

## 一种采用复合中继激励的协作下行传输机制

李 钊\* 蔡沈锦

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 为了解决现有中继激励机制中长期回报存在不确定性,以及即时回报导致资源利用效率降低的问题,该文针对协作下行通信系统提出一种复合中继激励机制(CCRI)。首先利用链路不平衡产生的瓶颈,将第1跳链路超过第2跳的数据速率部分作为即时回报,用于中继节点自身数据的传输;同时针对即时回报量不足,过量或瓶颈存在于第1跳导致即时回报失效的情况,采用基于比例公平的长期回报作为补充,进一步调整中继节点的调度权重。仿真结果表明,所提机制能够给予中继节点合理的回报,并实现系统频谱效率和生存时间,以及中继能量效率的改善。

**关键词:** 协作通信; 中继激励; 用户调度; 能量效率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)06-1291-07

DOI: 10.11999/JEIT160799

## A Compound Relay Incentive Based Downlink Cooperative Transmission Mechanism

LI Zhao CAI Shenjin

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In order to overcome the uncertainty of the reward with long-term relay incentive strategy and the degradation of resource utilization efficiency incurred by the short-term incentive scheme, a Cooperative Compound Relay Incentive (CCRI) mechanism is proposed for cooperative downlink communication system. By exploiting the bottleneck resulted from the imbalance of links' capability, the rate difference that the first hop exceeds the second is provided as an instant reward for the relay node's own data transmission. In addition, by taking into account the situations where the short-term reward is insufficient, excessive or the bottleneck exists in the first hop in such a case that the short-term incentive scheme becomes unavailable, a proportional fair based long-term incentive is employed as supplementary, with which the relay node's scheduling weight is further adjusted. Simulation results show that the proposed scheme can provide rational reward to the relay and achieve improvements of system's spectral efficiency and lifetime, as well as relay's energy efficiency.

**Key words:** Cooperative communication; Relay incentive; User scheduling; Energy efficiency

### 1 引言

下一代无线通信系统(5G)需要为大量的智能设备高效地提供更多类型的移动应用,为了在降低管理开销和能量消耗的基础上实现更高的数据速率和更好的覆盖,协作通信将得到普遍应用<sup>[1]</sup>。中继作为协作通信的重要组成部分,包括固定中继和移动中继两类,其中,后者的部署和选择更加灵活,对复杂的无线传输环境适应性更好。移动设备担任中继可通过设备对设备(Device to Device, D2D)链路进

行数据的中转。然而,由于担任中继会产生能量消耗,设备的使用时间和电池寿命将受到影响。特别地,担任中继的移动台通常存在通信需求。若对参与协作的节点缺乏合理的回报,将无法建立和维持协作关系。因此,良好的激励机制在协作通信中具有重要意义。

现有的中继激励方式可以分为两类:即时(short-term)回报和长期(long-term)回报。在即时回报机制中,中继节点获得确定性的回报,回报仅由节点参与协作的行为决定;而对于长期回报,中继节点以一定的概率获得回报,回报受到中继节点协作贡献的大小以及系统中其它节点状态的影响。更进一步,即时回报对参与协作的节点的激励体现在立即为其分配一定的通信资源并给予其传输自身数据的机会。其中,文献[2]提出一种基于链路不平衡的中

收稿日期: 2016-07-26; 改回日期: 2016-12-29; 网络出版: 2017-02-28

\*通信作者: 李钊 zli@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61401354, 61501285, 61102057), 高等学校引智计划基金(B08038)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61401354, 61501285, 61102057), The 111 Project (B08038)

继激励机制(LIABLE),通过调整中继节点的发射功率,对两跳传输中瓶颈的位置和大小进行控制,从而将两跳链路的数据速率差值作为中继的回报。该机制建立在中继发射功率可调的基础上,一方面增加了控制的复杂度,另一方面,当中继发射功率的调整无法保证第 1 跳数据速率优于第 2 跳时,该机制失效。文献[3]针对协作认知无线网络(Cooperative Cognitive Radio Network, CCRN)提出一种基于时隙划分的 3 阶段协作传输机制,授权用户在第 1 阶段进行广播,认知用户在第 2 阶段进行中继转发,全部授权带宽在第 3 阶段作为回报用于认知用户传输自身数据。但是,由于信道的时变特性,该方法无法保证认知用户在第 3 阶段具有较好的信道状态,从而导致系统传输速率的降低。文献[4]设计一种 2 阶段协作传输机制,将授权带宽的一部分作为回报给予认知用户。在第 1 阶段授权用户利用自留带宽进行广播,第 2 阶段认知用户在授权自留带宽内进行数据转发,同时在回报带宽内传输自身数据。由于同一频段对于不同通信用户对可能表现出不同的质量<sup>[5]</sup>,认知用户在回报带宽内的通信可能较差,因此该机制无法保证认知用户获得较高的数据速率。综上,采用即时回报,中继节点能获得确定性的回报,但无法保证其在信道条件较好时获得通信机会,可能导致通信资源利用效率的降低。

在长期回报机制中,中继获得的激励主要体现在调度权重的提升。其中,文献[6]在比例公平(Proportional Fair, PF)算法的基础上,通过增加协作节点被基站调度的权重,实现对用户参与协作的回报。文献[7]提出一种基于激励的覆盖扩展机制(CEI),通过综合考虑吞吐量、协作贡献和信用参数设计调度算法,使协作贡献大的移动用户以更高的概率被基站调度,而将不诚信用户的信用参数置 0。在上述长期回报机制中<sup>[6,7]</sup>,用户能否获得回报受到系统中其它移动台的信道质量的影响,因此不能保证中继以概率 1 获得回报。

综上所述,基于调度权重调整的长期回报机制能够在中继节点的信道条件较好时给予其通信机会,从而更好地利用信道资源,但是存在不确定性;即时回报能够给予中继确定的回报,但未考虑信道状态的动态性,可能导致通信资源利用效率的降低。因此,本文提出一种将即时回报与长期回报相结合的复合激励机制(CCRI),并基于此实现协作下行通信。一方面利用信道随机性导致的经由中继的两跳链路的数据速率差异,将基站到中继的第 1 跳数据速率超过中继到目的用户的第 2 跳速率的部分作为

即时回报给予中继节点,用于其数据传输;另一方面,对于即时回报量不足、过量或瓶颈存在于第 1 跳导致即时回报失效的情况,采用基于比例公平的长期回报作为补充,对中继节点的调度权重进一步调整,并且在选择中继时对其剩余能量进行考虑,通过降低剩余能量较少的节点担任中继的概率,避免其产生过多的能量消耗,从而实现系统频谱效率和生存时间,以及中继能量效率的改善。

## 2 系统模型

本文研究单小区 LTE-A 下行通信系统,如图 1 所示。系统中包括一个演进节点 B(evolved Node B, eNB)和  $K$  个用户设备(User Equipments, UEs),均配置单天线。D2D 用户通信范围较小,采用簇分布(clustered distribution)模型<sup>[8]</sup>,即 D2D 用户在以  $\rho$  为半径的圆内均匀分布, $\rho$  的大小由 D2D 通信范围决定。小区内有多簇,簇内的 UE 不仅可以与 eNB 直接通信,也可以切换至 D2D 模式,进行设备间通信。 $\Omega$  表示小区内的用户集合,有  $\text{card}(\Omega) = K$ ,  $\text{card}(\cdot)$  表示集合中元素的个数。位于同一簇内的 UE 构成集合  $\Omega_R$ ,有  $\Omega_R \subset \Omega$  和  $\text{card}(\Omega_R) = K_R < K$ 。信道资源的分配基于 LTE-A 中的物理资源块(Physical Resource Block, PRB)<sup>[9]</sup>,其中一个 PRB 为包含 12 个子载波并且持续 1 个时隙  $T_s$  (长度为 0.5 ms)的资源组合,1 个 PRB 分配给 1 个用户。在任意给定的时隙,eNB 通过下行链路与 UE 进行通信,簇内的其它 UE 可以担任中继以增强 eNB 到目的 UE 的数据传输<sup>[10]</sup>。系统采用两跳协作通信模型,中继节点(Relay Node, RN)使用半双工通信,采用译码转发(Decode-and-Forward, DF)。不同于固定中继,担任中继的 UE 也有自身的通信需求,在每个时隙与其它 UE 一起等待基站的调度。

在每个时隙开始时,eNB 向小区中的所有 UE 广播训练序列,UE 通过接收训练序列估计其与 eNB 之间的信道状态信息(Channel State Information, CSI),并封装在应答分组中(假设反馈信道无差错且反馈时延相对于信道变化可以忽略)上报给 eNB,

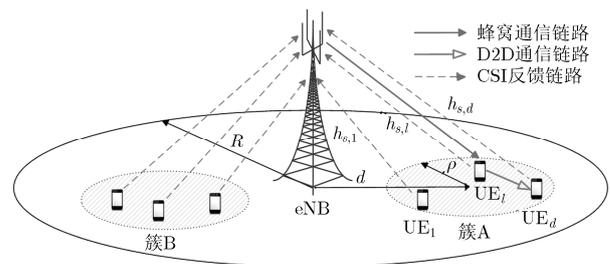


图 1 系统模型

eNB 根据收集到的信息选定目的用户  $UE_d$ 。 $UE_d$  向周围的 UE 发送中继招募请求分组(Relay Recruit Request Packet, RRRP), 该分组包含  $UE_d$  的信息和设备所在簇的标识(ID), 收到该请求且簇标识相同的 UE 返回中继应答分组(Relay Reply Packet, RRP)。成为候选中继的 UE 将其与  $UE_d$  交互过程中检测到的 CSI 上报给 eNB, 后者根据收集到的 CSI 判断  $UE_d$  是否需要协作以及担任中继的  $UE_l$ 。当  $UE_d$  不需要协作时, eNB 直接向  $UE_d$  发送数据; 否则, 将时隙  $T_s$  划分为两个时长相等的阶段, eNB 经由  $UE_l$  向  $UE_d$  传输(不再保留 eNB 与  $UE_d$  之间的直接通信)。在第 1 阶段, eNB 将数据发送给  $UE_l$ ; 在第 2 阶段,  $UE_l$  对接收到的 eNB 发送的数据进行译码转发并采用 D2D 方式发至  $UE_d$ 。 $UE_k$  ( $k \in \Omega_R$ ) 与 eNB 以及候选中继节点  $UE_l$  之间的信道系数分别用  $h_{s,k}$  和  $h_{k,l}$  ( $l \in \Omega_R \setminus \{d\}$ ) 表示。UE 与 eNB 以及 UE 之间的信道具有频率平坦衰落和块衰落(block fading)特性, 信道参数在 1 个块内(包含连续若干个传输时隙)保持稳定, 在块与块之间随机变化。

### 3 采用复合中继激励的协作传输

本节对采用复合中继激励的协作传输机制进行设计。首先介绍协作通信的基本信号处理, 然后在综合考虑即时回报和长期回报的基础上分别设计中继用户和目的用户的调度方法, 在此基础上提出采用复合中继激励的算法步骤, 最后对系统频谱效率、生存时间和能量效率的评估进行数学建模。采用所提机制进行协作传输, 若存在即时回报, 中继节点可获得数据传输机会, 此时 eNB 向中继节点发送的数据包括待转发的目的用户数据和中继的期望数据; 否则, 只有目的用户的数据。机制根据用户在数据传输中担任的角色(目的用户、中继)进行平均数据速率的更新, 确定长期回报, 并对移动节点的剩余能量进行考虑, 引入中继激励因子作为即时回报的权重。

#### 3.1 协作通信的信号处理

如图 1 所示, 在第  $t$  个时隙内,  $UE_d$  被调度为目的用户,  $UE_l$  担任中继, 当存在即时回报时,  $UE_l$  接收到的信号包括 eNB 发给  $UE_d$  的部分  $y_l^{(x)}$  和发给自己的部分  $y_l^{(z)}$ , 分别由式(1)和式(2)给出, 其中下标  $l$  为中继的标识, 上标  $x$  和  $z$  分别表示  $UE_d$  和  $UE_l$  的期望数据, 它们在时间上不重叠,  $z$  的多少取决于即时回报的大小, 当无法给予即时回报时,  $z$  的数据量为零。 $n_{s,l}$  是零均值, 方差为  $\sigma_n^2$  的加性高斯白噪声。

$$y_l^{(x)} = h_{s,l}x + n_{s,l} \quad (1)$$

$$y_l^{(z)} = h_{s,l}z + n_{s,l} \quad (2)$$

采用非协作(直接)通信时, eNB 直接向  $UE_d$  发送信号; 采用协作通信时,  $UE_d$  接收到的信号经由  $UE_l$  转发。对于上述两种通信方式,  $UE_d$  接收到的信号分别由式(3)和式(4)给出。

$$\bar{y}_d^{(x)} = h_{s,d}x + n_{s,d} \quad (3)$$

$$\hat{y}_d^{(x)} = h_{l,d}\hat{x} + n_{l,d} \quad (4)$$

其中,  $\hat{x}$  表示  $UE_l$  重新编码后的数据,  $n_{s,d}$  和  $n_{l,d}$  是均值为零, 方差为  $\sigma_n^2$  的加性高斯白噪声,  $x$  与  $\hat{x}$  满足  $\mathbb{E}(\|x\|^2) = \mathbb{E}(\|\hat{x}\|^2) = 1$ ,  $\mathbb{E}(\cdot)$  表示数学期望,  $\|\cdot\|$  表示 Frobenius 范数。

根据以上讨论, 可以计算直接通信情况下  $UE_d$  的频谱效率  $\bar{r}_d^{(x)}$  为,

$$\bar{r}_d^{(x)} = \log_2 \left( 1 + P_T |h_{s,d}|^2 / \sigma_n^2 \right) \quad (5)$$

$P_T$  表示 eNB 的发射功率,  $|\cdot|$  表示求模值运算。当 eNB 通过  $UE_l$  向  $UE_d$  发送数据时, 端到端频谱效率为

$$\begin{aligned} \hat{r}_d^{(x)} &= \min \left\{ r_l^{(x,z)}, r_d^{(x)} \right\} \\ &= \frac{1}{2} \min \left\{ \log_2 \left( 1 + P_T |h_{s,l}|^2 / \sigma_n^2 \right), \right. \\ &\quad \left. \log_2 \left( 1 + P_R |h_{l,d}|^2 / \sigma_n^2 \right) \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $P_R$  表示中继发射功率,  $r_l^{(x,z)}$  与  $r_d^{(x)}$  分别表示第 1 跳和第 2 跳的数据传输速率。 $\hat{r}_d^{(x)}$  受限于两跳链路中较差的一跳。由于中继采用半双工模式, 并且两个传输阶段时长相等, 因此  $\hat{r}_d^{(x)}$  的计算包含系数 1/2。eNB 通过比较  $\bar{r}_d^{(x)}$  和  $\hat{r}_d^{(x)}$ , 决定其向  $UE_d$  的传输是否需要中继协助。需要注意的是, 文中的“数据速率”是带宽归一化速率, 单位是 bit/(s·Hz), 以下叙述中与“频谱效率”作为同义词使用。

当经由中继的两跳链路中第 1 跳速率大于第 2 跳时,  $UE_l$  的即时回报速率  $r_l^{(z)}$  可由式(7)给出,

$$\begin{aligned} r_l^{(z)} &= r_l^{(x,z)} - r_d^{(x)} = \frac{1}{2} \left\{ \log_2 \left( 1 + P_T |h_{s,l}|^2 / \sigma_n^2 \right) \right. \\ &\quad \left. - \log_2 \left( 1 + P_R |h_{l,d}|^2 / \sigma_n^2 \right) \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

在 eNB 向  $UE_l$  发送数据的过程中, 属于  $UE_d$  的数据量与  $UE_l$  的数据量可根据  $\hat{r}_d^{(x)}$  和  $r_l^{(z)}$  的比值进行分配。将第 1 跳的传输时间划分为两部分, 第 1 部分的时长为  $0.5T_s \left[ \hat{r}_d^{(x)} / (\hat{r}_d^{(x)} + r_l^{(z)}) \right]$ , 用于传输  $UE_d$  的数据, 第 2 部分时长为  $0.5T_s \left[ r_l^{(z)} / (\hat{r}_d^{(x)} + r_l^{(z)}) \right]$ , 用于  $UE_l$  的数据传输。

#### 3.2 中继的选择

由于信道的随机性, 经由中继的两跳链路存在

数据速率差异。给定 eNB 的发射功率  $P_T$  和中继发射功率  $P_R$ ，当第 1 跳速率小于等于第 2 跳时(即  $r_l^{(x,z)} \leq r_d^{(x)}$ )，无法提供即时回报，只能通过提高中继的调度权重给予其回报，此时仅有长期回报；当  $r_l^{(x,z)} > r_d^{(x)}$  时，可将两跳数据速率的差值作为即时回报给予中继节点，并以中继调度权重的调整作为长期回报进行补充，即所提机制对中继的回报包含即时和长期两种形式。需要注意的是，长期回报(中继调度权重的增量)受即时回报量的影响。当即时回报量不足时，中继调度权重增加；当即时回报量较高时，中继的调度权重可以降低。

eNB 根据式(8)从  $UE_d$  所在簇内的候选中继  $UE_\ell$  中选择最佳中继  $UE_l$ ：

$$\left. \begin{aligned} l = \arg \max_{\ell \in \Omega_R \setminus \{d\}} \{c_\ell r_\ell^{(z)} + (1 - c_\ell) \hat{r}_d^{(x)}\} \\ \text{s.t. } s1: \hat{r}_d^{(x)} - \bar{r}_d^{(x)} \geq 0; \quad s2: 0 \leq c_\ell < 1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)以  $\hat{r}_d^{(x)}$  和  $r_\ell^{(z)}$  的加权和最大作为目标函数，从而保证系统频谱效率处于较大值。 $r_\ell^{(z)}$  表示  $UE_\ell$  的即

$$\bar{R}_k(t+1) = \begin{cases} \delta_c \bar{R}_k(t) + (1 - \delta_c) R_d(t), & UE_k \text{ 为目的用户} & (10a) \\ \delta_c \bar{R}_k(t) + (1 - \delta_c) r_l^{(z)} - c_l \hat{r}_d^{(x)}, & UE_k \text{ 为中继用户} & (10b) \\ \delta_c \bar{R}_k(t), & \text{其它用户} & (10c) \end{cases}$$

其中， $\bar{R}_k(t)$  是到第  $t-1$  个时隙为止  $UE_k$  的平均数据速率， $R_d(t)$  表示在第  $t$  个传输时隙  $UE_d$  的可达速率，当 eNB 与  $UE_d$  直接通信时， $R_d(t) = \bar{r}_d^{(x)}$ ；当采用协作通信方式时， $R_d(t) = \hat{r}_d^{(x)}$ 。 $r_l^{(z)}$  为中继获得的即时回报。 $c_l$  为中继的即时回报权重，按照式(9)进行计算。 $\delta_c \in [0,1]$  表征时隙  $t$  内 UE 的数据速率对其平均速率的影响程度，如果 UE 在时间窗口  $T_c$  内更新平均速率，则  $\delta_c = 1 - 1/T_c$ 。 $T_c$  越大，平均速率和调度权重的更新越缓慢。本文取  $\delta_c = 0.99$  [11]。时隙  $t$  用户  $k$  的调度权重按照式(11)计算，需要注意的是，由于  $w_k$  与  $k^*$  仅与当前时隙有关，不受之前的时隙的影响，为了简便，对时间标识  $t$  进行了省略。

$$w_k = R_k(t) / \bar{R}_k(t) \quad (11)$$

对目的用户  $UE_d$  的平均速率的更新采用式(10a)，由于当前时隙  $UE_d$  获得数据传输服务，其平均速率的增量为  $(1 - \delta_c) R_d(t)$ ，在下一个时隙将导致  $UE_d$  调度权重的降低。对中继  $UE_l$  的平均速率的更新采用式(10b)，为保证公平性，对获得即时回报的中继节点，通过增量  $(1 - \delta_c) r_l^{(z)}$  增加其平均数据速率；同时，用协作贡献  $\hat{r}_d^{(x)}$  (在  $UE_l$  的协助下  $UE_d$  的可达速率)的加权值  $-c_l \hat{r}_d^{(x)}$  作为对  $UE_l$  的长期回报(降低平均数据速率，进而增大调度权重)。对于其它未被选作目的或中继的设备，其平均速率的更新

时回报速率， $c_\ell$  是候选中继的即时回报权重，取值范围为  $[0,1]$ ，由  $UE_\ell$  根据自身剩余能量的情况决定，反映  $UE_\ell$  对回报激励类型的偏好。 $c_\ell$  可由式(9)确定。

$$c_\ell = [E_\ell(0) - E_\ell(t)] / E_\ell(0) \quad (9)$$

$E_\ell(0)$  和  $E_\ell(t)$  分别表示  $UE_\ell$  的初始能量和它在时隙  $t$  的起始时刻的剩余能量。 $E_\ell(t)$  越大， $c_\ell$  越小，表明候选中继剩余能量较高，因此其对即时回报的要求较低。随着系统运行时间的增加， $E_\ell(t)$  减小，导致  $c_\ell$  增大，候选中继将更加倾向于获得即时回报。式(9)说明，当中继剩余能量较多时，对中继的激励倾向于长期回报；当中继剩余能量减小时，获得即时回报对中继更为公平。

### 3.3 目的用户的调度

针对由于链路条件制约导致无法提供即时回报、即时回报量不足或过大的问题，本文提出的复合中继激励机制通过改进 PF 算法中平均速率的计算，对中继提供长期回报，如式(10)所示。

按照式(10c)进行。

在以上讨论的基础上，按照式(12)进行  $UE_d$  的选择，

$$k^* = \arg \max_{k \in \Omega} w_k \quad (12)$$

其中， $k^*$  为时隙  $t$  调度的目的用户标识。

### 3.4 基于复合激励的协作下行传输

本节给出基于复合中继激励的协作传输机制，以第  $t$  个传输时隙 ( $t = 0, 1, \dots$ ) 为研究对象，具体步骤如下：

步骤 1 初始化用户集合  $\Omega = \{1, 2, \dots, K\}$ 。

步骤 2  $UE_k$  ( $k \in \Omega$ ) 向 eNB 反馈其与 eNB 的信道状态信息  $h_{s,k}$ ，利用式(5)计算  $\bar{r}_d^{(x)}$  并反馈给 eNB。 $UE_k$  根据其其与所在簇内候选中继  $UE_\ell$  ( $\ell \in \Omega_R \setminus \{d\}$ ) 之间的信道状态  $h_{\ell,d}$ ，采用式(6)和式(7)对满足条件  $|h_{\ell,d}| > |h_{s,\ell}|$  的  $UE_\ell$  计算  $\hat{r}_d^{(x)}$  和  $r_\ell^{(z)}$ ，并反馈给 eNB。

步骤 3 eNB 根据收到的反馈信息，利用式(8)和式(9)为每个移动台  $UE_k$  寻找最佳中继  $UE_l$  (该  $UE_l$  为与  $UE_k$  配对的中继)，并计算  $UE_k$  经由  $UE_l$  转发获得的数据速率  $\hat{r}_d^{(x)}$  和直接从 eNB 接收的数据速率  $\bar{r}_d^{(x)}$ ，择优选择传输方式。

步骤 4 eNB 根据式(12)选择  $UE_d$ 。

步骤 5 eNB 直接或者通过  $UE_l$  向  $UE_d$  传输数

据。

(1) 当  $UE_d$  采用协作通信方式并且中继的即时回报速率  $r_l^{(z)} > 0$  时, eNB 在第 1 阶段以时分方式向  $UE_l$  发送  $UE_d$  和  $UE_l$  的期望数据,  $UE_l$  对 eNB 发给自己的数据进行接收, 对  $UE_d$  的数据进行译码转发。若  $r_l^{(z)} = 0$ , eNB 只向  $UE_l$  发送  $UE_d$  的期望数据。

(2) 当  $UE_d$  采用非协作通信方式时, eNB 直接向  $UE_d$  发送数据。

步骤 6 数据传输结束后各移动节点按照式(11)更新平均速率。

至此, 时隙  $t$  的操作结束。之后的每个时隙重复步骤 1~步骤 6。

### 3.4 性能分析

本节从系统频谱效率、中继能量效率和系统生存时间 3 个方面对所提机制的性能进行分析。

**3.4.1 系统频谱效率** 当采用非协作传输时, 系统频谱效率  $R_{\text{sum}}$  即为  $UE_d$  的可达速率,  $R_{\text{sum}} = \bar{r}_d^{(x)}$ , 可由式(5)计算。

当采用协作传输, 且即时回报不为 0 时, 系统频谱效率为即时回报速率  $r_l^{(z)}$  和  $UE_d$  的可达速率  $\hat{r}_d^{(x)}$  之和, 由式(6)和式(7)计算。由于中继采用半双工模式, 并且两个传输阶段时长相等, 因此该和速率等于第 1 跳链路的数据速率:

$$R_{\text{sum}} = r_l^{(z)} + \hat{r}_d^{(x)} = (r_l^{(x,z)} - r_d^{(x)}) + \min[r_l^{(x,z)}, r_d^{(x)}] = r_l^{(x,z)} \quad (13)$$

由于存在即时回报, 第 1 跳链路的数据速率大于第 2 跳, 即  $r_l^{(x,z)} > r_d^{(x)}$ , 故  $\min[r_l^{(x,z)}, r_d^{(x)}] = r_d^{(x)}$ 。

当采用协作传输, 且即时回报为 0 时, 系统频谱效率为  $UE_d$  的可达速率为

$$R_{\text{sum}} = \hat{r}_d^{(x)} = \min[r_l^{(x,z)}, r_d^{(x)}] \quad (14)$$

**3.4.2 系统生存时间** 系统生存时间(LifeTime, LT)定义为: 从系统开始运行的时刻到系统中出现第 1 个节点能量耗尽或者小于传输信号所需能量的时刻的时间长度。假设用户  $UE_k$  ( $k \in \Omega$ ) 的初始能量为  $E_k(0)$ , 第  $t$  个时隙起始时刻的剩余能量为  $E_k(t)$ , 则在时隙  $t$  内  $UE_k$  消耗的能量  $E_k^c(t)$  为

$$E_k^c(t) = \begin{cases} \lambda P_C T_s, & UE_k \text{ 为目的用户} \\ \frac{1}{2} P_R T_s + P_C T_s, & UE_k \text{ 为中继用户} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $P_R$  表示中继的发射功率,  $P_C$  表示 UE 进行数据发送/接收期间电路消耗的平均功率,  $T_s$  为时隙长度。当 eNB 与  $UE_d$  直接通信时,  $\lambda = 1$ ; 采用协作通信方式时,  $\lambda = 1/2$ 。在时隙  $t+1$  的起始时刻,  $UE_k$  的剩余能量为  $E_k(t+1) = E_k(t) - E_k^c(t)$ 。

**3.4.3 能量效率** 能量效率<sup>[12]</sup>(Energy Efficiency, EE)指用户设备获得的数据传输速率与其能量消耗的比值。本文将能量效率进行带宽归一化处理, 单位为 bit/(J·Hz), 并将 EE 定义为 UE 自身的数据速率与总的能量消耗(包括接收 eNB 发给自己的数据和中转其它用户数据的能量消耗)的比值。从  $t=0$  时刻开始, 至第  $t=\tau$  时隙为止, 用户  $UE_k$  的能量效率( $\eta_k$ )可根据式(16)计算,

$$\eta_k = \frac{\sum_{t=0}^{\tau} r_k(t)}{\sum_{t=0}^{\tau} E_k^c(t)} \quad (16)$$

其中,  $r_k(t)$  为  $UE_k$  在某一时刻内获得的数据速率。若  $UE_k$  被调度为目的用户,  $r_k(t)$  按式(7)计算; 若  $UE_k$  担任中继, 则  $r_k(t) = r_l^{(z)}$ 。  $E_k^c(t)$  为  $UE_k$  在时隙  $t$  内消耗的能量, 按照式(16)计算。

## 4 仿真结果

本节对所提采用复合中继激励的协作传输机制(Cooperative Compound-Relay-Incentive, CCRI)的性能进行仿真, 并与 2 种非协作传输方法和 2 种协作传输方式进行比较。对比方法包括: (1) 采用轮询(Round Robin, RR)的非协作传输, 轮流对每个用户进行调度; (2) 基于比例公平的非协作传输(Non-Cooperative Proportional Fair, NCPF), 采用比例公平准则选择目的用户; (3) 基于速率最优用户调度的协作传输(Cooperative Rate-Optimal Scheduling, CROS), 移动台担任中继, 目的用户和中继的选取以系统和速率最大化为目标; (4) 无中继激励的协作传输(Cooperative Non-Relay-Incentive, CNRI), 为每个用户匹配最适合的移动中继, 然后按照比例公平准则选择用户-中继对, 对参与协作的移动用户无回报。仿真中设置小区半径  $R = 2$  km, 簇半径  $\rho = 250$  m<sup>[13]</sup>, eNB 和 UE 的发射功率分别为  $P_T = 20$  W 和  $P_R = 0.2$  W, UE 进行数据发送/接收的电路消耗的平均功率  $P_C = 0.1$  W<sup>[14]</sup>。eNB 到 UE 与 UE 到 UE 的路径损耗<sup>[15]</sup>分别为  $L_{\text{eNB-UE}}(D) = 128.1 + 37.6 \lg(D/1000)$  和  $L_{\text{UE-UE}}(D) = 16.5 + 37.6 \lg(D)$ , 单位 dB。  $D$  表示通信实体间的距离, 单位为 m。噪声功率为  $-104$  dBm。信道系数采用 Dent 仿真模型<sup>[16]</sup>产生, 最大多普勒频移取 7 Hz, 合成路径数为 32。

图 2 给出用户数  $K = 20$ , 不同方法的系统频谱效率随 eNB 与簇中心之间的距离  $d$  变化的情况。由图可见, 受路径损耗的影响, 所有方法的频谱效率随  $d$  的增大而减小。协作传输方式(CROS, CCRI, CNRI)的系统频谱效率优于非协作方式(NCPF,

RR)。其中, CROS 以速率最大化为目标进行用户选择, 频谱效率优于其它方法。CCRI 通过向中继提供复合回报, 改善了中继节点的数据速率, 其系统频谱效率仅次于 CROS。CNRI 对中继无回报, 因此其系统频谱效率低于 CCRI。NCPF 采用比例公平算法调度用户, 但未使用中继, 系统频谱效率进一步降低, 但优于轮询方式, 这是由于轮询无法保证被调度用户具有好的信道状态。

图 3 给出  $K = 15$ , 不同方法的系统生存时间随移动台初始能量变化的情况。本文以某款智能终端为例, 其电池容量为 1340 mAh。研究表明, 分配给无线通信组件的能量约占电池总能量的 35%~40%<sup>[17]</sup>, 因此可以得到该款终端的电池能量分配给无线通信组件的部分约为 7139.52J ( $E = 40\% \cdot (3.7 \text{ V} \cdot 1340 \text{ mA}) \cdot 1 \text{ h}$ ), 为了简单, 仿真中将移动台初始化能量设置为 7000 J。同时, 以 50 s 为周期作为能量消耗的统计间隔。对于非协作方式(NCPF, RR), 用户不存在因担任中继而产生的能量消耗, 因而两者的系统生存时间均明显优于协作传输方式(CCRI, CNRI, CROS)。并且, 采用 RR, 各用户的调度机会均等, 系统生存时间最优; NCPF 兼顾系统频谱效率, 相比于信道质量较差的用户, 信道状态好的用户的调度的次数更多, 因此生存时间劣于 RR。对于协作传输方式, 根据式(15), 设备被调度为目的用户或处于闲置状态时的能量消耗远小于担任中继时的能耗。由于 CCRI 在中继选择时引入即

时回报权重, 剩余能量少的设备只有在能够获得较高即时回报时才会参与协作, 从而降低了该类用户被选为中继的概率, 因此 CCRI 系统生存时间最优。CNRI 在为目的用户选择中继时不考虑节点的剩余能量, 因此系统生存时间低于 CCRI。CROS 以系统速率最大化为目标, 信道状态好的用户将以高概率被选为中继, 从而导致大量的能量消耗, 降低了系统生存时间。

图 4 给出  $K = 15$ , 采用不同方法的用户能量效率。其中, 图 4(a)对编号为 1, 4, 7, 10, 13 和 15 的用户进行分析; 图 4(b)则对系统中信道条件较好(基站与移动台之间的信道增益大)的一组移动台进行考察。对于非协作方式(NCPF, RR), 用户能量效率的大小取决于用户的信道状态, 信道状态好的用户能效高。NCPF 采用比例公平算法进行用户选择, 用户通常会在信道条件较好时得到调度, 因此其用户能效优于 RR。对于协作传输方式, CROS 以系统速率最大化为目标进行用户选择, 将使信道质量好的用户以高概率成为目的用户, 因此其用户能效优于其它方法。由于图 4(b)中的移动台信道质量较好, 它们将频繁地被选作中继。采用 CCRI, 中继能够获得合理的回报, 因此用户能效优于无协作激励的 CNRI。由于信道质量好的用户能耗较高, 采用 CCRI, 随着系统运行时间的推移, 这些信道质量好的用户的剩余能量快速减小, 将更倾向于获得即时回报, 从而参与协作的概率降低, 导致其它用

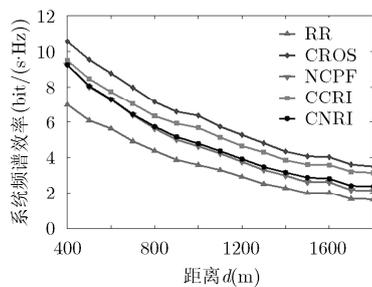


图 2 不同方法的系统频谱效率

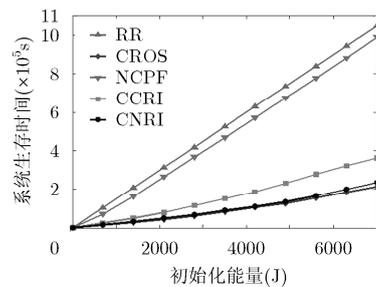
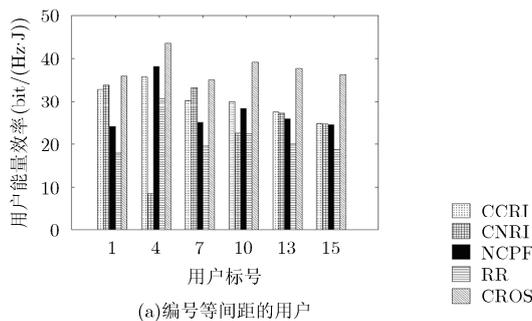
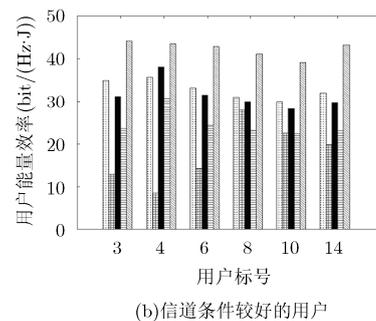


图 3 不同方法的系统生存时间



(a)编号等间距的用户



(b)信道条件较好的用户

图 4 不同方法的用户能量效率

户(信道条件较差)选择中继的范围减小,即选择分集增益下降;而对 CNRI,中继的选择与节点剩余能量无关。因此,信道条件较差的用户(1, 7 和 15)采用 CNRI 获得的数据速率相比于 CCRI 可能更高,从而使 CNRI 的能效不劣于 CCRI。

## 5 结束语

本文提出一种采用复合中继激励的协作下行通信机制(CCRI),首先利用链路不平衡产生的瓶颈,将第 1 跳链路超过第 2 跳的数据速率部分作为即时回报,用于中继的数据传输;同时针对即时回报量不足、过量或瓶颈存在于第 1 跳导致即时回报失效的情况,采用基于比例公平的长期回报作为补充。所提方法能够给予中继节点合理的激励,并实现系统频谱效率和生存时间,以及中继能量效率的改善。

## 参 考 文 献

- [1] NI Y, JIN S, XU W, *et al.* Beamforming and interference cancellation for D2D communication underlying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 64(2): 832-846. doi: 10.1109/TCOMM.2015.2507574.
- [2] 李钊, 蔡沈锦. 协作通信中基于链路不平衡的中继激励[J]. 西安电子科技大学学报, 2016, 43(6): 16-22. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2016.06.003.  
LI Z and CAI S. Relay incentive in cooperative communication by exploiting link imbalance[J]. *Journal of Xidian University*, 2016, 43(6): 16-22. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2016.06.003.
- [3] SIMEONE O, STANOJEV I, SAVAZZI S, *et al.* Spectrum leasing to cooperating secondary ad hoc networks[J]. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1): 203-213. doi: 10.1109/JSAC.2008.080118.
- [4] SU W, MATYJAS J D, and BATALAMA S. Active cooperation between primary users and cognitive radio users in cognitive ad-hoc networks[C]. *IEEE Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Dallas, 2010: 3174-3177. doi: 10.1109/ICASSP.2010.5496070.
- [5] DI B, BAYAT S, SONG L, *et al.* Radio resource allocation for downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) networks using matching theory[C]. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Diego, 2015: 1-6. doi: 10.1109/GLOCOM.2015.7417643.
- [6] WEI H-Y and GITLIN R D. Incentive scheduling for cooperative relay in WWAN/WLAN two-hop-relay network[C]. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, New Orleans, 2005: 1696-1701. doi: 10.1109/WCNC.2005.1424768.
- [7] GUEGUEN C, RACHEDI A, and GUIZANI M. Incentive scheduler algorithm for cooperation and coverage extension in wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(2): 797-808. doi: 10.1109/TVT.2012.2225855.
- [8] MACH P, BECVAR Z, and VANEK T. In-band device-to-device communication in OFDMA cellular networks: a survey and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 1885-1922. doi: 10.1109/COMST.2015.2447036.
- [9] MEHMOOD Y, GÖRG C, and TIMM-GIEL A. A radio resource sharing scheme for IoT/M2M communication in LTE-A downlink[C]. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, 2016: 296-301. doi: 10.1109/ICCW.2016.7503803.
- [10] VANGANURU K, FERRANTE S, and STERNBERG G. System capacity and coverage of a cellular network with D2D mobile relays[C]. *IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, Orlando, 2012: 1-6. doi: 10.1109/MILCOM.2012.6415659.
- [11] SIGDEL S and KRZYMIEN W. Simplified fair scheduling and antenna selection algorithms for multiuser MIMO orthogonal space-division multiplexing downlink[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(3): 1329-1344. doi: 10.1109/TVT.2008.925002.
- [12] HNUTER C, ZHONG L, and SABHARWAL A. Leveraging physical-layer cooperation for energy conservation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(1): 131-145. doi: 10.1109/TVT.2013.2271121.
- [13] KAUFMAN B and AAZHANG B. Cellular networks with an overlaid device to device network[C]. *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, 2008: 1537-1541. doi: 10.1109/ACSSC.2008.5074679.
- [14] LIU L, MIAO G, and ZHANG J. Energy-efficient scheduling for downlink multi-user MIMO[C]. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Ottawa, 2012: 4390-4394. doi: 10.1109/ICC.2012.6363935.
- [15] 3GPP TR 36.931 version 13.0.0 Release 13. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio frequency (RF) requirements for LTE pico node B[S]. France: ETSI 3GPP, 2016.
- [16] SOUIHLI O and OHTSUKI T. Joint feedback and scheduling scheme for service-differentiated multiuser MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(2): 528-533. doi: 10.1109/TWC.2010.02.090212.
- [17] ANAND B, THIRUGNANAM K, SEBASTIAN J, *et al.* Adaptive display power management for mobile games[C]. *International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (ACM MobiSys)*, Washington, 2011: 21-26. doi: 10.1145/1999995.2000002.

李 钊： 男，1981 年生，博士，副教授，研究方向为认知无线电、MIMO 无线通信等。

蔡沈锦： 男，1989 年生，硕士，研究方向为协作通信。