, research issues, and ways forward[ C]//Globecom Workshops ( GC Wkshps), IEEE, 2013: 151-156.
- [ 4 ] Zheng K, Hu F, Wang W, et al. Radio resource allocation in LTE-advanced cellular networks with M2M communications [J]. Communications Magazine, IEEE, 2012, 50(7): 184-192.
- [ 5 ] Huang J, Subramanian V G, Agrawal R, et al. Joint scheduling and resource allocation in uplink OFDM systems for broadband wireless access networks [ J]. Journal on Selected Areas in Communications, IEEE, 2009, 27( 2 ): 226-234.
- [ 6 ] Aijaz A, Aghvami H. On radio resource allocation in lte networks with machine-to-machine communications [ C]// Vehicular Technology Conference ( VTC Spring ), IEEE, 2013: 1-5.
- [ 7 ] Aijaz A, Tshangini M, Nakhai M R, et al. Energy-efficient uplink resource allocation in LTE networks with M2M/H2H co-existence under statistical QoS guarantees [ J ]. Transactions on Communications, IEEE, 2014, 62 ( 7 ): 2 353-2 365.
- [ 8 ] Abdelnasser A, Hossain E, Kim D I. Tier-Aware resource allocation in OFDMA macrocell-small cell networks [ J]. Transactions on Communications, IEEE, 2015, 63(3): 695-710.
- [ 9 ] Monemi M, Rasti M, Hossain E. On joint power and admission control in underlay cellular cognitive radio networks [ J]. Transactions on Wireless Communications, IEEE, 2015, 14(1): 265-278.
- [ 10 ] Lien S Y, Chen K C, Lin Y. Toward ubiquitous massive accesses in 3GPP machine-to-machine communications [ J]. Communications Magazine, IEEE, 2011, 49(4): 66-74.
- [ 11 ] Osti P, Lassila P, Aalto S, et al. Analysis of PDCCH performance for M2M traffic in LTE [ J]. Transactions on Vehicular Technology, IEEE, 2014, 63(9): 4 357-4 371.
- [ 12 ] Wu J, Zhou S, Niu Z, et al. Traffic-aware data and signaling resource management for green cellular networks [ C]// International Conference on Communications ( ICC ), IEEE, 2014: 3 499-3 504.