·移动互联与通信技术· 文章编号：1000-3428(2017)09-0133-05 文献标志码：A 中图分类号：TN929.5

多层中继协作 HetNets 用户对关联方案

颉满刚[1]，贾向东[1,2]，周 猛[1]，纪珊珊[1]，杨 正[1]，焦金良[1]

（1. 西北师范大学 计算机科学与工程学院，兰州 730070；2. 南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室，南京 210003）

摘 要： 基于 K 层中继协作异构网络，提出一种改进的用户对关联方案，使中继广播信号到每层网络的信源和信宿，信源和信宿通过估计接收信号强度（RSS）将用户对关联到最大 RSS 的中继。基于最大-最大用户对关联（MM-UP-A）准则，结合随机几何理论将每层网络中继的位置建模为齐次泊松点过程，得到任一用户对关联到第 k 层中继的概率解析式，并给出信源和信宿到关联中继距离的统计描述。数值分析和仿真结果验证了 MM-UP-A 准则的正确性，并表明关联概率同时受到信源与中继发送功率的影响。

关键词： 第五代移动通信；异构网络；用户对关联；中继；关联概率

中文引用格式： 颉满刚，贾向东，周 猛，等. 多层中继协作 HetNets 用户对关联方案[J]. 计算机工程，2017，43(9)：133-137，143.

英文引用格式： XIE Mangang，JIA Xiangdong，ZHOU Meng，et al. User-pair Association Scheme for Multi-tier Relay Cooperative HetNets[J]. Computer Engineering，2017，43(9)：133-137，143.

User-pair Association Scheme for Multi-tier Relay Cooperative HetNets

XIE Mangang[1]，JIA Xiangdong[1,2]，ZHOU Meng[1]，JI Shanshan[1]，YANG Zheng[1]，JIAO Jinliang[1]

（1. College of Computer Science and Engineering，Northwest Normal University，Lanzhou 730070，China；
2. Wireless Communication Key Lab of Jiangsu Province，Nanjing University of Posts and Telecommunications，Nanjing 210003，China）

【Abstract】 Based on K-tier relay cooperative Heterogeneous Networks（HetNets），an improved user-pair association scheme is proposed，where relays broadcast its associated signals to source and destination of each tier，then source and destination associate the user pair to relay with the maximum of Received Signals Strength（RSS） by estimating the RSS. Based on the Max-max User-pair Association（MM-UP-A） criterion，by using stochastic geometry where the positions of relays in each tier are modeled as homogeneous Poisson point process，it gets the analytical expression of the probability that a typical user-pair is associated with a relay of the k-th tier as well as the corresponding statistical description of the distances from the source and destination of a typical user-pair to its serving relay. Numerical analysis and simulation results validate the correctness of the MM-UP-A criterion and show that association probability depends on the source and relay transmit power simultaneously.

【Key words】 fifth generation mobile communication；Heterogeneous Networks（HetNets）；user-pair association；relay；association probability

DOI： 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.09.024

0 概述

移动数据流量的爆炸式增长给无线网络带来巨大的挑战，第五代移动通信（5G）的研究迫在眉睫。异构网络（Heterogeneous Networks，HetNets）是未来 5G 的关键技术之一。在 HetNets 中，微蜂窝、微微蜂窝基站（Base Station，BS）或中继部署于传统的宏蜂窝之上，这种部署不仅能够有效提高频谱复用，增强覆盖性能，同时还能减轻各层用户间资源竞争压力。当前已有大量文献对异构网络的性能进行了研究和分析[1-3]。然而，HetNets 中有一些问题亟待解决，其中之一就是用户对关联（User-pair Association，UA）问题，即在 HetNets 中如何将一个用户对关联到不同的可用中继（或 BS）[4-5]。

在传统的蜂窝网络中，UA 一般采用接收信号强度（Received Signals Strength，RSS）准则和

基金项目： 国家自然科学基金（61261015，61561043）；甘肃省高等学校基本科研业务费专项资金“面向 5G 的 Massive MIMO 毫米波段信道建模及其估计”。

作者简介： 颉满刚（1990—），男，硕士研究生，主研方向为无线通信；贾向东，副教授、博士、博士后；周 猛、纪珊珊、杨 正、焦金良，硕士研究生。

收稿日期： 2017-01-16 **修回日期：** 2017-02-20 **E-mail：** jiaxd@nwnu.edu.cn

SINR 关联准则[6-7]。然而,这 2 种传统的 UA 方案都会导致严重的中继(或 BS)负载不平衡问题,不能实现网络性能最优[8]。为了解决该问题,文献[9]提出了小区范围扩展(Cell Range Expand,CRE)的概念。在 CRE 中,通过增加偏置人为地增大从小蜂窝 BS 接收到的用户功率,这样使更多的用户可以关联到小蜂窝以减轻网络负载。偏置 UA 可以有效改善网络容量[10],然而,其缺点是用户群被强制地关联到小蜂窝,同时还受到附近宏蜂窝的干扰[11]。文献[12]分析了解耦上下行链路 UA 问题。文献[13-14]研究了下行链路的 UA 问题。

上述文献都仅考虑了单跳网络,并未考虑中继协作多层 HetNets。由于中继能够克服信道衰落和增强覆盖性能[15],因此其被认为是 5G 的一种关键技术。文献[16-17]研究基于中继的 HetNets,在一个典型的中继网络中传输分为 2 个阶段:信源→中继和中继→信宿,网络性能由 2 跳链路的质量共同决定。然而,文献[16-17]仅研究了系统的资源分配和能量效率问题,并未研究 UA 问题。

为此,本文提出一种最大-最大用户对关联(Max-max User-pair Association,MM-UP-A)准则,考虑多层中继协作 HetNets,每一层网络中继具有不同的发送功率、覆盖性能和无线环境等,典型用户对选择最佳中继相关联。MM-UP-A 准则允许上下行链路同时关联到同一中继。此外,该准则考虑了上下行链路的质量以及中继和信源的发送功率。在此基础上,利用随机几何[18]得到相应的 UA 概率。

1 系统模型和假设

在 K 层中继协作 HetNets 中,每层网络都由不同中继和传输环境构成,即各层之间路径损失、小区覆盖大小、中继传输功率等各不相同,中继覆盖区域可能会有重叠。在第 k 层网络中,中继位置满足齐次泊松点过程(Homogeneous Poisson Point Process,HPPP)$\Phi_k, k=1,2,\cdots,K$,强度为 λ_k。各层网络间相互独立,第 k 层网络中的一个用户对由一个信源和一个信宿组成,其位置满足 HPPP Φ_U,强度为 λ_U。为了方便起见,假设每层中所有信源有相同的发送功率 P_S^k,类似地,中继也有相同的发送功率 $P_R^k, k=1,2,\cdots,K$。图 1 为 3 层中继协助的 HetNets 模型,其由宏蜂窝、微蜂窝和微微蜂窝组成,位置随机的用户对通过 UA 准则关联到相应中继。

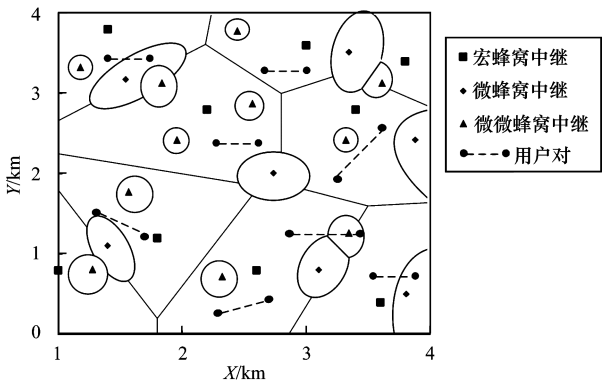


图 1 3 层中继协作异构网络模型

在 K 层中继协助 HetNets 中,任一用户对在通信之前都要关联到某一层网络的一个中继,UA 的中继节点采用解码转发(Decode-and-Forward,DF)协议来协助用户对之间的通信。当一个典型的用户对关联到第 k 层网络中继时,用户对的通信由 2 个阶段组成:1)信源 S 发送信号到它所关联的中继 R,发送功率为 P_S^k;2)中继 R 采用 DF 协议转发信号给信宿 D,发送功率为 P_R^k。由于严重的衰落,因此本文假设用户对的信源 R 和信宿 D 之间没有直接传输。当考虑无线传播时,采用路径损失模型,且第 k 层网络的路径损失指数为 α_k。随机节点 i 和 j 之间的无线信道增益 h_{ij}^k 服从瑞利衰落,$h_{ij}^k \sim \exp(1)$。此外,每个接收机接收到的信号都受加性高斯噪声 $CN(0,N_0)$ 的影响。

2 用户对关联准则与关联概率

2.1 用户对关联准则

为了提高网络吞吐量,将一个用户对关联到一个最佳中继,也就是说一个用户对可以关联到任何层的中继。然而,不同于传统的单跳网络,在 2 跳中继网络中,UA 中继的选择必须考虑 2 个阶段:第一阶段,中继以功率 P_R^k 广播信号到信源和信宿;第二阶段,信源和信宿估计接收到的 RSS。一个典型用户对中信源和信宿接收到的信号功率可以表示为:

$$P_{SR}^k = P_R^k L_0 (R_{SR}^k / r_0)^{-\alpha_k} \beta_k$$
$$P_{RD}^k = P_R^k L_0 (R_{RD}^k / r_0)^{-\alpha_k} \beta_k \quad (1)$$

其中,L_0 是参考值为 r_0 时的路径损失,一般情况下 $r_0=1$ 时,$L_0=(4\pi/v)^{-2}$,v 是波长;R_{SR}^k 和 R_{RD}^k 分别表示从第 k 层网络中继到信源和信宿的距离;β_k 是第 k 层网络的偏置因子,其主要用于减轻传统异构网络的数据负载,克服网络负载不平衡的问题。假设第 k 层网络中所有的中继都采用同一偏差因子 β_k,显然根据式(1)可以得到,典型用户对端到端接收功率可以表示为 P_{SR}^k 和 P_{RD}^k 的最小值,即:

$$P_k = \min(P_{SR}^k, P_{RD}^k) \tag{2}$$

因此,对于一个典型用户对,一般选择端到端接收功率 $P_k(k=1,2,\cdots,k)$ 最大的中继关联,也就是说,被选择的中继应该满足以下条件:

$$R: \arg\max_{k=\{1,2,\cdots,K\}} \min(P_{SR}^k, P_{RD}^k) \tag{3}$$

根据式(3)能够为用户对选择一个最佳关联中继,为了方便计算,定义一个新的随机变量 X_k:

$$X_k = \max\left(\frac{1}{P_{SR}^k}, \frac{1}{P_{RD}^k}\right) \tag{4}$$

因此,本文基于式(3)和式(4),针对 K 层中继协作 HetNets,提出一种 MM-UP-A 准则,其核心是最大化 $1/P_{SR}^k$ 和 $1/P_{RD}^k$ 中的最大值。在 MM-UP-A 准则中,用于协作用户对通信的中继满足以下条件:

$$R: \arg\max_{k=\{1,2,\cdots,K\}} \max\left(\frac{(R_{SR}^k)^{\alpha_k}}{P_R^k L_0 \beta_k r_0^{\alpha_k}}, \frac{(R_{RD}^k)^{\alpha_k}}{P_R^k L_0 \beta_k r_0^{\alpha_k}}\right) \tag{5}$$

由式(5)可知,2 跳网络中 UA 中继的选择不同于传统单跳网络。式(5)主要由 P_{SR}^k 和 P_{RD}^k 决定,导致 2 跳中继协作 HetNets 中用户对关联概率的分析不同于单跳网络。

2.2　随机变量 X_k 的统计描述

引理 1　式(4)给出的 X_k 是 $1/P_{SR}^k$ 和 $1/P_{RD}^k$ 中的最大值,那么 X_k 的累积分布函数(Cumulative Distribution Function,CDF)为:

$$F_{X_k}(x_k) = (1 - \exp(-\pi\lambda_k x_k^{\frac{1}{\alpha_k}} (P_R^k L_0 \beta_k r_0^{\alpha_k})^{\frac{1}{\alpha_k}}))^2 \tag{6}$$

随机变量 X_k 的概率密度函数(Probability Density Function,PDF)为:

$$f_{X_k}(x_k) = 2(1 - \exp(-\pi\lambda_k x_k^{\frac{1}{\alpha_k}} (P_R^k L_0 \beta_k r_0^{\alpha_k})^{\frac{1}{\alpha_k}})) \times \pi\lambda_k (P_R^k L_0 \beta_k r_0^{\alpha_k})^{\frac{1}{\alpha_k}} \times \frac{1}{\alpha_k} x^{\frac{1}{\alpha_k}-1} \tag{7}$$

证明:将式(1)代入式(4)中,X_k 可以表示为:

$$X_k = \max\left(\frac{(R_{SR}^k)^{\alpha_k}}{P_R^k L_0 \beta_k r_0^{\alpha_k}}, \frac{(R_{RD}^k)^{\alpha_k}}{P_R^k L_0 \beta_k r_0^{\alpha_k}}\right) \tag{8}$$

根据 R_{SR}^k 和 R_{RD}^k 的独立性以及顺序统计,X_k 的 CDF $F_{X_k}(x_k)$ 可以计算如下:

$$F_{X_k}(x_k) = \Pr\{X_k \leqslant x_k\} = \Pr\left\{\frac{(R_{SR}^k)^{\alpha_k}}{P_R^k L_0 \beta_k r_0^{\alpha_k}} \leqslant x_k\right\} \times \Pr\left\{\frac{(R_{RD}^k)^{\alpha_k}}{P_R^k L_0 \beta_k r_0^{\alpha_k}} \leqslant x_k\right\} \tag{9}$$

$$\Pr\left\{\frac{(R_{SR}^k)^{\alpha_k}}{P_R^k L_0 \beta_k r_0^{\alpha_k}} \leqslant x_k\right\} = \Pr\{R_{SR}^k \leqslant x_k^{\frac{1}{\alpha_k}} (P_R^k L_0 \beta_k r_0^{\alpha_k})^{\frac{1}{\alpha_k}}\} \overset{(a)}{=} 1 - \exp(-\pi\lambda_k x_k^{\frac{1}{\alpha_k}} (P_R^k L_0 \beta_k r_0^{\alpha_k})^{\frac{1}{\alpha_k}}) \tag{10}$$

其中,(a) 来自于 R_{SR} 的概率密度函数 $f_{R_{SR}}(v) = 2\pi\lambda_k r \exp(-\pi\lambda_k r^2)$。式(9)中的第 2 项与式(10)有类似形式。通过以上分析可以得到式(6)。根据 X_k 的 CDF $F_{X_k}(x_k)$ 的推导过程,可得 X_k 的 PDF $f_{X_k}(x_k)$,如式(7)所示。

2.3　用户关联概率

根据式(5)给出的 UA 准则,推导一个典型用户对关联到第 k 层网络中继的 UA 概率。为此,标记 n 为典型用户对所关联网络的层数标识。根据 MM-UP-A 准则的基本思想,典型的用户对关联到第 k 层网络中继时,对所有的 $j \in \{1,2,\cdots,k\}, j \neq k$ 有 $X_k > X_j$。当用户对关联到第 k 层网络中继时,$n = k$。因此,一个典型用户对关联到第 k 层网络中继的 UA 概率 A_k 为:

$$A_k = \Pr\{n = k\} = E_{X_k}[\Pr\{X_k > \max_{j=\{1,2,\cdots,k\}\setminus k}(X_j)\}] \tag{11}$$

其中,$E_{X_k}[\cdot]$ 表示 X_k 的期望操作。根据顺序统计及 $1/P_{SR}^k$ 和 $1/P_{RD}^k$ 的独立性,将式(4)代入式(11),可得:

$$A_k = E_{X_k}[\Pr\{X_k > X_1, X_2, \cdots, X_k > X_j, X_{j+1}, \cdots, X_k > X_K, j \neq k\}] = E_{X_k}[\prod_{j=1, j\neq k}^{K} \Pr\{X_k > X_j\}] = \int_0^{\infty} (\prod_{j=1, j\neq k}^{K} F_{X_j}(x_k)) f_{X_k}(x_k) \mathrm{d}x_k \tag{12}$$

其中,$F_{X_j}(\cdot)$ 和 $f_{X_k}(x_k)$ 分别是 X_j 的 CDF 和 PDF。式(12)中的乘积项可以表示为:

$$\prod_{j=1, j\neq k}^{K} F_{X_j}(x_k) = \sum_{l=1}^{K} \frac{(-1)^l}{l!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^{K} \cdots \sum_{n_l=1}^{K}}_{n_1 \neq n_2 \neq \cdots \neq n_l \neq k} \sum_{h=0}^{l} \frac{(-1)^h}{h!} \underbrace{\sum_{m_1=1}^{l} \cdots \sum_{m_h=1}^{l}}_{m_1 \neq m_2 \neq \cdots \neq m_h} 2^{l-h} \mathrm{e}^{-(A_l + B_h)} \tag{13}$$

其中:

$$A_l = \sum_{t=1}^{l} \pi\lambda_{n_t} x_k^{\frac{1}{\alpha_{n_t}}} (P_R^{n_t} L_0 \beta_{n_t} r_0^{\alpha_{n_t}})^{\frac{1}{\alpha_{n_t}}}$$
$$B_h = \sum_{f=1}^{h} \pi\lambda_{n_{mf}} x_k^{\frac{1}{\alpha_{n_{mf}}}} (P_R^{n_{mf}} L_0 \beta_{n_{mf}} r_0^{\alpha_{n_{mf}}})^{\frac{1}{\alpha_{n_{mf}}}} \tag{14}$$

证明:根据式(12),乘积项 $\prod_{j=1, j\neq k}^{K} F_{X_j}(x_k)$ 可以表示为:

$$\prod_{j=1, j\neq k}^{K} F_{X_j}(x_k) = \prod_{j=1, j\neq k}^{K} (1 - \exp(-\pi\lambda_j x_k^{\frac{1}{\alpha_j}} (P_R^j L_0 \beta_j r_0^{\alpha_j})^{\frac{1}{\alpha_j}}))^2 = \prod_{j=1, j\neq k}^{K} (1 - y_j) \tag{15}$$

y_j 定义为:

$$y_j = 2\exp(-\pi\lambda_j x_{k^j}^{\frac{1}{\alpha_j}} (P_R^j L_0 \beta_j r_0^{\alpha_j})^{\frac{1}{\alpha_j}}) - \exp(-2\pi\lambda_j x_{k^j}^{\frac{1}{\alpha_j}} (P_R^j L_0 \beta_j r_0^{\alpha_j})^{\frac{1}{\alpha_j}}) \tag{16}$$

式(15)可以进一步表示为:

$$\prod_{j=1, j\neq k}^{K} (1 - y_j) = \sum_{l=0}^{K} \frac{(-1)^l}{l!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^{K} \cdots \sum_{n_l=1}^{K}}_{n_1 \neq n_2 \neq \cdots \neq n_l \neq k} \prod_{t=1}^{l} y_{n_t} \tag{17}$$

根据式(16)和式(17),式(15)可以表示为式(18),类似地,式(18)中的乘积项可以表示为式(19),结合式(18)和式(19)可得到式(13)。

$$\prod_{j=1,j\neq k}^{K}F_{X_j}(x_k)=\sum_{l=1}^{K}\frac{(-1)^l}{l!}\underbrace{\sum_{n_1=1}^{K}\cdots\sum_{n_l=1}^{K}}_{n_1\neq n_2\neq\cdots\neq n_l\neq k}2^l\exp\left(-\sum_{t=1}^{l}\pi\lambda_{n_t}x_k^{\frac{1}{\alpha_{n_t}}}\left(P_R^{n_t}L_0\beta_{n_t}r_0^{\alpha_{n_t}}\right)^{\frac{1}{\alpha_{n_t}}}\right)\prod_{t=1}^{l}\left(1-\frac{1}{2}\exp\left(-\pi\lambda_{n_t}x_k^{\frac{1}{\alpha_{n_t}}}\left(P_R^{n_t}L_0\beta_{n_t}r_0^{\alpha_{n_t}}\right)^{\frac{1}{\alpha_{n_t}}}\right)\right) \tag{18}$$

$$\prod_{t=1}^{l}\left(1-\frac{1}{2}\exp\left(-\pi\lambda_{n_t}x_k^{\frac{1}{\alpha_{n_t}}}\left(P_R^{n_t}L_0\beta_{n_t}r_0^{\alpha_{n_t}}\right)^{\frac{1}{\alpha_{n_t}}}\right)\right)=\sum_{h=0}^{l}\frac{(-1)^h}{h!}\underbrace{\sum_{m_1=1}^{l}\cdots\sum_{m_h=1}^{l}}_{m_1\neq m_2\neq\cdots\neq m_h}2^{-h}\exp\left(-\sum_{f=1}^{h}\pi\lambda_{n_{m_f}}x_k^{\frac{1}{\alpha_{n_{m_f}}}}\left(P_R^{n_{m_f}}L_0\beta_{n_{m_f}}r_0^{\alpha_{n_{m_f}}}\right)^{\frac{1}{\alpha_{n_{m_f}}}}\right) \tag{19}$$

根据上述推导,可得定理 1。

定理 1 在 K 层中继协作 HetNets 中,当采用 MM-UP-A 准则时,一个典型用户对关联到第 k 层网络中继的 UA 概率如式(20)所示。

$$A_k=\sum_{l=1}^{K}\frac{(-1)^l}{l!}\underbrace{\sum_{n_1=1}^{K}\cdots\sum_{n_l=1}^{K}}_{n_1\neq n_2\neq\cdots\neq n_l\neq k}\sum_{h=0}^{l}\frac{(-1)^h}{h!}\underbrace{\sum_{m_1=1}^{l}\cdots\sum_{m_h=1}^{l}}_{m_1\neq m_2\neq\cdots\neq m_h}2^{l-h}\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-(A_i+B_i)}f_{X_k}(x_k)\mathrm{d}x_k \tag{20}$$

2.4 用户对信源和信宿到关联中继的联合 PDF

当一个典型用户对关联到第 k 层网络的中继时,使用 X_{SR}^k 和 Y_{RD}^k 表示从信源 S 和信宿 D 到关联中继 R 的距离。根据概率统计理论,若要得到 X_{SR}^k 和 Y_{RD}^k 的联合 PDF,则需要先得到 X_{SR}^k 和 Y_{RD}^k 的联合 CDF。根据得到的联合 CDF,可得到 X_{SR}^k 和 Y_{RD}^k 的联合 PDF。类似于定理 1,假定 n 为 UA 的网络层数标识。当一个典型的用户对关联到第 k 层网络的中继时,存在 $n=k$。因此,X_{SR}^k 和 Y_{RD}^k 的联合 PDF 可以表示为式(21),在定理 1 中已给出 $\Pr\{n=k\}=A_k$。对于联合概率 $\Pr\{R_{SR}^k\leqslant x,R_{RD}^k\leqslant y\mid n=k\}$,如式(22)所示。

$$F_{X_{SR}^k,Y_{RD}^k}(x,y)=\Pr\{X_{SR}^k\leqslant x,Y_{RD}^k\leqslant y\}=\Pr\{R_{SR}^k\leqslant x,R_{RD}^k\leqslant y\mid n=k\}=\frac{\Pr\{R_{SR}^k\leqslant x,R_{RD}^k\leqslant y,n=k\}}{\Pr\{n=k\}} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}\Pr\{R_{SR}^k>x,R_{RD}^k>y,n=k\}&=\Pr\{R_{SR}^k<x,R_{RD}^k<y,X_k>\max_{j=\{1,2,\cdots,k\}\backslash j\neq k}(X_j)\}\\&\overset{(b)}{=}\int_0^x\int_0^y\prod_{j=1,j\neq k}^{K}\Pr\{X_j<X_k\}f_{R_{SR}^k,R_{RD}^k}(u,v)\mathrm{d}u\mathrm{d}v=\int_0^x\int_0^y\prod_{j=1,j\neq k}^{K}(1-\Pr\{X_j>X_k\})f_{R_{SR}^k,R_{RD}^k}(u,v)\mathrm{d}u\mathrm{d}v\\&\overset{(c)}{=}\int_0^x\int_0^y\prod_{j=1,j\neq k}^{K}\left(1-\Pr\left\{\frac{(u)^{\alpha_k}}{P_R^kL_0\beta_kr_0^{\alpha_k}}<X_j\right\}\Pr\left\{\frac{(v)^{\alpha_k}}{P_R^kL_0\beta_kr_0^{\alpha_k}}<X_j\right\}\right)f_{R_{SR}^k,R_{RD}^k}(u,v)\mathrm{d}u\mathrm{d}v\\&=\int_0^x\int_0^y\prod_{j=1,j\neq k}^{K}\left(1-\left[\left(1-F_{X_j}\left(\frac{u^{\alpha_k}}{P_R^kL_0\beta_kr_0^{\alpha_k}}\right)\right)\left(1-F_{X_j}\left(\frac{v^{\alpha_k}}{P_R^kL_0\beta_kr_0^{\alpha_k}}\right)\right)\right]\right)f_{R_{SR}^k,R_{RD}^k}(u,v)\mathrm{d}u\mathrm{d}v\end{aligned} \tag{22}$$

其中,(b)满足 X_j 的独立性;$f_{R_{SR}^k,R_{RD}^k}(u,v)$ 是 R_{SR}^k 和 R_{RD}^k 的 PDF;(c)满足 R_{SR}^k 和 R_{RD}^k 的独立性;$F_{X_j}(\cdot)$ 是 X_j 的 CDF,$F_{X_j}(\cdot)$ 在引理 1 中已给出,联合 PDF $f_{R_{SR}^k,R_{RD}^k}(u,v)=(2\pi\lambda_k)^2u\cdot v\cdot\exp(-\pi\lambda_k(u^2+v^2))$ 可得定理 2。

定理 2 使用 X_{SR}^k 和 Y_{RD}^k 分别表示典型用户对到关联中继的距离,那么 X_{SR}^k 和 Y_{RD}^k 的联合 PDF 可以表示为:

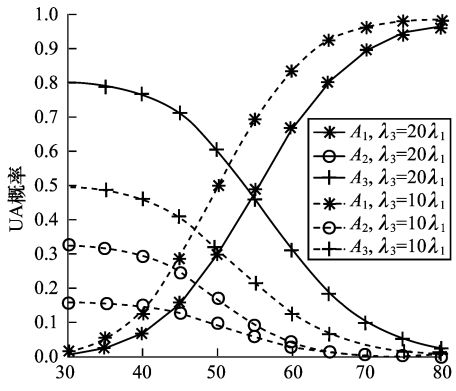
$$f_{X_{SR}^k,Y_{RD}^k}(x,y)=\frac{1}{A_k}\prod_{j=1,j\neq k}^{K}\left\{1-\left[\left(1-F_{X_j}\left(\frac{x^{\alpha_k}}{P_R^kL_0\beta_kr_0^{\alpha_k}}\right)\right)\left(1-F_{X_j}\left(\frac{y^{\alpha_k}}{P_R^kL_0\beta_kr_0^{\alpha_k}}\right)\right)\right]\right\}\times(2\pi\lambda_k)^2xy\exp(-\pi\lambda_k(x^2+y^2)) \tag{23}$$

3 仿真结果及其讨论

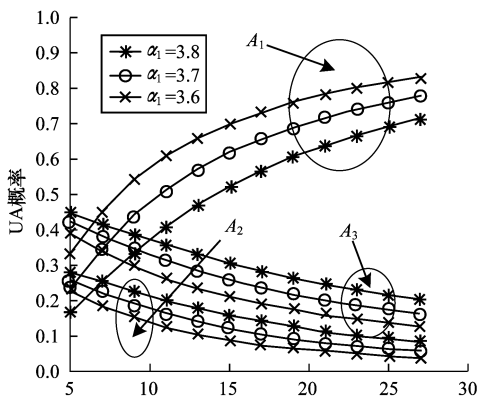
本节主要对 K 层中继协作 HetNets 性能进行仿真和数值分析。考虑一个 3 层 HetNets,路径损失为 $L_0=-38.5$ dBm,热噪声 $W=-104$ dBm,且在每一层都有 $P_R^k=P_S^k,k=1,2,3$。取路径损失指数分别为 $\alpha_1=3.0$,$\alpha_2=3.5$,$\alpha_3=5.4$;强度分别为 $\lambda_1=20/500^2\pi$,$\lambda_2=2\lambda_1$,$\lambda_3=20\lambda_1$;发送功率分别为 $P_R^2=P_S^2=33$ dBm,$P_R^3=P_S^3=53$ dBm。

图 2(a)首先给出了 UA 概率 A_1,A_2 和 A_3 与发送功率 P_S^1 的比较分析。可以发现用户对关联到第 1 层网络的 UA 概率 A_1 随着发送功率 P_S^1 的增大而增大,而 UA 概率 A_2 和 A_3 则减小。其原因是在图 2(a)中,$P_R^2=P_S^2$,$P_R^3=P_S^3$,随着 P_{S1} 的增大,从第 1 层网络中继接收到的信号功率增大,UA 概率增大。由于概率满足 $A_1+A_2+A_3=1$,因此 UA 概率 A_2 和 A_3 随着 P_S^1 的增大而减小。同时,观察曲线可以看出 UA 概率 A_3 大于 A_2,其原因是在图 2(a)中 $\lambda_2\leqslant\lambda_3$。显然,UA 概率随着中继强度的增大而增大。此外,图 2(a)还给出了当 $\lambda_3=10\lambda_1$ 时 UA 概率 A_1,A_2 和 A_3 的曲线。由此可知,随着中继强度 λ_3 的增大,UA 概率 A_3 增大。同时,由于 $A_1+A_2+A_3=1$,因此 UA 概率 A_1 和 A_2 减小。图 2(b)进一步研究了中继强度对 UA 概率的影响,图中给出了当 $\lambda_2=40/500^2\pi$ 且 $\lambda_3=200/500^2\pi$ 时,UA 概率与强度 λ_1 的关系。同时,图 2(b)还研究了路径损失指数 α_1 对 UA 概率的影响。显然,UA 概率 A_1 随着强度 $\lambda_1(\lambda_1=1/500^2\pi)$ 的增大而增大,而 A_2 和 A_3 则减小。研究进一步表明 UA 概率极大程度上取决于中继强度。关于路径损失指数 α_1 对 UA 概率的影响,可以发现随着 α_1 的减小,UA 概率 A_1 增大,其原因是 α_1 减小,功率损失减小。由于 $A_1+A_2+A_3=1$,因此可以得到 A_2 和 A_3 随着路径损失指数 α_1 的增大而减小。此外,由于图 2(b)中

$\lambda_3 > \lambda_2$,因此 UA 概率 $A_3 > A_2$。



(a)UA概率与信源发送功率的关系



(b)UA概率与中继强度的关系

图 2　用户对关联概率的比较分析

不同于传统单跳网络,本文的主要贡献在于针对多层 2 跳中继异构网络,提出 MM-UP-A 准则。显然,在所提准则中 UA 概率不仅取决于信源的发送功率,还取决于中继的发送功率。为了得到中继发送功率对 UA 概率的影响,图 3 给出了中继发送功率 P_R^1 与 UA 概率的关系。

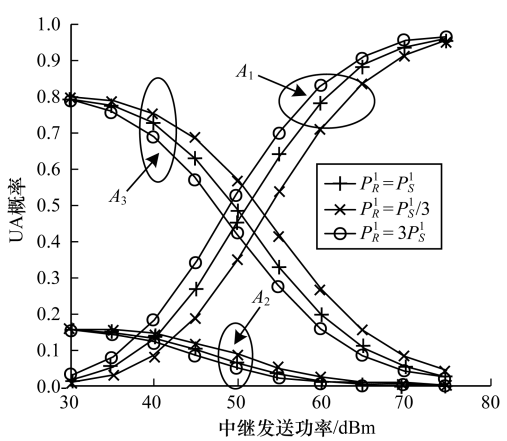


图 3　中继发送功率对用户对关联概率的影响

在图 3 中取固定值 $P_R^2=P_S^2=33$ dBm 及 $P_R^3=P_S^3=53$ dBm。由此可以看出,随着中继发送功率的增大,UA 概率 A_1 增大,这是由于提出的 MM-UP-A 准则主要由瓶颈链路决定。类似地,由于在图 3 中 $P_R^2=P_S^2$ 及 $P_R^3=P_S^3$,根据 $A_1+A_2+A_3=1$ 可知,UA 概率 A_2 和 A_3 随着中继发送功率 P_R^1 的增大而减小。

4　结束语

本文在多层中继协作 HetNets 模型下,借助于随机几何工具,研究了异构网络用户对关联问题。利用中继网络中的信道增益及其节点功率,提出 MM-UP-A 准则,得到用户关联概率的解析表达式。仿真实验验证了所得结果的正确性。下一步将对 HetNets 物理层安全性能进行研究,在被动窃听场景下,结合人工噪声、安全波束赋形等技术,进一步提高网络安全性。

参考文献

[1] CHINIPARDAZ M, NOORHOSSEINI M. A Study on Cell Association in Heterogeneous Networks with Joint Load Balancing and Interference Management [J]. Telecommunication Systems, 2017(16): 1-20.

[2] 钟智豪,罗文宇,彭建华,黄开枝. 多层异构蜂窝网协作传输和协作干扰机制的安全性能分析[J]. 中国科学:信息科学,2016,46(1):33-48.

[3] 黄　鹏,黄　晨,廖薪棋,等. HetNet 中基于功率控制的动态增强小区间干扰协调方案[J]. 计算机工程,2016,42(12):102-107.

[4] LIU Dantong, WANG Liefeng, CHEN Yue, et al. User Association in 5G Networks: A Survey and an Outlook[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 1018-1044.

[5] KAMEL M, HAMOUDA W, YOUSSEF A. Ultra-dense Networks: A Survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2522-2545.

[6] ANDREWS J, SINGH S, YE Q, et al. An Overview of Load Balancing in HetNets: Old Myths and Open Problems[J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 21(2): 18-25.

[7] DHILLON H S, GANTI R K, BACCELLI F, et al. Modeling and Analysis of K-tier Downlink Heterogeneous Cellular Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3): 550-560.

[8] CHEN Youjia, LI Jun, LIN Zihuai, et al. User Association with Unequal User Priorities in Heterogeneous Cellular Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9): 7374-7388.

[9] Kyocera Group. Potential Performance of Range Expansion in Macro-pico Deployment[Z]. 2010.

(下转第 143 页)

[2] AGIWAL M,ROY A,SAXENA N. Next Generation 5G Wireless Networks:A Comprehensive Survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1617-1655.
[3] 胡登鹏,石　峰,张尔扬. 非数据辅助的 OFDM 系统符号同步算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(3): 739-743.
[4] van de BEEK J J, SANDELL M, BORJESSON P O. ML Estimation of Time and Frequency Offset in OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997,45(7):1800-1805.
[5] PARK B, CHEON H, KO E, et al. A Blind OFDM Synchronization Algorithm Based on Cyclic Correlation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2):83-85.
[6] SCHMIDL T M,COX D C. Robust Frequency and Timing Synchronization for OFDM [J]. IEEE Transactions on Communications,1997,45(12):1613-1621.
[7] PARK B,CHEON H, KANG C, et al. A Novel Timing Estimation Method for OFDM Systems [J]. IEEE Communications Letters,2003,7(5):239-241.
[8] 谭晓衡,王梅梅. 利用训练序列的 OFDM 时频同步算法[J]. 重庆大学学报,2009,32(8):955-959.
[9] 侯伟昆,叶　梧,冯穗力,等. 叠加训练序列 OFDM 系统的联合频偏与信道估计[J]. 电路与系统学报, 2008,13(1):79-83.
[10] MOOSVI S M A,MCLERNON D C,OROZCO-LUGO A G, et al. Carrier Frequency Offset Estimation Using Data-dependent Superimposed Training[J]. IEEE Communications Letters,2008,12(3):179-181.
[11] ZHANG Qinjuan,WU Muqing,GUO Qilin,et al. Carrier Frequency Offset Estimation Based on Data-dependent Superimposed Training for OFDM Systems [C]// Proceedings of the 19th International Conference on Telecommunications. Washington D. C., USA: IEEE Press,2012:1-4.
[12] OROZCO-LUGO A G,LARA M M,MCLERNON D C. Channel Estimation Using Implicit Training [J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2004,52(1):240-254.
[13] 曹海波. 高铁环境下 OFDM 系统信道估计与信号检测技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2014.
[14] HIJAZI H, ROS L. Polynomial Estimation of Time-varying Multipath Gains with ICI Mitigation in OFDM Systems[C]//Proceedings of International Symposium on Communications, Control and Signal Processing. Washington D. C. ,USA:IEEE Press,2008:905-910.
[15] GIANNAKIS G B, TEPEDELENLIOGLU C. Basis Expansion Models and Diversity Techniques for Blind Identification and Equalization of Time-varying Channels[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 86(10): 1969-1986.
[16] YANG Hua,XIONG Jian,LI Suyue, et al. Wavelet BEM Based Channel Estimation over Rapidly Time-varying Channels[C]//Proceedings of Wireless Communications & Networking Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press,2013:71-75.
[17] GAYOSSO-RIOS E,LARA M M,OROZCO-LUGO A G,et al. Symbol-blanking Superimposed Training for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Systems[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Wireless Communication Systems. Washington D. C. ,USA:IEEE Press,2010:204-208.
[18] ZHANG Qinjuna,WU Muqing,GUO Qilin,et al. Channel Estimation and Symbol Detection with ICI Cancellation Based on Superimposed Training for OFDM Systems[J]. IEICE Transactions on Communications,2012,E95. B(9): 2926-2930.

编辑　陆燕菲

(上接第 137 页)

[10] GUVENC I. Capacity and Fairness Analysis of Heterogeneous Networks with Range Expansion and Interference Coordination [J]. IEEE Communications Letters,2011,15(10):1084-1087.
[11] JO H S,SANG Y J,XIA Ping,et al. Outage Probability for Heterogeneous Cellular Networks with Biased Cell Association [C]//Proceedings of Global Communications Conference. Washington D. C. ,USA:IEEE Press,2011:1-5.
[12] SEKANDER S, TABASSUM H, HOSSAIN E. Decoupled Uplink-downlink User Association in Multi-tier Full-duplex Cellular Networks: A Two-sided Matching Game [C]//Proceedings of the 12th ACM Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks. New York, USA: ACM Press, 2016: 19-28.
[13] ZHOU Tianqing,HUANG Yongming,YANG Luxi. User Association with Jointly Maximising Downlink Sum Rate and Minimising Uplink Sum Power for Heterogeneous Cellular Networks[J]. IET Communications,2015,9(2): 300-308.
[14] SEMIARI O,SAAD W,VALENTIN S,et al. Matching Theory for Priority-based Cell Association in the Downlink of Wireless Small Cell Networks [C]// Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing. Washington D. C., USA:IEEE Press,2014:444-448.
[15] JIA Xiangdong, YANG Longxiang. Upper and Lower Bounds of Two-way Opportunistic Amplify-and-forward Relaying Channels[J]. IEEE Communications Letters, 2012,16(8):1180-1183.
[16] ALI M,QAISAR S,NAEEM M,et al. Energy Efficient Resource Allocation in D2D-Assisted Heterogeneous Networks with Relays [J]. IEEE Access, 2016, 4: 4902-4911.
[17] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, HOSSAIN E. Relay-assisted Device-to-device Communication: A Stochastic Analysis of Energy Saving [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2015,15(12):3129-3141.
[18] JO H S, SANG Y J, XIA P, et al. Heterogeneous Cellular Networks with Flexible Cell Association: A Comprehensive Downlink SINR Analysis [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(10):3484-3495.

编辑　陆燕菲