

# 基于最佳虚拟网关的认知 SCMA 系统

孟乃宣, 孙 君

(南京邮电大学江苏省无线通信实验室, 江苏南京 210003)

**摘要:** 在 5G 的海量机器类通信(mMTC)场景下,为解决频谱资源不足和网络拥塞问题,本文提出一种基于最佳虚拟网关的认知 SCMA 系统模型.该模型根据 QoS 要求和地理位置把机器类通信设备(MTCD)分成独立的集群,在每个集群中通过认知无线电技术感知可能提供空闲频谱资源的 LTE 用户,定义为虚拟网关,再根据满意度最大规则选出最佳虚拟网关,将最佳虚拟网关提供的频谱资源分为多个子载波组,并设计 MTCD 与子载波组的最优匹配算法,MTCD 以 SCMA(稀疏码多址接入 Sparse Code Multiple Access)方式接入网络.仿真结果表明所提方案可有效提高系统的吞吐量.

**关键词:** 海量机器类通信; 虚拟网关; 认知无线电; 稀疏码多址接入(SCMA); 子载波组匹配

**中图分类号:** TN929.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2021)04-0736-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20200165

## Cognitive SCMA System Based on Optimal Virtual Gateway

MENG Nai-xuan, SUN Jun

(Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

**Abstract:** In the massive machine type communication(mMTC) scenario of 5G, in order to solve the problem of insufficient spectrum resources and imperfect resource allocation, this paper proposes a cognitive SCMA system model based on the best virtual gateway. This model divides machine type communication devices (MTCDs) into independent clusters based on QoS requirements and geographic location. In each cluster, cognitive radio technology is used to perceive LTE (Long Time Evolution) users who may provide idle spectrum resources, which are defined as virtual gateways. Then the best virtual gateway is selected according to the rule of maximum satisfaction. The spectrum provided by the best virtual gateway is divided into multiple subcarrier groups, and design an optimal matching algorithm between MTCDs and subcarrier groups. MTCDs access the network through the SCMA mode. Simulation results show that the proposed scheme can effectively improve the throughput of the system.

**Key words:** massive machine type communication (mMTC); virtual gateway; cognitive radio; SCMA (sparse code multiple access); subcarrier group matching

## 1 引言

当今世界的需求是全天候高速无处不在的连接,这种需求催生了物联网(IoT)这一概念的出现.机器类通信(MTC)是构成物联网的必要条件,它允许智能对象在无需人为干预的情况下进行自主通信.mMTC是第五代(5G)无线通信系统的三大应用场景之一.MTC主要发生在上行链路,终端数量庞大,每次会话持续时间短且次数频繁<sup>[1]</sup>.蜂窝网络以其覆盖范围广、通信可靠等特点成为向MTC提供网络服务的理想选择.但蜂窝

网络主要是为人与人(H2H)通信设计的,不能很好地满足机器类通信的特点<sup>[2]</sup>.另外,MTCD数量的快速增长给蜂窝网络带来了各种架构方面的挑战<sup>[3]</sup>.

为了应对海量机器类通信带来的挑战,近几年文献中提出了一些解决方案.一种想法是采用数据聚合技术,文献[4~6]均提出了基于簇的调度方案,指定一种设备负责从周围的MTCD收集数据,处理后将其传输到基站(Base Station BS),以提高通信效率.文献[7]通过多个移动数据聚合器(MDA)的协作通信有效降低了系统的中断概率.在文献[8]中,提出了一种基于设备

到设备(D2D)通信来聚合和中继 MTC 流量的通信方案,以提高通信链路的可靠性和能效.文献[9]从节能的角度出发,研究了蜂窝网络中关于 MTC 的节能调度和分组问题,以提高网络寿命.但上述方案都是在运营商许可的有限带宽内分配频谱,这可能不足以支持蜂窝系统上机器类通信所产生的海量数据流量.另一种想法是使用认知无线电(CR)技术,在文献[10]中提到允许智能设备在不干扰主要用户的条件下机会性地访问周围的授权频谱,这种技术的使用可以提高系统的频谱利用率.文献[11]使用 CR 技术,在 MTC 网关和 LTE 用户之间进行无线电资源交易,并建立了基于联盟区块链的无线电资源交易的信用支付系统.文献[12]从工程和商业的角度评估了在蜂窝频段上进行认知机器对机器通信的可行性,认为其可以有效减少无线电接入网络的拥塞.文献[13]提出了一种博弈论框架下认知小蜂窝的动态资源分配算法,可有效提高认知小蜂窝网络的系统容量.文献[14,15]将非正交多址技术(NOMA)集成到认知正交频分复用系统中,可提高系统容量和可访问用户的数量.文献[16]对协作频谱感知时间和辅助用户系统功率控制优化问题的联合设计进行了研究,在基于认知的网络中实现最大能效.但这些方案都是以感知到授权频谱为主要任务,没有考虑感知到的授权频谱是否能够最大程度满足 MTC 的通信需求.

为解决以上所提问题,本文提出一种基于最佳虚拟网关的认知 SCMA 系统模型,旨在在进一步提高系统吞吐量.在每个集群中通过 CR 技术找出令 MTC 满意度最高的 LTE 用户作为最佳虚拟网关,保证最大程度满足集群中 MTC 的通信需求.然后将最佳虚拟网关提供的空闲频谱分为多个子载波组,设计 MTC 与子载波组的最优匹配算法, MTC 以 SCMA 方式接入网络.该方案可有效提高系统的吞吐量.

## 2 系统模型与问题建模

### 2.1 网络模型概述

如图 1 所示,该模型由 1 个配备有 SDN 控制器的宏基站,多个 SDN 交换机,  $M$  个 MTC 用户,  $L$  个 LTE 用户以及  $C$  个小基站构成.在蜂窝网络中, LTE 用户为主要用户,拥有授权频谱并对其所拥有的授权频谱具有优先使用权.但 LTE 用户并非时时刻刻都会进行数据传输,所以在 mMTC 场景下,部分 MTC 可通过“伺机”的方式使用 LTE 用户的空闲授权频谱,这样可以提高系统频谱利用率,进一步扩大网络容量.我们可提供空闲频谱的 LTE 用户为虚拟网关.每个集群中的 MTC 首先感知周围是否存在 LTE 用户,然后将感知结果传输至本集群的小基站处,小基站经过计算判断哪

个虚拟网关的授权频谱最适合用于传输数据,然后以广播的方式告知集群中的 MTC, MTC 以 SCMA 的方式使用授权频谱接入网络.这样就构成了一个基于最佳虚拟网关的认知 SCMA 系统.

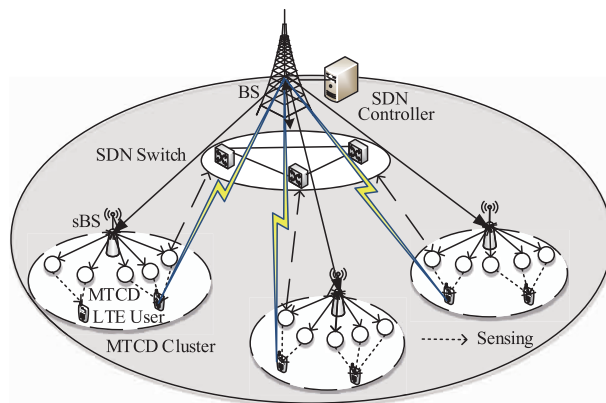


图1 单小区认知SCMA系统模型图

### 2.2 MTC 用户聚类

由于不同的 MTC 具有不同的 QoS 要求,在通信时需要具有不同 QoS 要求的 MTC 进行区别处理.并且 MTC 进行频谱感知时,需要与所感知的主要用户距离相近,所以有必要将 MTC 进行聚类,使类中的 MTC 位置相近, QoS 要求相似.与文献[5]和文献[8]类似,我们使用一种半静态模型,由宏基站、小基站和 MTC 构成的网络拓扑不会频繁变化,且该拓扑在变化之前会长期保持不变.在宏基站覆盖范围下, MTC 每隔一段时间将其位置信息和 QoS 要求通过 SDN 交换机发送至 SDN 控制器, SDN 控制器经过计算将得出的聚类结果传输至集群所在范围的小基站,然后由小基站通知其负责的 MTC 集群成员.在本文中考虑的 QoS 要求为最大容忍延迟.

设  $M$  个 MTC 的最大容忍延迟集  $\mathbf{t}$  为  $\mathbf{t} = \{t_1, t_2, \dots, t_M\}$ , 地理位置集  $\mathbf{z}$  为  $\mathbf{z} = \{z_1, z_2, \dots, z_M\}$ ,  $\mathbf{z}$  为二维变量,表示 MTC 的横坐标与纵坐标. MTC <sub>$i$</sub>  和 MTC <sub>$j$</sub>  关于  $\mathbf{t}$  和  $\mathbf{z}$  的相似度<sup>[5]</sup>分别为

$$s_{i,j}^t = \exp\left(\frac{-\|t_i - t_j\|^2}{2\sigma_t^2}\right), i, j \in M \quad (1)$$

$$s_{i,j}^z = \exp\left(\frac{-\|z_i - z_j\|^2}{2\sigma_z^2}\right), i, j \in M \quad (2)$$

MTC <sub>$i$</sub>  和 MTC <sub>$j$</sub>  的总相似度表示为

$$s_{i,j} = (s_{i,j}^t)^\theta \cdot (s_{i,j}^z)^{1-\theta}, \theta \in [0, 1] \quad (3)$$

进而得到一个相似度矩阵  $\mathbf{s}$ :

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 & s_{1,2} & \cdots & s_{1,M} \\ s_{2,1} & 0 & \cdots & s_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{M,1} & s_{M,2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

谱聚类算法只需要计算 MTC 之间的相似度矩阵,较为简便,所以本文选择使用谱聚类算法对 MTC

聚类.

首先根据相似度矩阵  $\mathbf{s}$  构造对角矩阵  $\mathbf{D}$  和拉普拉斯矩阵  $\mathbf{L}$ :

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^M s_{1,j} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sum_{j=1}^M s_{2,j} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sum_{j=1}^M s_{M,j} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\mathbf{L} =$

$$\begin{bmatrix} (\sum_{j=1}^M s_{1,j}) - s_{1,1} & -s_{1,2} & \cdots & -s_{1,M} \\ -s_{2,1} & (\sum_{j=1}^M s_{2,j}) - s_{2,2} & \cdots & -s_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -s_{M,1} & -s_{M,2} & \cdots & (\sum_{j=1}^M s_{M,j}) - s_{M,M} \end{bmatrix} \quad (6)$$

为方便观察特征值,将拉普拉斯矩阵  $\mathbf{L}$  进行归一化:  $\mathbf{L}_g = \mathbf{D}^{-1}\mathbf{L} = \mathbf{I} - \mathbf{D}^{-1}\mathbf{s}$ . 然后计算  $\mathbf{L}_g$  的特征值和特征向量,基于  $\mathbf{L}_g$  的  $k$  个最小特征值确定聚类数  $C$ . 再用与  $\mathbf{L}_g$  的  $k$  个最小特征值对应的特征向量构造新的特征向量. 最后,将改进后的特征向量转化为 K-means 聚类算法,得到 MTCD 的聚类结果.

令  $N_c$  表示第  $c$  类集群中 MTCD 的个数,则第  $c$  类 MTCD 的平均延迟容忍时间  $\bar{t}_k$  为

$$\bar{t}_c = (\sum_{n=1}^{N_c} t_n) / N_c \quad (7)$$

### 2.3 MTCD 用户频谱感知

MTCD 使用授权频谱进行通信时,不能对主要用户产生干扰,当主要用户需要进行数据传输时,MTCD 要立刻将所占用的频谱让出,因此 MTCD 是否能够准确感知主要用户的状态至关重要.

MTCD 进行频谱感知时采用能量检测的方式. 为避免出现“隐藏终端”的现象,采用多个 MTCD 协作检测的方式. MTCD 对处于所在集群范围内的 LTE 用户进行频谱感知. 每个参与感知的 MTCD 将能量检测结果依次发送至自己所在集群的小基站处,然后小基站将所有参与检测的 MTCD 的检测结果汇总并经过判决得出最终结论,最后以广播的方式告知其所在集群的所有 MTCD.

如图 2 所示,规定一个帧长为  $T$  的帧由 3 部分组成:频谱感知时间,感知结果传输时间和 MTCD 数据传输时间. 规定每个集群内所有参与频谱感知的 MTCD 同

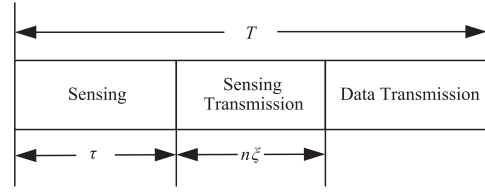


图2 帧结构

步感知频谱. 设对某一 LTE 用户进行频谱感知所用的时间为  $\tau$ , 传输感知结果所用时间为  $n\xi$ ,  $n$  为参与频谱感知的 MTCD 数量,  $\xi$  为每个 MTCD 向小基站传输需要的平均时间.

误警概率和检测概率<sup>[14]</sup>分别表示为

$$p_f = Q\left(\left(\frac{\varepsilon}{\sigma_u^2} - 1\right)\sqrt{n\tau f_s}\right) \quad (8)$$

$$p_d = Q\left(\left(\frac{\varepsilon}{\sigma_u^2} - \bar{\gamma} - 1\right)\sqrt{\frac{n\tau f_s}{2\bar{\gamma} + 1}}\right) \quad (9)$$

其中,  $\varepsilon$  为小基站的能量判决门限.  $\bar{\gamma} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \frac{h_m^2 \sigma_s^2}{\sigma_u^2}$ ,

$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt$ .  $f_s$  为 MTCD 进行能量检测时的抽样频率.  $\sigma_u^2$  为加性高斯白噪声的功率.  $h_m$  为第  $m$  个 MTCD 到主要用户的信道增益,  $\sigma_s^2$  为主要用户的发射功率.

### 2.4 问题建模

在一个帧长  $T$  内, 集群  $c$  中的小基站以广播的方式告知集群中的 MTCD 使用哪一个虚拟网关提供的授权频谱, 设该虚拟网关真正处于空闲状态的概率为  $p_h$ , 存储的电量为  $e_c$ . 其所能达到的容量  $U_c$  可分为以下几种情况.

(1)  $H_0/H_1$ : 小基站判决错误, 频谱同时为 MTCD 和 LTE 用户提供服务, MTCD 需要立刻让出授权频谱,  $U_c \approx 0$ .

(2)  $H_1/H_0$ : 小基站判决错误, 频谱空闲但被误判为忙碌, MTCD 不进行数据传输,  $U_c = 0$ .

(3)  $H_1/H_1$ : 小基站判决正确, 频谱被 LTE 用户使用, MTCD 不进行数据传输,  $U_c = 0$ .

(4)  $H_0/H_0$ : 小基站判决正确, 频谱确实处于空闲状态, MTCD 进行数据传输,  $U_c = p_h \cdot (1 - p_f) \cdot (T - \tau - n\xi)$ .  $R_c, R_c$  表示 MTCD 使用该段频谱时产生的速率.

在数据传输阶段, 采用频率域的 SCMA 方式接入. 单个 SCMA 系统由  $K$  个子载波,  $J$  个 MTCD 组成. 一个资源块由 12 个连续的子载波构成, 将连续的子载波进行连续分组得到多个子载波组. 将集群中的 MTCD 以  $J$  个为一组进行分组得到多个 MTCD 用户组. 然后将不同的子载波组分配给不同的 MTCD 用户组, 形成多个 SCMA 系统, 集群中的 MTCD 就可以使用空闲授权频谱传

输数据.

在集群  $c$  中, 设小基站检测到的空闲频谱带宽为  $B_c$ , 1 个子载波的带宽为  $B_0 = 15\text{kHz}$ , 该空闲频谱可分为  $Q = B_c / (K \cdot B_0)$  个子载波组, 可为  $F = J \cdot Q$  个 MTCD 提供服务. 同一个 MTCD 使用不同的子载波组会产生不同的速率, 所以集群中用户与子载波的分组匹配非常重要.

对于  $Q$  个子载波组,  $F$  个 MTCD 的集群而言, 使用该频谱达到的总和速率为

$$R_c = B_0 \sum_{q=1}^Q \sum_{f=1}^F v_{qf} \sum_{k=(q-1)K+1}^{qK} x_{k,f} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{k,f} |h_{k,f}|^2}{\sigma_u^2 + I_{k,f}} \right) \quad (10)$$

$$I_{k,f} = \sum_{j \in \{S_l | |h_{k,f}|^2 > |h_{k,j}|^2\}} p_{k,j} |h_{k,j}|^2 \quad (11)$$

其中,  $I_{k,f}$  指单个用户组中占用子载波  $k$  的用户集合  $S_k$  中其他用户对第  $f$  个用户产生的干扰.  $p_{k,f}$  表示第  $f$  个用户在使用第  $k$  个子载波时的发射功率.  $v_{qf}$  为用户与子载波组的匹配因子,  $v_{qf} = 1$  表示将第  $q$  个子载波组分配给第  $f$  个用户, 反之,  $v_{qf} = 0$ .  $x_{k,f}$  为用户与子载波的指示因子,  $x_{k,f} = 1$  表示第  $f$  个用户使用第  $k$  个子载波, 反之,  $x_{k,f} = 0$ .

因此, 在一个帧长  $T$  内, 集群  $c$  能够达到的吞吐量 (单位为 bit/T) 为

$$S_c = p_{H_c} (1 - p_f) (T - \tau - N\xi) e_c R_c \quad (12)$$

本文的目标是在一个帧长  $T$  内, 通过寻找最佳虚拟网关、优化感知时长  $\tau$  和感知用户数目  $n$  以及对用户进行适当的子载波和功率分配来最大化认知 SCMA 系统的吞吐量. 优化问题建模如下:

$$\begin{aligned} \text{op: } & \max_{\tau, n, B_c, v_{qf}, x_{k,f}, p_{k,f}} \sum_{c=1}^C S_c \\ \text{s. t. } & C1: \tau + n\xi \leq \min\{T, t_c\}, \tau \in R^+, n \in N^+ \\ & C2: p_f \leq \beta \\ & C3: p_d \geq \alpha \\ & C4: \sum_{q=1}^Q v_{qf} = 1, \forall f \in F \\ & C5: \sum_{k=1}^K p_{k,f} \leq p_f, \forall f \in F \\ & C6: p_{k,j} \geq 0, \forall k \in K, \forall f \in F \\ & C7: x_{k,f} \in \{0, 1\}, \forall k \in K, \forall f \in F \\ & C8: \sum_{f=1}^F x_{k,f} \leq d_x, \forall k \in K \\ & C9: \sum_{k=(q-1)K+1}^{qK} x_{k,f} \leq l, \forall q \in Q, \forall f \in F \\ & C10: x_f \neq x_i, \forall f, i \in F, f \neq i \end{aligned} \quad (13)$$

其中, C1 ~ C3 约束了感知时长  $\tau$  和感知用户数目  $n$  两个优化变量的可行域. C1 保证感知时间和感知结果传

输时间满足集群  $c$  的 QoS 要求. C4 表示一个用户只能选择使用一个子载波组. C5 ~ C6 约束了每个用户的发射功率. C8 和 C9 分别表示一个子载波最多可同时被  $d_x$  个用户使用, 每个用户最多可使用  $l$  个子载波. C10 表示每个用户选择的子载波不完全相同.

### 3 问题解决

要想整个认知 SCMA 系统的吞吐量最大, 就需要  $C$  个集群中每一个集群的吞吐量达到最大. 为方便讨论, 本文以其中一个集群  $c$  为例进行分析, 优化问题简化为

$$\begin{aligned} \text{op: } & \max_{\tau, n, B_c, v_{qf}, x_{k,f}, p_{k,f}} S_c \\ \text{s. t. } & C1 - C10 \end{aligned} \quad (14)$$

由于  $n, v_{qf}, x_{k,f}$  的存在, 优化问题 op 是一个混合整数非凸规划问题. 为了将各变量之间的紧密关系解耦, 可将 op 分解为三个子优化问题: 最佳虚拟网关选择 op1、最优感知时间和最优感知用户数目求解 op2、用户子载波和功率最优分配 op3. 对三个子优化问题用不同的方法进行求解, 然后将最优值进行联合, 即可得到基于最佳虚拟网关的认知 SCMA 系统吞吐量.

#### 3.1 最佳虚拟网关的选择

集群  $c$  所在范围内分布着多个 LTE 用户, 这些用户拥有属于自己的授权频段. 当其中一些 LTE 用户不进行数据传输时, 其所拥有的频段会处于空闲状态, 定义这样的 LTE 用户为虚拟网关. 考虑通过 CR 技术将这些空闲频段出让给部分对延迟要求不高的 MTCD. 但在一个帧长  $T$  内, 虚拟网关所能提供的空闲频段大小不同, 有些虚拟网关可提供大带宽的空闲频谱, 而有些虚拟网关只能提供小带宽的空闲频谱. 在花费同样的感知时间和传输时间的条件下, 拥有大带宽的虚拟网关可以在  $T$  内为更多 MTCD 提供服务, 使系统产生更大的吞吐量. 另一个重要的问题是虚拟网关自身所存储的电量有限, 如果在为 MTCD 服务时由于电量不足发生中断, MTCD 的数据将无法传输, 这对 MTCD 而言损失很大. 所以选择最佳虚拟网关这一步骤对于扩大系统吞吐量至关重要.

在所设场景下进行最佳虚拟网关选择的过程如下.

**步骤 1** 对处于集群  $c$  所在范围内的 LTE 用户进行编号  $\{c \in C | LTE_1, LTE_2, \dots, LTE_G\}$ .

**步骤 2** 在一个帧长时间  $T$  内, 集群内的每个  $LTE_g$  用户都会有  $n_g$  个集群内的 MTCD 对其进行能量检测:  $\{LTE_g | MTCD_{g1}, MTCD_{g2}, \dots, MTCD_{gn_g}\}$ .

**步骤 3** MTCD 将检测结果传输至负责本集群的小基站. 此时小基站处会形成一个列表  $\vartheta$ , 列表内容为所检测到的 LTE 用户所处状态与地理位置,  $\vartheta = \{LTE_g | (mode_g, location_g)\}$ . 其中,  $mode_g = \{0, 1\}$ ,  $mode_g = 0$  和

$mode_g = 1$  分别表示  $LTE_g$  处于空闲状态和忙碌状态.  $location_g$  表示  $LTE_g$  的地理位置.

**步骤 4** 小基站将列表中  $mode = 1$  的 LTE 用户信息从列表中剔除, 形成一个虚拟网关列表  $\psi, \psi = \{GW_g | (mode_g = 0, location_g)\}$ .

**步骤 5** 根据列表  $\psi$  中虚拟网关的  $location_g$  向宏基站发送信息, 请求虚拟网关  $GW_g$  在帧长  $T$  内可提供的空闲频谱带宽大小, 完善虚拟网关列表中的内容,  $\psi = \{GW_g | (mode_g, location_g, B_g)\}$ .

**步骤 6** 小基站根据此时列表中虚拟网关的  $location_g$  信息向所在集群中的 LTE 用户广播, 请求得知这些用户存储的电量情况, 进一步完善虚拟网关列表,  $\psi = \{GW_g | (mode_g, location_g, B_g, e_g)\}$ , 其中  $e_g \in (0, 1]$ ,  $e_g$  值越大表示电量越充足.

每经过帧长  $T$ , 小基站处的虚拟网关列表  $\psi$  会进行一次更新. 在  $T$  内, 可认为整个网络拓扑为静态的. 在解决该问题时假设用户子载波、功率分配已经确定. 为了评价虚拟网关的好坏程度, 定义一个满意度函数  $\Gamma$ , 对于第  $c$  个集群的 MTCD 而言, 选择使用第  $g$  个虚拟网关的满意度函数可表示为

$$\Gamma_{cg} = \frac{e_g \cdot T \cdot R_{cg}}{\Lambda_c} \quad (15)$$

其中, 分子部分表示在  $T$  内, 集群  $c$  使用第  $g$  个虚拟网关时可达到的吞吐量,  $\Lambda_c$  为在  $T$  内集群  $c$  中 MTCD 所需传输的数据量.

用户满意度越高就表示虚拟网关的性能越好. 故最佳虚拟网关的选择问题可以表示为

$$\text{op1: } \max_{g \in \psi} \Gamma_{cg} = \frac{e_g \cdot T \cdot R_{cg}}{\Lambda_c} \quad (16)$$

### 3.2 最优感知时间和最优感知用户数目求解

在最佳虚拟网关、用户子载波和功率固定时优化感知时长  $\tau$  和感知用户数目  $n$ . 此时优化问题变为

$$\text{op2: } \max_{\tau, n} U_2 = (1 - p_f) (T - \tau - n\xi) \quad (17)$$

$$\text{s. t. } C1 - C3$$

由于  $Q(x)$  为减函数, 检测概率  $p_d$  的减小会让虚警概率  $p_f$  随之减小, 所以当  $p_d$  取最小值时,  $p_f$  会取到最大值. 此时目标函数可以取得满足约束条件下的最大值.

当  $p_d = \alpha$  时,

$$p_f = Q[Q^{-1}(\alpha) \sqrt{2\bar{\gamma} + 1} + \bar{\gamma} \sqrt{n\tau f_s}] \quad (18)$$

由 C4 得,

$$Q[Q^{-1}(\alpha) \sqrt{2\bar{\gamma} + 1} + \bar{\gamma} \sqrt{n\tau f_s}] \leq \beta \quad (19)$$

$$n\tau \geq \frac{O^2}{f_s \bar{\gamma}^2}, O = Q^{-1}(\beta) - Q^{-1}(\alpha) \sqrt{2\bar{\gamma} + 1} \quad (20)$$

优化问题 op2 可以写为

$$\text{op2: } \max U_2 = [1 - Q(Q^{-1}(\alpha) \sqrt{2\bar{\gamma} + 1} + \bar{\gamma} \sqrt{n\tau f_s})]$$

$$\cdot (T - \tau - n\xi)$$

$$\text{s. t. } \tau + n\xi \leq \min\{T, \bar{t}_c\}$$

$$n\tau \geq \frac{O^2}{f_s \bar{\gamma}^2} \quad (21)$$

当给定  $n$  时, 存在  $\tau^* \in (0, \min\{T, \bar{t}_c\} - n\xi]$  使得 op2 取得最大值<sup>[17]</sup>. 由于优化变量中  $n$  为整数, 这是一个 NP 问题. 又因为  $n$  有最大值和最小值约束, 所以可通过固定  $\tau$  来求解  $n$  的最优解. 给定更新步长  $\Delta$ , 然后在满足最大约束下不断更新  $\tau$ , 再遍历  $n$ . 如算法 1 所示, 求出最优感知时间  $\tau^*$  和感知用户数目  $n^*$ .

#### 算法 1 最优感知时间和最优感知用户数目求解算法

输入:  $T, \bar{t}_c, \xi, \alpha, \beta, f_s$ , 感知时间更新步长  $\Delta$

输出:  $\tau^*, n^*$

1: 初始化:  $\tau^{(1)} \rightarrow 0, k = 1$

2: while  $\tau \leq \min\{T, \bar{t}_c\} - \xi$

3: for  $n = 1 : \text{floor}[(\min\{T, \bar{t}_c\} - \tau^{(k)})/\xi]$

$$4: \gamma_n = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \frac{h_m^2 \sigma_u^2}{\sigma_u^2}$$

5: 根据式(21)计算  $U_{2n}^{(k)}$

6: end

7: 记录  $\tau = \tau^{(k)}$  时, 令  $U_2^{(k)} = \max U_2^{(k)}$  时的  $n, n^{(k)} = n$

8:  $k = k + 1, \tau^{(k)} = \tau^{(k-1)} + \Delta$

9: end

10: 找出  $\max U_2$  中的最大值及其对应的  $\tau$  和  $n$

11: if  $\tau n = O^2 / f_s \bar{\gamma}_n$

12:  $\tau^* = \tau, n^* = n$

13: else

14: 保持  $\tau$  不变, 逐个增加  $n$ , 使  $\tau n = O^2 / f_s \bar{\gamma}_n$

15: end

### 3.3 用户子载波和功率最优分配

经过 3.1 节和 3.2 节, 集群  $c$  中的小基站会向集群中的 MTCD 广播使用哪个虚拟网关, 在什么时间内传输数据. 根据式(10)(11), 该优化问题可表示为

$$\text{op3: } \max_{v_{q,f}, x_{q,f}, p_{q,f}} R_c \quad (22)$$

$$\text{s. t. } C4 - C10$$

首先计算集群中 MTCD 距离最佳虚拟网关的距离  $d_{g,f}$ , 并按从小到大的顺序排列, 然后将对应的 MTCD 按此顺序排序, 取前  $F$  个 MTCD 依次进行子载波组的分配. MTCD 用户  $f \in F$  将第  $q$  个子载波组中的子载波信道增益  $(h_{1,f}^q, h_{2,f}^q, \dots, h_{k,f}^q)$  进行降序排列, 对前  $l$  个子载波信道增益进行求和, 得到  $h_f^q$ , 作为用户  $f$  使用第  $q$  个子载波组的信道增益. 同理, 可以得出用户  $f$  使用  $Q$  个子载波组的信道增益集合:  $\{h_f^1, h_f^2, \dots, h_f^Q\}$ , 对该集合中的所有元素进行降序排列, 作为用户  $f$  使用  $Q$  个子载波

组的优先级列表. 其余  $f \in F$  进行同样操作, 得到  $F$  个用户使用  $Q$  个子载波组的优先级列表  $Rank_{F \times Q}$ . 从第 1 个 MTCD 开始按照优先级列表  $Rank_{F \times Q}$  依次匹配最优子载波组. 当选择某一子载波组的用户数目等于  $J$  时, 表示该子载波组与用户组匹配完成, 将该子载波组删除. 重复操作, 直至所有子载波组都完成匹配. 具体实现见算法 2.

#### 算法 2 用户与子载波组匹配算法

```

输入:  $Rank_{F \times Q}, J$ 
输出: 用户与子载波组匹配因子矩阵  $\nu$ 
1: 初始化: 用户数目  $count_1 = 0$ , 选择的子载波组  $choice_1 = 0$ 
2: for  $i = 1 : F$ 
3:   for  $j = 1 : Q$ 
4:     if  $count(Rank_{i,j}) < J$ 
5:        $count(Rank_{i,j}) = count(Rank_{i,j}) + 1, choice_i = Rank_{i,j}$ 
6:       break
7:     end if
8:   if  $choice_i \neq j$ 
9:      $\nu_{i,j} = 0$ 
10:   else
11:      $\nu_{i,j} = 1$ 
12:   end if
13: end for

```

完成用户与子载波组的匹配后, 集群  $c$  中存在  $Q$  组单个 SCMA 系统, 然后对每组 SCMA 系统进行子载波分配和功率分配<sup>[18]</sup>. 首先任意给定一个满足约束条件  $C7 \sim C10$  的子载波分配矩阵  $\mathbf{X}_{K \times J}^0$ , 在等功率分配的条件下计算干扰矩阵  $\mathbf{I}_{K \times J}^0$ , 基于干扰最小化原理进行子载波分配. 然后借助 MATLAB 的 CVX 工具箱求解最优功率分配矩阵  $\mathbf{P}_{K \times J}^0$ , 更新干扰矩阵和子载波分配矩阵, 直至子载波分配矩阵不再变化. 此时的子载波分配矩阵  $\mathbf{X}_{K \times J}$  和功率分配矩阵  $\mathbf{P}_{K \times J}$  即为最优子载波分配矩阵和功率分配矩阵. 将每组 SCMA 系统的速率相加即可得到集群  $c$  的速率  $R_c$ .

## 4 仿真分析

在一个半径为 500m 的单小区上行链路系统中, 多个 MTCD 随机分布其中. 在单个 SCMA 系统中, 规定过载率为 150%, 6 个 MTCD 共同使用 4 个子载波. MTCD 到 BS 之间的信道系数  $h$  由两部分构成,  $h = h_{11} \cdot h_{12}$ .  $h_{11}$  为 MTCD 到最佳虚拟网关之间的信道系数, 由归一化的瑞利衰落分量和路径损耗生成, 路径损耗模型为  $PL(\text{dB}) = 128.1 + 37.6 \lg(d) + 20$ , 其中  $d$  为 MTCD 到最佳虚拟网关的距离.  $h_{12}$  为最佳虚拟网关到 BS 之间信道系数, 主要考虑路径损耗, 模型同上.  $p_{n_0} = 1$ . 其他仿真参数见表 1.

表 1 仿真环境参数

白噪声功率密度	-174 dBm/Hz
感知结果平均传输时间	$\xi = 0.02\text{s}$
最小检测概率	$\alpha = 0.9$
最大虚警概率	$\beta = 0.1$
MTCD 用户发射功率	$P = [-4, -2, 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12] \text{ dBm}$
1 个帧长	$T = 1\text{s}$
采样频率	$f_s = 1\text{kHz}$
单个子载波带宽	$B_0 = 15\text{kHz}$

图 3 显示了虚拟网关在帧长  $T$  内的存储电量和所能提供的空闲频谱带宽大小两个因素对满意度的影响. 在单个 SCMA 系统产生速率相同的假设下, 可以看出本文提出的联合考虑带宽和电量的方案可令用户的满意度最大. 虚拟网关存储的电量充足可以保证为 MTCD 提供持续服务, 不会因电量不足发生中断. 大带宽的空闲频谱允许更多用户传输数据, 使系统吞吐量进一步扩大. 仅考虑一个因素不够完善, 在一个集群中, 拥有大带宽的虚拟网关可能存储的电量不足, 拥有充足电量的虚拟网关可能无法提供大带宽的空闲频谱. 所以联合考虑这两个因素, 在拥有足够电量的虚拟网关中将空闲频谱带宽最大的作为最佳虚拟网关, 可以令用户满意度最大.

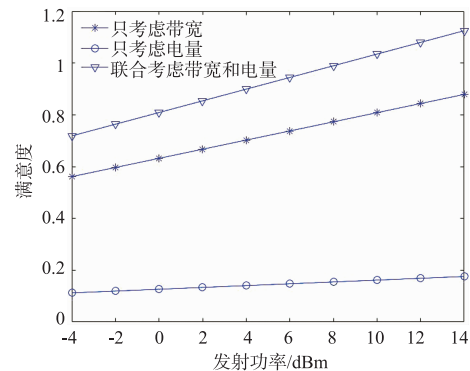


图 3 MTCD 用户对虚拟网关的满意度比较

图 4 显示了当感知用户数目  $n = 1, 3, 6$  时, 有效数据传输时间  $U_2$  随感知时间  $\tau$  变化的曲线. 可以看出, 当给定  $n$  时,  $U_2$  随  $\tau$  的增加先增大后减小, 并且  $n$  不同,  $U_2$  可取到的最大值也不同. 因为增加  $n$  和  $\tau$ , 虚警概率  $p_f$  会减小, 但  $(T - \tau - n\xi)$  部分也会随之减小. 图 4 中,  $n = 3$  时  $U_2$  取到的最大值在三者中最大,  $n = 1$  时其次. 当取到最大值后, 随着  $\tau$  的继续增加,  $n = 3$  时  $U_2$  值的下降速度比  $n = 1$  时快, 二者曲线出现一次交叉. 因为  $\tau \in (\tau^*, T]$  时,  $U_2$  主要由  $(T - \tau - n\xi)$  部分决定,  $U_2$  为减函数,  $n$  值越大, 下降速度越快. 因此有必要根据算法 1 确定最佳感知时间  $\tau^*$  和最佳感知用户数目  $n^*$ .

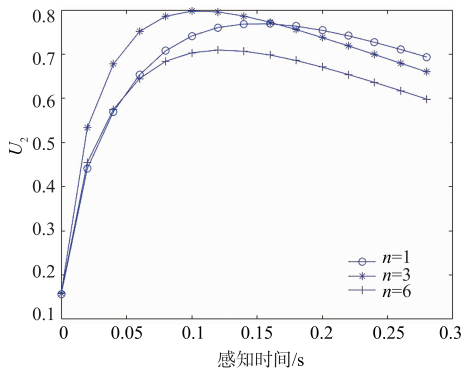


图4 有效数据传输时间 $U_2$ 与感知时间的关系曲线

在图5中,我们比较了文中所提出的 MTCD 与子载波组匹配方案和用户与子载波组随机匹配方案的系统吞吐量.假设在整个帧长  $T$  都用于数据传输,可以看出,通过使用所提出的 MTCD 与子载波组匹配算法来为用户匹配最优子载波组,可以有效提高系统的吞吐量.

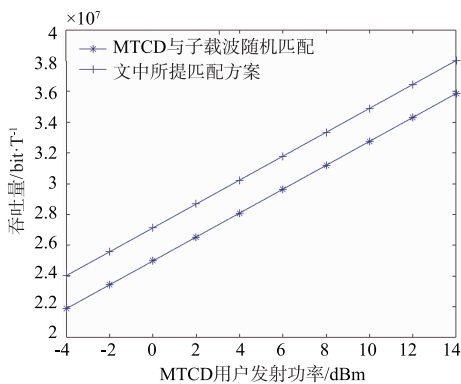


图5 SCMA系统中MTCD与子载波组匹配方案性能比较

在图6中,我们比较了4种方案在一个帧长  $T$  产生的系统吞吐量.可以看出,选择最佳虚拟网关所产生的系统吞吐量远大于随机选择的虚拟网关,因为最佳虚拟网关电量充足,空闲频谱带宽大,可允许更多 MTCD 接入网络.另外,采用协作感知的方式比单用户感知产生系统吞吐量更大,并且 MTCD 发射功率越大效果越明显.

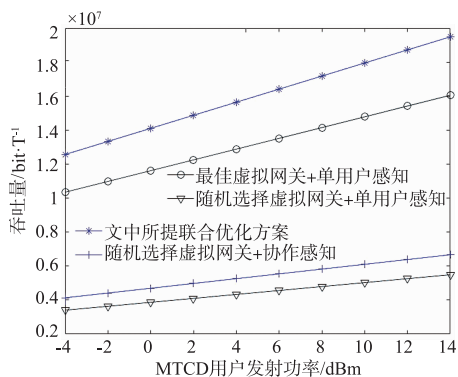


图6 4种方案的性能对比

## 5 结语

本文针对 mMTC 场景下频谱资源不足,资源分配方式不够完善的问题,提出一种基于最佳虚拟网关的认知 SCMA 系统模型.该模型根据 QoS 要求和地理位置把 MTCD 分成独立的集群,在每个集群中通过 CR 技术找出令 MTCD 满意度最高的 LTE 用户作为最佳虚拟网关,保证最大程度满足集群中 MTCD 的通信需求.然后将最佳虚拟网关提供的空闲频谱分为多个子载波组,为 MTCD 匹配最优子载波组.最后,MTCD 以频率域的 SCMA 方式使用完成匹配的子载波组接入网络.仿真结果表明所提方案可有效提高系统的吞吐量.

## 参考文献

- [1] GU J, WANG W, HUANG A, et al. Distributed cache replacement for caching-enable base stations in cellular networks [A]. IEEE International Conference on Communications [C]. New York, USA: IEEE, 2014. 2648 – 2653.
- [2] 费泽松,肖玲玲,刘婷.基于 LTE 系统的巨量机器类通信性能分析[J].北京理工大学学报,2017,37(3):304 – 309. FEI Ze-song, XIAO Ling-ling, LIU Ting. Massive machine-type communication performance analysis based on long term evolution (LTE) system [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(3): 304 – 309. (in Chinese)
- [3] 蒋继胜,朱晓荣. H2H 与 M2M 共存场景下的上行资源分配算法[J].电子学报,2018,46(5):1259 – 1264. JIANG Ji-sheng, ZHU Xiao-rong. An uplink resource allocation algorithm under the scenario of coexistence of H2H & M2M based on knapsack model [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(5): 1259 – 1264. (in Chinese)
- [4] LI M, YU F R, SI P, et al. Energy-efficient machine-to-machine (M2M) communications in virtualized cellular networks with mobile edge computing (MEC) [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 18(7): 1541 – 1555.
- [5] LIANG L, XU L, CAO B, et al. A cluster-based congestion-mitigating access scheme for massive M2M communications in internet of things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(3): 2200 – 2211.
- [6] GUO J, DURRANI S, ZHOU X, et al. Massive machine type communication with data aggregation and resource scheduling [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(9): 4012 – 4026.
- [7] SALAM T, REHMAN W U, TAO X. Cooperative data aggregation and dynamic resource allocation for massive machine type communication [J]. IEEE Access, 2018, pp(6): 4145 – 4158.

- [8] ATAT R, LIU L, MASTRONARDE N, YI Y. Energy harvesting-based D2D-assisted machine-type communications [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(3): 1289 – 1302.
- [9] MIAO G, AZARI A, HWANG T. E<sup>2</sup>-MAC: Energy efficient medium access for massive M2M communications [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(11): 4720 – 4735.
- [10] GUO Wen-xiang, YU Zhi-yong, PANG Chen, SUN Ya-min. Overview on cognitive radio spectrum sensing technology [J]. *Communications Technology*, 2018, 51(2): 261 – 265.
- [11] 孙君, 熊关. SCMA mMTC 系统中基于联盟区块链的无线电资源交易的信用支付 [J]. *电子学报*, 2019, 47(8): 1677 – 1684.  
SUN Jun, XIONG Guan. Credit payment for radio resources transactions based on consortium blockchain in SCMA mMTC [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(8): 1677 – 1684. (in Chinese)
- [12] WANG S, SHI W, WANG C. Energy-efficient resource management in OFDM-based cognitive radio networks under channel uncertainty [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(9): 3092 – 3102.
- [13] 贾亚男, 岳殿武. 博弈论框架下认知小蜂窝网络的动态资源分配算法 [J]. *电子学报*, 2015, 43(10): 1911 – 1917.  
JIA Ya-nan, YUE Dian-wu. Dynamic resource allocation algorithm based on game theory in cognitive small cell networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(10): 1911 – 1917. (in Chinese)
- [14] XU W, LI X, LEE C, et al. Joint sensing duration adaptation, user matching, and power allocation for cognitive OFDM-NOMA systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(2): 1269 – 1282.
- [15] LI X, XU W, FENG Z, et al. Matching-theory-based spectrum utilization in cognitive NOMA-OFDM systems [A]. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference [C]*. New York, USA: IEEE, 2017. 1 – 6.
- [16] HU L, SHI R, MAO M, et al. Optimal energy-efficient transmission for hybrid spectrum sharing in cooperative cognitive radio networks [J]. *China Communications*, 2019, 16(6): 150 – 161.
- [17] LIU Xin, LI Qing-zhong, TAN Xue-zhi. Joint optimization of sensing time and cooperative user in cognitive radio [A]. *The 7th International Conference on Communications and Networking [C]*. New York, USA: IEEE, 2012. 325 – 328.
- [18] XIONG G, SUN J. An optimal resource allocation algorithm based on sum rate maximization for uplink SCMA system [A]. *IEEE 18th International Conference on Communication Technology [C]*. New York, USA: IEEE, 2018. 805 – 810.

#### 作者简介



孟乃宣 女, 1995 年 2 月 16 日生于河北石家庄. 现为南京邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生, 主要研究方向为海量机器类通信过程中的资源分配.  
E-mail: keyanrenwu@163.com



孙君 (通讯作者) 女, 1980 年 7 月生. 现为南京邮电大学教师, 硕士生导师, 研究方向为无线网络、无线资源管理和物联网.  
E-mail: sunjun@njupt.edu.cn