

# 蜂窝网络分布式中继选择算法

武 航 钱丽萍 陈庆章

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

**摘 要** 针对蜂窝网络中的功耗优化问题,研究了如何最小化两跳中继蜂窝网络的系统总功耗。首先根据信道传输功率的闭合表达式得到满足信道最小中断概率情况下的最优链路传输功率,然后通过使用基于 Acknowledgement 的分布式拍卖算法(DAA-ACK)和改进的分布式拍卖算法(IDAA)帮助用户节点选择合适的中继基站。仿真结果显示,这两种算法仅需要用户节点与邻居中继基站交换少量信息,并可通过有限次迭代快速选择出使系统总功率最小的中继节点。

**关键词** 蜂窝网络,中继选择,拍卖算法,多用户多中继

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.8.011

## Distributed Relay Selection Algorithms for Cellular Networks

WU Hang QIAN Li-ping CHEN Qing-zhang

(Department of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract** This work aims at minimizing the total transport power subject to the outage probability requirement for the dual-hop decode-forward relay cellular networks. In particular, this paper first presented the closed-form optimal total power consumed by the user node and the cooperative relay node under the constraint of the outage probability. Then, a distributed auction algorithm based on Acknowledgement(DAA-ACK) and an improved distributed auction algorithm (IDAA) were proposed to assign every user to suitable relay node. Simulation results show that every user node can find its best cooperative relay through limited message passing with neighbor relay nodes.

**Keywords** Cellular networks, Relay selection, Auction algorithm, Multi-user multi-relay

移动终端、无线网络技术的进步,共同推动了无线通信网络的发展。目前,无线通信网络已经深入到人们生活的方方面面。但是由于无线信号具有天然的衰落特性并且对障碍物比较敏感,因此对于远距离的传输,如果不加以控制,会导致信号的误码率升高,甚至接收不到信号。另外,随着 4G 技术的发展,用户对数据传输速率和质量的要求也越来越高。如果仅仅通过增大终端和基站的发送功率来解决上述问题,不仅会增大通信系统的干扰,还会产生较大的能耗问题。对于传统蜂窝网络中的这些问题,可以引入协作通信技术来解决。通过使用协作通信,不仅可以提高信道的可靠性,改善蜂窝小区边缘用户的通信质量,而且可以降低网络系统的传输功率和运营商的成本。

协作通信技术有效地缓解了无线信号的阴影衰落、路径损耗和多径效应,已经成为移动蜂窝网络、下一代无线通信网络、Ad Hoc 网络和传感器网络等无线通信领域的研究热点之一。在协作通信中,源节点需要从中继节点中选择一个节点进行数据转发,因此如何选择中继节点是一个需要解决的问题。选择中继节点的依据有很多,如信道状态信息、信道中断概率、系统总功率等。Bletsas<sup>[1]</sup>将中继选择与 802.11 协议相结合,通过 RTS/CTS 获得信道的瞬时状态信息,然后基于

该状态信息选择最优的中继节点。Chalise 等人<sup>[2]</sup>研究了在放大转发网络中如何根据本地信道状态信息选择合适的中继,该方法与需要通过整个网络系统的信道状态信息选择中继的方法相比,能够大大降低网络开销。惠懿等人<sup>[3]</sup>针对传统中继选择算法反馈开销大的问题,提出依据中继节点到源节点及目的节点的统计信道状态信息,采用不同的反馈策略向源节点进行信息反馈,然后帮助源节点选择中继。Soliman 等人<sup>[4]</sup>首先推导了端到端信噪比(SNR)的概率密度函数(PDF)和累积分布函数(CDF)的闭合表达式,然后根据该闭合表达式选择使 SNR 最大的中继节点。芮国胜等人<sup>[5]</sup>通过计算双向链路的接收信噪比,推导出满足目标接收信噪比的转发阈值,然后由各个中继节点判断是否转发,从而实现分布式中继选择。Gong 等人<sup>[6]</sup>提出在双向中继网络中通过最大化网络的速率来选择合适的中继,首先建立了信道增益的调和平均数与网络速率下界之间的关系,然后选出能够最大化网络速率下界的中继节点。Feng 等人<sup>[7]</sup>为每个节点设计了一个最优的定时器,依据信道功率增益为定时器设置不同的值,然后以最大化网络的吞吐率为目标选择中继节点。Li 等人<sup>[8]</sup>考虑了中继转发中的网络负载问题,然后通过网络负载分析吞吐率的性能,并将该性能作为度量来选择中继节点。

到稿日期:2015-06-25 返修日期:2015-09-28 本文受国家自然科学基金(61379122,61379023),浙江省自然科学基金(LR16F010003)资助。  
武 航(1989-),男,硕士生,主要研究方向为无线网络与通信,E-mail:wuzjut@163.com;钱丽萍(1981-),女,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为无线网络资源优化分配理论与算法、认知无线网络、智能电网;陈庆章(1955-),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究方向为传感网络、物联网、计算机网络及其应用、数据挖掘。

刘艳等人<sup>[9]</sup>提出了一种正交混合空时网络编码的中继选择算法,即通过节点与中继节点的信号交互,根据信号传输时的错误率,推导出节点的中断概率,并根据该中断概率选择较好的中继节点。冀保峰等人<sup>[10]</sup>通过理论分析得出了在 Nakagami 信道下的中断概率和平均误码率的解析式和渐近式,基于网络编码方案提出了一种最小化较差用户误码率的协作中继选择策略。Qian 等人<sup>[11]</sup>根据信道协作时的中断概率的阈值推导出最优功率分配的闭合表达式,根据该表达式可以迅速选择使传输功率最小的中继节点。Ahmed 等人<sup>[12]</sup>研究了在中继节点具有移动性的情况下,根据部分信道状态信息以及网络总传输功率需求选择中继,最终选择出的中继节点能够有效地改善系统的整体性能,降低网络的总传输功率。

本文将研究在两跳蜂窝中继网络中,用户节点如何与工作在解码转发(DF)模式下的邻居中继基站交换少量信息以选择中继节点。本文首先根据链路的最小中断概率计算出单条链路的最小传输功率。然后,用户节点和邻居中继基站根据 DAA-ACK 算法和 IDAA 算法的交互信息,经过有限次信令交互,每个用户节点从邻居中继中选出一个是作为下一跳。通过选择操作后,每个用户节点得到一个中继基站,此时的网络系统所对应的总传输功率最小。

## 1 系统模型

本文研究一个具有  $N$  个用户节点、 $M$  个中继基站和 1 个宏基站  $D$  的网络模型,如图 1 所示。假设用户节点均位于宏蜂窝的边缘,为了保证链路质量,这些用户节点都需要通过中继基站才能够和宏基站通信。

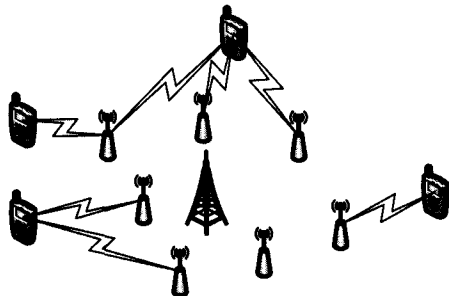


图 1 系统模型

假设该网络系统的无线信道具有瑞利衰落特性,每个节点都有一个全向天线,即能够同时发送和接收数据。 $h_{i,j}$  和  $h_{j,D}$  分别表示从用户节点  $i$  到中继基站  $j$  和从中继基站  $j$  到宏基站  $D$  的信道增益。由于假设节点间的信道是瑞利衰落信道,因此  $h_{i,j}$  和  $h_{j,D}$  可以表示为均值为  $g_{i,j}$  和  $g_{j,D}$  的独立指数分布。其中, $g_{i,j}$  和  $g_{j,D}$  表示路径增益。一般情况下, $g_{i,j}$  和  $g_{j,D}$  是仅与距离相关的常数。

假设所有的中继基站工作在 DF 模式下。当用户节点  $i$  向宏基站发送信息时,将分成两个阶段完成。在第一阶段,用户节点  $i$  以功率  $p_i$  将信息  $x_i$  发送给中继基站  $j$ ,用户节点  $i$  的最大发送功率设为  $SP_{i,\max}$ 。在第二阶段,该中继基站  $j$  将会解码收到的信息,在重新编码之后,以功率  $p_j$  发送给宏基站  $D$ ,中继基站  $j$  的最大发送功率设为  $RP_{j,\max}$ 。在该通信过程中,中继基站  $j$  和宏基站  $D$  处的 SNR 分别为

$$\begin{aligned} \gamma_j(p_i) &= \frac{p_i h_{i,j}}{n_j} \\ \gamma_D(p_j) &= \frac{p_j h_{j,D}}{n_D} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $n_j$  和  $n_D$  分别表示中继基站  $j$  和宏基站  $D$  处的噪声功率。此处,仅考虑中继基站和宏基站处的热噪声功率,链路间的信道干扰可以使用正交频分复用(OFDM)技术来缓解,即中继基站和宏基站将信道分成若干正交子信道,用户节点和中继基站及中继基站和宏基站均通过正交子信道来进行通信。由于正交信号在接收端可以采用相关技术分开,因此可以大大减少链路之间的相互干扰。假设 SNR 的阈值为  $\gamma$ ,则只有当  $\gamma_j(p_i) \geq \gamma$  且  $\gamma_D(p_j) \geq \gamma$  时,宏基站才能正确地解码收到的信息。由于信道满足瑞利衰落,因此用户节点  $i$  选择中继基站  $j$  转发信息时,整个链路的中断概率为

$$\begin{aligned} O_{ij} &= 1 - \text{Prob}(\gamma_j(p_i) \geq \gamma, \gamma_D(p_j) \geq \gamma) \\ &= 1 - \text{Prob}\left(\frac{p_i h_{i,j}}{n_j} \geq \gamma, \frac{p_j h_{j,D}}{n_D} \geq \gamma\right) \\ &= 1 - \exp\left(-\frac{n_j \gamma}{g_{i,j} p_i}\right) \exp\left(-\frac{n_D \gamma}{g_{j,D} p_j}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

## 2 问题建模

### 2.1 单条链路最小传输功率

对于一个具有  $N$  个用户节点和  $M$  个中继基站的无线网络系统,当用户节点  $i$  通过中继基站  $j$  和宏基站  $D$  通信时,整个链路的传输功率为  $p_i + p_j$ 。假设中断概率阈值为  $\beta$ ,则在满足中断概率需求的情况下,单条链路的最小传输功率可以描述为

$$\begin{aligned} \min \quad & p_i + p_j \\ \text{s. t. } \quad & O_{ij} \leq \beta \\ & 0 \leq p_i \leq SP_{i,\max} \\ & 0 \leq p_j \leq RP_{j,\max} \end{aligned} \quad (3)$$

由式(2)可知, $O_{ij}$  是关于  $p_i$  和  $p_j$  的递减函数,随着  $p_i$  和  $p_j$  的减小,中断概率  $O_{ij}$  会增大,所以当  $O_{ij} = \beta$  时,链路的传输功率最小。由于问题(3)是一个凸优化问题,因此可以使用拉格朗日乘子法和 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件计算来最小传输功率。

对于问题(3),假设用户节点  $i$  选择中继基站  $j$ ,在满足  $\frac{n_j}{g_{i,j}} SP_{i,\max}^{-1} + \frac{n_D}{g_{j,D}} RP_{j,\max}^{-1} \leq -\frac{\ln(1-\beta)}{\gamma}$  的情况下,如果中继基站  $j$  满足条件

$$\left(\sqrt{\frac{n_j}{g_{i,j}}} + \sqrt{\frac{n_D}{g_{j,D}}}\right) \leq -\frac{\ln(1-\beta)}{\gamma} \min\left\{SP_{i,\max} \sqrt{\frac{g_{i,j}}{n_j}}, RP_{j,\max} \sqrt{\frac{g_{j,D}}{n_D}}\right\} \quad (4)$$

则用户节点  $i$  和中继基站  $j$  的最小发送功率分别是

$$\begin{aligned} p_i^* &= -\frac{\gamma}{\ln(1-\beta)} \left(\sqrt{\frac{n_j}{g_{i,j}}} + \sqrt{\frac{n_D}{g_{j,D}}}\right) \sqrt{\frac{n_j}{g_{i,j}}} \\ p_j^* &= -\frac{\gamma}{\ln(1-\beta)} \left(\sqrt{\frac{n_j}{g_{i,j}}} + \sqrt{\frac{n_D}{g_{j,D}}}\right) \sqrt{\frac{n_D}{g_{j,D}}} \end{aligned} \quad (5)$$

反之,用户节点  $i$  与中继基站  $j$  的最小发送功率之和为  $p_i^* + p_j^* = \min\{A, B\}$ , 其中

$$\begin{aligned} A &= SP_{i,\max} + n_D g_{j,D}^{-1} \left(-\frac{\ln(1-\beta)}{\gamma} - g_{i,j}^{-1} n_j SP_{i,\max}\right)^{-1} \\ B &= RP_{j,\max} + n_j g_{i,j}^{-1} \left(-\frac{\ln(1-\beta)}{\gamma} - g_{j,D}^{-1} n_D RP_{j,\max}\right)^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

另外,在这种情况下由于可以根据中断概率的阈值得到链路的最小传输功率,因此中继基站  $j$  可以作为用户节点  $i$  的下一跳转发信息;在满足  $\frac{n_j}{g_{i,j}} SP_{i,\max}^{-1} + \frac{n_D}{g_{j,D}} RP_{j,\max}^{-1} >$

$-\frac{\ln(1-\beta)}{\gamma}$ 的情况下,信道不能满足最小中断概率的要求,即中继基站  $j$  不可以作为用户节点  $i$  的下一跳转发信息。通过上述公式,可以很容易计算出任意一条链路的最小传输功率  $p_i^* + p_j^*$ 。关于上述公式的证明,本文不再详述,详细推导过程可以参考文献[11]。

对于用户节点  $i$ ,如果中继基站  $j$  可以作为其下一跳,则中继基站  $j$  是用户节点  $i$  的邻居节点。一个用户节点可能有若干个邻居节点。定义用户节点  $i$  的邻居节点集合为  $Ne_i$ 。由于邻居关系的相互性,如果中继基站  $j$  是用户节点  $i$  的邻居节点,那么用户节点  $i$  也是中继基站  $j$  的邻居节点。具有邻居关系的用户节点和中继基站可以直接通信。

## 2.2 数学模型

从上面的分析可以看出,当用户节点选择不同的中继基站进行协作时,对应的链路的传输功率也不同。本文将研究在一个具有  $N$  个用户节点和  $M$  个中继基站的无线网络系统中,用户节点如何选择合适的邻居中继基站以使系统的总传输功率最小,该问题可以描述为

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^N \sum_{j \in Ne_i} Q_{ij} c_{ij} \\ \text{s. t.} & \sum_{i=1}^N c_{ij} \leq 1, i=1, 2, \dots, N \\ & \sum_{j \in Ne_i} c_{ij} = 1 \\ & c_{ij} \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $Q_{ij}$  是用户节点  $i$  与其选择的邻居中继基站  $j$  对应的链路的最小传输功率  $p_i^* + p_j^*$ ;  $c_{ij}$  是指示变量,  $c_{ij} = 1$  表示用户节点  $i$  选择中继基站  $j$ ,  $c_{ij} = 0$  表示用户节点  $i$  不选择中继基站  $j$ ;  $\sum_{j=1}^N c_{ij} \leq 1$  表示一个中继基站最多被一个用户节点选择,  $\sum_{j \in Ne_i} c_{ij} = 1$  表示一个用户节点只能选择一个中继基站。

问题(7)是一个最小化问题,令  $W_{ij} = -Q_{ij}$ ,这样就可以将该最小化问题等价转换为一个最大化问题

$$\begin{aligned} \max & \sum_{i=1}^N \sum_{j \in Ne_i} W_{ij} c_{ij} \\ \text{s. t.} & \sum_{i=1}^N c_{ij} \leq 1, i=1, 2, \dots, N \\ & \sum_{j \in Ne_i} c_{ij} = 1 \\ & \forall c_{ij} \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (8)$$

对于问题(8),当为每个用户节点都分配一个中继基站且所有用户节点所获得的中继基站都不相同时,如果该分配能够使整个网络系统的  $W_{ij}$  之和最大,那么该分配就是使系统总传输功率最小的分配。

## 3 算法

从上述问题的数学模型中可以看出,该中继选择问题实质上是一个分配问题。对于分配问题,研究者们提出了很多算法,其中最经典的是匈牙利算法[13]。虽然匈牙利算法可以有效解决分配问题,但是其复杂度较高,而且当节点数目增加时,需要经过大量迭代才能使算法收敛。另外,匈牙利算法是一个集中式算法,对单个节点计算能力要求较高。因此该算法不适用于本文终端用户选择中继基站的场景。

针对上述问题,本文提出了基于 ACK 的分布式拍卖算法(DAA-ACK)和改进的分布式拍卖算法(IDAA)。在这两种算法中,定义映射  $\alpha$  表示从用户节点集合  $\{1, \dots, N\}$  到中继

基站集合  $\{1, \dots, M\}$  的映射关系,当且仅当用户节点  $i$  选择中继基站  $j$  时,  $\alpha(i) = j$ 。假设每个中继基站在时刻  $t$  都有一个价格  $price_j(t)$ ,用户节点如果想要选择该中继基站,就必须支付该价格。定义  $W_{ij} - price_j(t)$  表示用户节点  $i$  使用中继基站  $j$  的效益,用户节点都希望选择使其效益最大的中继基站帮助自己转发信息。如果用户节点  $i$  选择中继基站  $j$ ,则应满足

$$W_{ij} - price_j(t) = \max_{k \in Ne_i} \{W_{ik} - price_k(t)\} \quad (9)$$

如果每个用户节点最终选择的中继基站(必须是不同的中继基站)均满足式(9),就达到均衡状态,这时的分配就是使系统总传输功率最小的分配。当用户节点选择中继基站时,用户节点可能仅请求将该中继基站分配给它们却不增加出价,这将导致竞价行为无限进行下去。为了避免发生这种情况,规定用户节点每次出价都必须至少增加  $\epsilon$ ,所以,如果最终的分配满足

$$W_{ij} - price_j(t) \geq \max_{k \in Ne_i} \{W_{ik} - price_k(t)\} - \epsilon \quad (10)$$

则认为此时处于均衡状态。

### 3.1 基于 ACK 的分布式拍卖算法(DAA-ACK)

在 DAA-ACK 算法中,通过用户节点与邻居中继基站的信息交互帮助用户节点选择使其效益最大的中继基站,其主要步骤如下。

步骤 1 在初始阶段,每个用户节点将中断概率阈值和最大发送功率发送给其邻居中继基站。邻居中继基站根据其感知到的信道增益和它的最大发送功率,通过式(5)、式(6)计算出各条链路的最小传输功率,然后将最小传输功率以权重  $W_{ij}$  的形式通知相应的用户节点。

步骤 2 在  $t$  时刻,用户节点  $i$  向邻居中继基站  $j$  发送其对邻居中继  $j$  的出价  $price_{ij}(t)$ 。每个中继基站  $j$  收到邻居用户节点发送来的出价信息后,选择最高出价作为自己的价格,然后使用 ACK/NAK 报文通知邻居用户节点是否是最高出价者。

步骤 3 若用户节点收到邻居中继基站的 NAK 报文或者用户节点  $i$  与邻居节点  $\alpha_i(t)$  的邻居关系被断开,说明用户节点  $i$  不是邻居中继基站  $j$  的最高出价者,或者用户节点  $i$  所选择的中继基站  $\alpha_i(t)$  被其他用户节点抢去,则用户节点  $i$  需要重新选择一个邻居中继基站。此时,用户节点  $i$  检查自己的邻居中继数目,如果有且仅有一个邻居中继基站  $j$ ,则用户节点通知邻居中继  $j$  是其唯一可选中继,中继基站  $j$  断开与其他邻居节点的邻居关系;如果用户节点  $i$  有多个邻居中继基站,则用户节点  $i$  需要重新从其邻居中继基站中寻找一个满足条件  $\alpha_i(t+1) \in \arg \max_{k \in Ne_i} \{W_{ik} - price_k(t+1)\}$  的中继基站,并更新其对中继基站  $\alpha_i(t+1)$  的出价  $price_{\alpha_i(t+1)}(t+1) = price_{\alpha_i(t+1)}(t) + \gamma_i$ 。其中,  $\gamma_i$  为价格增量,  $\gamma_i = v_i - \bar{\omega}_i + \epsilon$ ,

$v_i = \max_{j \in Ne_i} \{W_{ij} - price_j(t)\}$  是用户节点  $i$  的最优效益值,  $\bar{\omega}_i = \max_{j \neq \alpha_i(t+1)} \{W_{ij} - price_j(t)\}$  是用户节点  $i$  的次优效益值,  $\epsilon$  表示每次出价至少要增加的量。

步骤 4 若用户节点收到邻居中继基站的 ACK 报文,说明用户节点  $i$  仍是邻居中继基站  $j$  的最高出价者,则保持出价不变即可。

所有用户节点迭代执行步骤 2 到步骤 4,直到整个网络系统达到均衡状态。在上述算法中,中继节点只通过 ACK/

NAK 报文告诉用户节点是否是最高出价者,用户节点根据收到的报文决定是否在本地出价的基础上更新价格。通过用户节点和中继基站之间的信息交互,每个用户节点能够依据本地信息独立选择合适的中继基站。

### 3.2 改进的分布式拍卖算法(IDAA)

在 DAA-ACK 算法中,虽然通过有限次迭代,用户节点能够选出使系统总功率最小的中继基站,但是由于中继基站只反馈 ACK/NAK 报文,导致用户节点在更新出价时只能依靠本地保存的价格信息,而这些信息有可能是已经过时的信息。如果用户节点使用这些过时信息更新出价,会使本次出价无效。为了进一步加快算法的收敛速度,本文进一步改进 DAA-ACK 算法,提出了改进的分布式拍卖算法(IDAA)。

步骤 1 本步骤与 DAA-ACK 算法中的步骤 1 相同。

步骤 2 在  $t$  时刻,用户节点  $i$  向邻居中继基站  $j$  发送其对邻居中继基站  $j$  的出价  $price_{ij}(t)$ 。每个中继基站  $j$  收到邻居用户节点发送来的出价信息后,选择最高出价作为自己的价格  $price_j^*(t)$ ,然后将自己的价格  $price_j^*(t)$  发送给邻居用户节点。用户节点  $i$  将收到的信息与本地存储的中继价格进行比较,如果收到的中继基站  $j$  的价格高于本地保存的中继基站  $j$  的价格,则更新本地存储的邻居中继基站  $j$  的价格:

$$price_{ij}(t+1) := price_j^*(t) \quad (11)$$

步骤 3 如果  $price_{\alpha_i(t)}(t) < price_{\alpha_i(t)}(t+1)$  或者用户节点  $i$  与邻居节点  $\alpha_i(t)$  的邻居关系被断开,说明有其他用户节点对用户节点  $i$  所选择的中继基站  $\alpha_i(t)$  出更高的价格或者用户节点  $i$  所选择的中继基站  $\alpha_i(t)$  被其他用户节点抢去,则用户节点  $i$  需要重新选择一个邻居中继基站。选取新的中继基站的方式以及更新出价的规则与 DAA-ACK 算法相同,只不过由于在步骤 2 中中继基站将价格信息反馈给了用户节点,因此每次用户节点更新价格时所依据的本地信息都是邻居中继基站的最新价格信息。

步骤 4 如果  $price_{\alpha_i(t)}(t) = price_{\alpha_i(t)}(t+1)$ ,说明用户节点  $i$  对中继  $\alpha_i(t)$  的出价仍是最高,那么用户节点  $i$  只需保持原来的分配即可,即  $\alpha_i(t+1) := \alpha_i(t)$ 。

所有用户节点迭代执行步骤 2 到步骤 4,直到整个网络系统达到均衡状态。在 IDAA 算法中,中继基站将当前中继的价格信息反馈给用户节点,因此用户节点每次更新出价时使用的均是最新的价格,而且每次的更新都是有效更新。所以使用 IDAA 算法,整个网络系统的收敛速度会加快。

在 DAA-ACK 算法和 IDAA 算法中,用户节点和中继基站通过交互控制信息实现中继基站的选择。在实际应用中,可以将这些控制信息嵌入数据报文中,而不需要单独发送控制信息报文。在用户节点选择中继的过程中,中继基站收到包含控制信息的数据报文时,转发对其出价最高的用户节点的数据报文。用户节点成功选择中继后,就可以通过所选择的中继基站转发数据信息。通过将控制信息嵌入数据报文中,可以进一步降低网络系统开销。

从上述的 DAA-ACK 算法和 IDAA 算法的价格更新规则中可以看出,对于一个具有  $N$  个用户节点、 $M$  个中继基站的无线网络,如果一个中继基站在  $k$  次竞价中都被某一个用户节点选为下一跳,那么该中继基站的价格至少增加  $ke$ 。当  $k$  足够大时,该中继与那些没有收到任何出价的基站相比,将会降低用户节点的效益,此时用户节点会倾向于选择没有收到任何出价的基站作为下一跳。当每个中继基站至少收到一个出价时,该算法将会结束。对于初始价格为 0 的

情况,每个中继基站所执行的算法总迭代次数不会超过  $\frac{\max_{(i,j)} W_{ij} - \min_{(i,j)} W_{ij}}{\epsilon}$ 。若每次迭代只有一个用户出价,总迭代次数不会超过  $N \frac{\max_{(i,j)} W_{ij} - \min_{(i,j)} W_{ij}}{\epsilon}$ 。一次出价过程包含  $O(M)$  次操作,故该算法运行时间为  $O(NM \frac{\max_{(i,j)} W_{ij} - \min_{(i,j)} W_{ij}}{\epsilon})$ 。

DAA-ACK 算法和 IDAA 算法执行完毕后,整个网络系统处于均衡状态,即每个用户节点和其所选择的中继基站满足式(10)。由式(10)可以看出,每个用户节点和它所选择的中继基站所对应的链路效益与最大链路效益的差值小于  $\epsilon$ ,则  $N$  个用户节点所对应的系统总效益与最大系统效益的差值小于  $N\epsilon$ 。所以 DAA-ACK 算法和 IDAA 算法所得出的系统的总传输功率与系统最小总传输功率的差值小于  $N\epsilon$ 。

## 4 实验结果与分析

本文考虑一个具有  $N$  个用户节点、 $M$  个中继基站和 1 个宏基站  $D$  的多用户多中继无线网络。所有的节点分布在一个  $1000\text{m} \times 1000\text{m}$  的区域,假设宏基站位于  $(500\text{m}, 500\text{m})$  处,中继基站随机分布在以  $(500\text{m}, 500\text{m})$  为圆心且内圆半径为  $100\text{m}$ 、外圆半径为  $200\text{m}$  的圆环中,源节点随机分布在以  $(500\text{m}, 500\text{m})$  为圆心且内圆半径为  $200\text{m}$ 、外圆半径为  $500\text{m}$  的圆环中。假设用户节点和中继基站以及中继基站和宏基站之间的路径增益  $g_{i,j}$  和  $g_{j,D}$  是与它们之间的距离有关的值,其中  $g_{i,j} = d_{i,j}^{-\alpha}$ ,  $g_{j,D} = d_{j,D}^{-\beta}$ 。其他仿真参数设置如表 1 所列。

表 1 仿真参数设置

仿真参数	参数值
用户节点的最大发送功率	0.5W
中继基站的最大发送功率	1W
中继基站的噪声功率	$0.1\mu\text{W}$
链路的中断概率阈值	0.001
链路的信噪比阈值	0.01
宏基站的噪声功率	$0.1\mu\text{W}$
价格最小增量	0.01

为了验证 DAA-ACK 算法和 IDAA 算法的性能,本文进行了大量仿真实验。首先将 DAA-ACK 算法、IDAA 算法与匈牙利算法进行对比,然后将 DAA-ACK 算法、IDAA 算法与不考虑邻居关系的分布式拍卖算法(DAA)进行网络开销对比,下面是实验的结果和分析。

图 2 是本文所述两种算法即 DAA-ACK 算法、IDAA 算法与匈牙利算法的迭代次数的对比图。

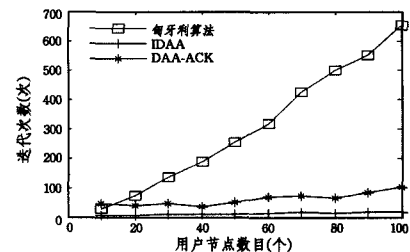


图 2 迭代次数对比

假设中继基站数目是用户节点数目的 2 倍。从图中可以看出,DAA-ACK 算法和 IDAA 算法的迭代次数总体上要少于匈牙利算法,尤其是在用户节点数目较多的情况下更为明显。但是在用户节点数目较少时,DAA-ACK 算法的迭代次数会略高于匈牙利算法。随着用户节点数目的增加,DAA-

ACK 算法和 IDAA 算法的迭代次数增加得较为缓慢,受用户节点数目增加的影响较小。另外,从图中可以看出,由于 IDAA 算法每次使用的价格信息都是最新的,因此 IDAA 算法的迭代次数要比 DAA-ACK 算法更少,算法收敛速度也就更快。

图 3 是本文所述两种算法即 DAA-ACK 算法、IDAA 算法与匈牙利算法的系统总功率对比图。假设中继基站数目是用户节点数目的 2 倍。从图中可以看出,3 种算法对应的系统总功率相差很小,功率曲线基本重合。采用匈牙利算法得出的系统总功率是最优的,采用 DAA-ACK 算法和 IDAA 算法所得出的系统总功率与最优值的理论最大误差为  $N_e$ ,而实际上 DAA-ACK 算法和 IDAA 算法对应的系统总功率与最优值的误差要远远小于理论最大误差。因此从图 2 和图 3 中可以看出,DAA-ACK 算法和 IDAA 算法在获得近乎最小总功率的前提下,迭代次数要远少于匈牙利算法。

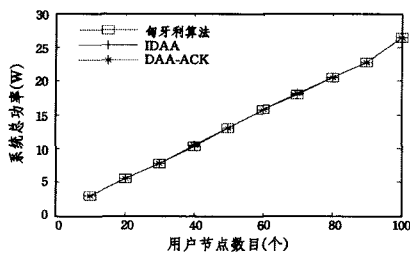


图 3 总功率对比

传统方案使用分布式拍卖算法(DAA)解决中继基站选择问题时,一般不考虑用户节点与中继基站的邻居关系,通过邻居节点和所有中继基站之间的消息交换来选择合适的中继基站。图 4 是 DAA 算法、IDAA 算法和 DAA-ACK 算法的网络开销对比图。本文不考虑 3 种算法在计算权重  $W_{ij}$  时的网络开销。另外,DAA-ACK 算法中由于中继基站仅需要反馈 ACK/NAK 消息,因此忽略 ACK 报文对应的网络开销。在 3 种算法中,用户节点需要和邻居中继基站交换价格信息报文,假设每个用户节点对任意一个中继基站的出价在整个报文段中所占长度均为  $S$ ,中继基站的数目是用户节点数目的 2 倍,则 3 种算法在选择中继基站过程中的网络总开销如图 4 所示。

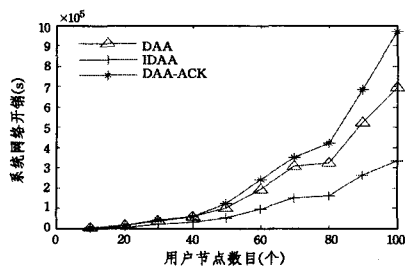


图 4 网络开销对比

从图 4 可以看出,虽然在 DAA-ACK 算法中中继基站使用 ACK/NAK 进行了反馈,简化了节点间信息交互的过程,但是由于用户节点在更新出价时可能使用过时的价格信息而导致其迭代次数增加,因此其网络总开销也会变大。而在 IDAA 算法中,通过直接反馈价格信息,大大加快了收敛速度,因此,其对应的网络开销也是最小的。

**结束语** 本文针对存在瑞利衰落的多用户多中继无线蜂窝网络,从最小化系统总功率的角度出发,提出了 DAA-ACK 算法和 IDAA 算法来帮助用户节点选择合适的中继基站。本文算法通过分布式实现,仅依靠节点本地信息选择中继基站,

避免了单个节点功率消耗过大,有效降低了系统的总传输功率。下一步将在本文的基础上进一步研究动态网络中中继基站的选择。

## 参考文献

- [1] Bletsas A, Lippnian A, Reed D P. A simple distributed method for relay selection in cooperative diversity wireless networks, based on reciprocity and channel measurements[C]// Proceedings of the 61st IEEE International Conference on Vehicular Technology. 2005:1484-1488
- [2] Chalise B K, Zhang Yin-min, Amin M G. Local CSI based full diversity achieving relay selection for amplify-and-forward cooperative systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(21):5165-5180
- [3] Hui Hui, Zhang Yao, Li Qi. Relay selection and power allocation algorithm based on partial channel information[J]. Computer Engineering, 2014, 40(10):109-113(in Chinese)  
惠穗,张瑶,李琦.基于部分信道信息的中继选择与功率分配算法[J].计算机工程,2014,40(10):109-113
- [4] Soliman S S, Beaulieu N C. Exact analysis of dual-hop AF maximum end-to-end SNR relay selection[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(8):2135-2145
- [5] Rui Guo-sheng, Wang Lin, Zhang Yang, et al. Distributed two-way relay selection scheme and users power allocation[J]. Journal on Communications, 2014, 35(5):1-7(in Chinese)  
芮国胜,王林,张洋,等.分布式双向中继选择算法及用户功率分配[J].通信学报,2014,35(5):1-7
- [6] Gong Yu-jun, Zhu Yu. A relay selection scheme based on the harmonic mean in two-way relay networks with physical layer network coding[C]// Proceedings of the 2011 Global Mobile Congress. 2011:1-5
- [7] Feng Hao, Xiao Yao, Cimini L J. Net throughput of centralized and decentralized cooperative networks with relay selection[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(5):477-480
- [8] Li Yun, Song Shu-fang, Daneshmand M, et al. A cooperative relay method and performance for wireless networks[C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Intelligence Information Processing and Trusted Computing. 2011, 31-34
- [9] Liu Yan, Wang Zi-rong, Zhu Xing-wei. Relay communication algorithm of orthogonal mixed spaced-time network coding[J]. Computer Science, 2014, 41(11):192-194(in Chinese)  
刘艳,王子荣,朱性伟.一种正交混合空时网络编码的中继通信算法[J].计算机科学,2014,41(11):192-194
- [10] Ji Bao-feng, Song Kang, Wang Yi, et al. Cooperative transmission scheme of relay selection combined with network coding and its performance analysis[J]. Journal on Communications, 2015, 36(3):1-11(in Chinese)  
冀保峰,宋康,王毅,等.联合网络编码和中继选择的协作传输方案及其性能分析[J].通信学报,2015,36(3):1-11
- [11] Qian Li-ping, Wu Yuan, Chen Qing-zhang. Transmit power minimization for outage-constrained relay selection over Rayleigh-fading channels[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(8):1383-1386
- [12] Ahmed I, Butt M M, Mohamed A. Energy efficient mobile relay selection for two-hop wireless networks[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Computer Systems and Applications. 2014:761-766
- [13] Kuhn H W. The Hungarian method for the assignment problem[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1955, 2(1/2):83-97