



一种基于阈值的无线异构网络基站分簇方法

韩东升, 丁莎莎, 余 萍

(华北电力大学电气与工程学院 保定 071003)

摘要:为抑制小区间干扰,提高系统性能,研究了异构网络中的基站分簇问题,提出了一种基于阈值的协作基站分簇方法。该方法在异构组网场景下,以最大化接收端传输速率为目标,通过选择满足设定阈值的基站进行协作,考虑了用户所属基站信号强度和非所属基站的干扰情况,分析了不同分簇方法下的用户传输速率变化情况。仿真结果表明,所提算法在系统传输速率性能方面优于现有方法。

关键词:异构网络;协作;阈值;分簇;传输速率

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015086

A Clustering Method Based on the Threshold in Wireless Heterogeneous Network

Han Dongsheng, Ding Shasha, Yu Ping

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The base station clustering problems in wireless heterogeneous network to suppress the inter cell interference were studied. A clustering method based on the threshold, which can improve the system performance, was proposed. The method maximizes the transmission rate for the target under the heterogeneous network scenarios, then selecting the base stations meeting the threshold value to collaborate, at the same time considering the user belonging-base station's signal intensity and the no-belongings' interference. The receiver transmission rate in different clustering methods was analyzed. The simulation results show that the proposed method is better than the existing methods in the system transmission rate.

Key words: heterogeneous network, coordinate, threshold, clustering, transmission rate

1 引言

异构网络 (heterogeneous network, HN) 和协作多点 (coordinated multi-point, CoMP) 传输技术是应用在新一代

移动通信系统——5G 中的关键技术。异构网络是由宏基站和不同类型的低功率基站,如微基站、家庭基站等共同组成的系统。低功率基站为系统提供深度覆盖,缩短了用户和基站之间的距离,提高了小区分裂增益^[1];协作多点传

收稿日期:2014-11-12;修回日期:2015-04-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61302106),河北省自然科学基金资助项目(No. F2014502029),中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2014MS100)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61302106), Natural Science Foundation of Hebei Province (No.F2014502029), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2014MS100)

论文引用格式:韩东升,丁莎莎,余萍.一种基于阈值的无线异构网络基站分簇方法.电信科学,2015086

Han D S, Ding S S, Yu P. A clustering method based on the threshold in wireless heterogeneous network. Telecommunications Science, 2015086



输是让分布在不同地理位置的基站进行协作,抑制同频组网造成的严重小区间干扰,提高边缘用户传输速率^[2]。

协作基站之间用光纤连接来实现用户信息 (user information, UI) 或信道状态信息 (channel state information, CSI) 的共享,需要在基站之间进行大量的信息交互,若是在整个系统中应用 CoMP 技术,会造成 X2 链路负担和信令过重^[3]。因此,可以把整个小区系统按照一定的方法进行分簇,在小区簇内应用协作多点传输技术,能很好地消除簇内小区间干扰。目前,协作基站分簇方法主要有静态分簇和动态分簇。静态分簇^[3-6]主要是根据基站的地理位置和承载业务的相似度进行分簇,算法简单,但是形成的协作簇规模固定,而实际中用户具有随机性、移动性的特点,导致分簇后的系统性能较差;动态分簇方法^[7-11]是根据 CSI 的情况动态进行协作基站分簇,形成的簇规模实时性好,但是计算量大、复杂度高,并且实际中很难获取实时 CSI。参考文献[7]提出了一种贪婪搜索方法进行动态分簇,后续提出了改进算法^[8]。参考文献[10]分析了基于协同度的基站分簇在 CSI 存在失真情况下的不足,提出了基于平均信干噪比的协作基站分簇方法。参考文献[11]提出了一种基于协同度利益树的动态分簇方法。参考文献[12]提出了最近距离的分簇方法形成协作基站簇,该方法计算简单,但实际信号在无线传输信道中受到环境因素影响比较大,即使地理位置上距用户近的基站,由于受地形等环境因素的影响,也会造成用户端接收信号质量差的结果,并且该分簇方法没有考虑异构网络的组网形式。基于以上分析,本文提出一种针对异构网络的分簇方法,考虑用户接收功率大小和其他基站对该用户的平均干扰情况,设定阈值进行分簇。通过仿真,验证了该方法获得的小区边缘用户传输速率高于现有参考文献[12]中所提方法。

2 系统模型的建立

目前,移动通信系统具有多基站、多小区、多用户的特点,并且异构网络基站是不规则部署的。因此,根据基站传输功率、支持数据速率、密度的不同,将小区分成多层的结构,每层基站随机分布^[13]。根据电磁波呈球面辐射的特点,令基站的覆盖范围呈圆形区域。

本文研究的异构网络场景为:系统中有多个宏小区,每个宏小区中包含多个随机分布的微小区,用户随机分布

在小区中。现考虑一个异构网络下行系统,系统中有 B 个小区,每个小区有 1 个宏基站和 L 个微基站,第 j 个小区的宏基站记为 B_j ,其中 $j=1,2,\dots,B$,在该小区的第 l 个微基站记为 L_{jl} ,每个宏基站有 M 根发送天线,每个微基站有 M' 根发送天线。在每个小区中有 K 个用户随机分布在小区中,第 i 个用户记为 K_i ,其中 $i=1,2,\dots,K$,那么,第 j 个宏小区中的用户可以记为 K_{ij} ,该小区的第 l 个微基站的用户可以记为 K_{ijl} ,用户单天线接收。宏基站的发射功率为 P_M ,微基站发射功率为 P_l 。

现考虑处于第 j 个小区的第 l 个微基站的第 i 个用户 K_{ij} 接收到的信号。基站通过无线信道向用户广播信息,那么用户 K_{ij} 接收到的信号强度为:

$$y_{ij} = P_M (H_{ij}^M)^H (w_{ij}^M) s_{ij} + P_l (H_{ijl}^{M'})^H (w_{ijl}^{M'}) s_{ijl} + \sum_{m=1, m \neq j}^L (H_{ijm}^{M'})^H (w_{ijm}^{M'}) s_{ijm} + P_M \sum_{n=1, n \neq j}^B (H_{ijn}^M)^H (w_{ijn}^M) s_{ijn} + P_l \sum_{m=1, m \neq l}^L \sum_{n=1, n \neq j}^B (H_{imn}^{M'})^H (w_{imn}^{M'}) s_{imn} + N_{ij} \quad (1)$$

式(1)中, s_{ij} 表示处在第 j 个小区的宏基站通过广播向用户 K_{ij} 发送的信息流, s_{im} 表示用户 K_{ij} 非所在小区的微基站通过广播向用户 K_{ij} 发送的信息流, H_{ij}^M 表示宏基站 j 向处于第 l 个微小区用户 K_{ij} 传输数据过程中的信道矩阵,并且 $H_{ij}^M \in \mathcal{R}^{1 \times M}$ 。所有宏基站和用户 K_{ij} 之间的信道矩阵表示为 $H_B^M = [H_1^M, \dots, H_B^M]$ 。 $H_{ijl}^{M'}$ 表示从第 j 个小区的第 l 个微基站向用户终端 K_{ij} 传输数据过程中的信道矩阵,并且 $H_{ijl}^{M'} \in \mathcal{R}^{M' \times 1}$ 。所有微基站与用户 K_{ij} 之间的信道矩阵表示为 $h_K^{M'} = [h_1^{M'}, \dots, h_K^{M'}]$, $K=B \times L$ 。基站端发送信号的能量期望 $E[|s_{ij}|^2]=1$ 。式(1)中第 1 项表示用户 K_{ij} 接收到的来自第 j 个小区中宏基站发送的信号;第 2 项表示用户 K_{ij} 接收到的来自第 j 个小区中第 l 个微基站发送的信号;第 3 项表示用户 K_{ij} 接收到的来自第 j 个小区的非第 l 个微基站发送的干扰信号;第 4 项表示用户 K_{ij} 接收到的来自非第 j 个小区的宏基站发送的干扰信号;第 5 项表示用户 K_{ij} 接收到的来自非第 j 个小区的非第 l 个微基站发送的干扰信号;第 6 项 N_{ij} 表示均值为 1、方差为 α^2 的高斯白噪声。 $(\cdot)^H$ 表示矩阵共轭转置。 w_{ij}^M 和 $w_{ijl}^{M'}$ 表示宏基站和微基站向用户传输数据过程中的预编码矩阵,并且 $w_{ij}^M \in \mathcal{C}^{M \times 1}$, $w_{ijl}^{M'} \in \mathcal{C}^{M' \times 1}$ 。用户 K_{ij} 接收到的信干噪比 (signal interference noise ratio, SINR) 为:

$$SINR_{ij} = \frac{P_l \|h_{ij}^M\|^2 \|w_{ij}^M\|^2}{P_M \|H_{ij}^M\|^2 \|w_{ij}^M\|^2 + P_l \sum_{m=1, m \neq l}^L \|h_{im}^M\|^2 \|w_{im}^M\|^2 + P_M \sum_{n=1, n \neq j}^B \|H_{in}^M\|^2 \|w_{in}^M\|^2 + P_l \sum_{m=1, m \neq l}^L \sum_{n=1, n \neq j}^B \|h_{imn}^M\|^2 \|w_{imn}^M\|^2 + \alpha^2} \quad (2)$$

由于基站通过广播形式向用户发送信息,这就使用户之间存在干扰,因此本文通过迫零(zero forcing, ZF)预编码技术来消除共信道干扰问题。迫零预编码是一种线性预编码方式,它通过设计合适的预编码矩阵,使编码后的数据通过信道 H 后非对角线上的数据为 0,即达到了不同天线之间的干扰消除效果。定义预编码矩阵为 W ,则 $W=H^H(HH^H)^{-1}$, $(\cdot)^H$ 表示矩阵的共轭转置, $(\cdot)^{-1}$ 表示矩阵的逆。经过预编码之后,得到用户 K_{ij} 的信干噪比为:

$$SINR_{ij} = \frac{P_l \|h_{ij}^M\|^2 \|w_{ij}^M\|^2}{P_M \sum_{n=1, n \neq j}^B \|H_{in}^M\|^2 \|w_{in}^M\|^2 + P_l \sum_{m=1, m \neq l}^L \sum_{n=1, n \neq j}^B \|h_{imn}^M\|^2 \|w_{imn}^M\|^2 + \alpha^2} \quad (3)$$

此时可得用户 K_{ij} 的数据速率为:

$$Rate_{ij} = B \cdot \lg(1 + SINR_{ij}) = B \cdot \lg\left(1 + \frac{P_{Sig_{ij}}}{P_{In_{ij}} + P_{Noi_{ij}}}\right) \quad (4)$$

其中, $P_{Sig_{ij}}$ 表示用户 K_{ij} 接收到的有效信号功率, $P_{In_{ij}}$ 表示用户 K_{ij} 接收到的干扰信号功率, $P_{Noi_{ij}}$ 表示用户 K_{ij} 接收到噪声功率。由式(3)和式(4)可得:

$$Rate_{ij} = B \cdot \lg\left(1 + \frac{P_l \|h_{ij}^M\|^2 \|w_{ij}^M\|^2}{P_M \sum_{n=1, n \neq j}^B \|H_{in}^M\|^2 \|w_{in}^M\|^2 + P_l \sum_{m=1, m \neq l}^L \sum_{n=1, n \neq j}^B \|h_{imn}^M\|^2 \|w_{imn}^M\|^2 + \alpha^2}\right) \quad (5)$$

3 基于阈值的簇的实现

分析式(4)可知,边缘用户的传输速率可以通过提高传输带宽或者信干噪比来实现,协作基站分簇则是通过协作基站共同向用户传输有用信号,提高有用信号功率,进而提高信干噪比,实现传输速率的提高。

参考文献[12]中提出一种计算复杂度低的方法形成基站簇,该方法选择距离最近的基站形成协作簇,距离通过接收功率的大小来表示。但是,实际信号的传输链路受到环境因素和噪声的实时影响,距离基站最近的用户接收信号质量可能不是最佳的,因此需要考虑信道传输链路的影响和其他基站发送信号的干扰。综合以上考虑,提出一种

设定阈值的小区簇形成方法,选择符合该阈值的基站进行协作,进而提高边缘用户的传输速率,具体步骤如下。假设发送端和接收端可以获得即时 CSI,反馈信道没有发生错误和延迟。

步骤 1 计算小区中用户 K_{ij} 的接收信号强度。

用户 K_{ij} 处于微基站 L_{ij} 的覆盖范围,由式(1)可知,其接收所处微小区的微基站 L_{ij} 发送的有用信号为:

$$P_{ijl} = P_l \|h_{ij}^M\|^2 \|w_{ij}^M\|^2 \quad (6)$$

步骤 2 设定阈值。

根据假设的异构网络模型,宏基站和微基站的总个数为:

$$ZS=B+B \times L \quad (7)$$

用户可以接收到除微基站 L_{ij} 之外的基站发送信号,这些基站个数为:

$$ZS_{\neq}=B+B \times L-1 \quad (8)$$

I_A 表示用户 K_{ij} 接收到除了微基站 L_{ij} 之外的每个基站发送的干扰信号强度,根据式(1)可得干扰信号强度集合为:

$$I_A=\{I_1, \dots, I_B, \dots, I_T; T=ZS-1\} \quad (9)$$

基站发送的信号经过预编码后,在传输过程中经历衰减,最后在接收端的接收信号为:

$$I_q = P_q \cdot \|h_q\|^2 \cdot \|w_q\|^2 \quad (10)$$

其中, P_q 表示基站 q 的信号发送功率, h_q 表示基站 q 与用户之间的信道矩阵, w_q 表示与信道矩阵 h_q 对应的预编码矩阵。根据式(1)和式(10)可得出基站 q 的干扰强度 I_q 。计算 ZS_{\neq} 个基站的接收信号平均值为:

$$\overline{SIG}_A = \frac{I_1 + I_2 + \dots + I_B + \dots + I_T}{ZS-1} \quad (11)$$

设定接收信号阈值为:

$$SIG_{vz} = \overline{SIG}_A + P_{ijl} = \frac{I_1 + I_2 + \dots + I_B + \dots + I_T}{ZS-1} + P_l \|h_{ij}^M\|^2 \|w_{ij}^M\|^2 \quad (12)$$

步骤 3 筛选符合条件的基站,形成基站协作集合。

将式(9)中计算的每个值与式(12)设定的阈值进行比较,如果 $I_q \geq SIG_{vz}$,则将选择 I_q 对应的基站 q 与用户 K_{ij} 所处小区的微基站 L_{ij} 进行协作,共同为用户传



输有效数据。

步骤4 形成协作基站集。

选择满足式(3)的微基站作为协作簇中的基站。

$$U^{C_Base} = \{q \in (B+B \times L-1) | I_q > T, T = SIG_{YZ}\} \quad (13)$$

$$XZ_Rate_{ij} = B \cdot \lg \left(1 + \frac{P_l \|h_{ij}^{Ml}\|^2 \|w_{ij}^{Ml}\|^2 + \sum_{q=1}^{ZS-1} I_q}{P_M \sum_{n=1, n \neq j}^B \|H_{inl}^M\|^2 \|w_{inl}^M\|^2 + P_l \sum_{m=1, m \neq l}^L \sum_{n=1, n \neq j}^B \|h_{imn}^{Ml}\|^2 \|w_{imn}^{Ml}\|^2 - \sum_{q=1}^{ZS-1} I_q + \alpha^2} \right) \quad (14)$$

根据式(5)和式(14)可知,干扰信号强度降低,接收端信噪比提高,进而用户数据传输速率提高。算法流程如图1所示。

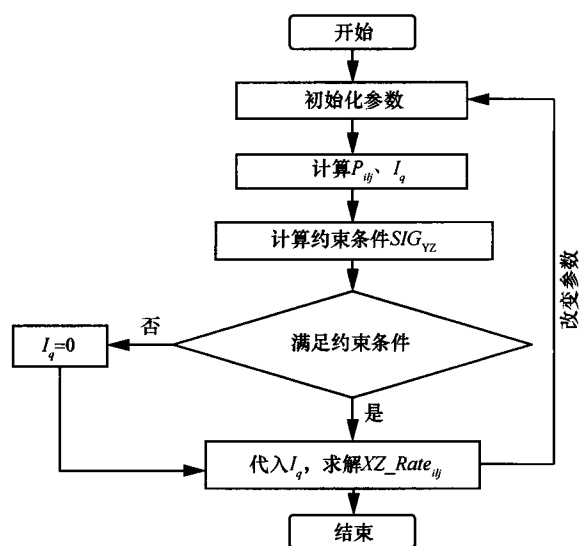


图1 算法流程

(1)首先根据设定的参数建立小区拓扑结构,初始化数据,可以得到基站初始集合:

$$b=\{1,2,\dots,j,\dots,B+B \times L\} \quad (15)$$

(2)计算用户 K_{ij} 接收到微基站 L_{ij} 的有效信号功率 P_{ij} , 并根据 I_q 计算非基站 L_{ij} 集合:

$$b_f=\{1,2,\dots,j,\dots,B+B \times L-1\} \quad (16)$$

对应发送的干扰信号集合 I_A 。

(3)设定阈值 SIG_{YZ} ,建立约束条件。

(4)判断用户 K_{ij} 接收到每个非基站 L_{ij} 发送信号功率是否满足约束条件,即判断集合 I_A 中的每个元素 I_q 是否大于 SIG_{YZ} 。

(5)若满足条件,则从基站初始集合 b 中选择满足条件的基站,存入新集合:

$$b_m=\{1,2,\dots,m\}, m \leq B+B \times L-1 \quad (17)$$

U^{C_Base} 为满足条件的微基站集合,最终得到协作基站簇。

根据式(5)可知,此时用户接收到信号的传输速率为:

否则,设置 I_q 为0。

(6)改变参数,计算多次循环后的传输速率 XZ_Rate_{ij} , 并仿真验证。

4 仿真参数和仿真结果

假设基站随机分布在以(0,0)为圆心,半径为6 km的圆形区域内。宏基站个数为10,形成10个小区,在每个小区中有1个微基站,微基站分布在小区边缘,用户位于其中的某个微小区内。仿真参数见表1,其中 dh 表示宏基站和用户之间的距离, dw 表示微基站和用户之间的距离。

表1 仿真参数设置

参数	数值
宏基站发送功率/dBm	46
微基站发送功率/dBm	30
宏基站天线数/根	4
微基站天线数/根	4
用户天线数/根	1
宏基站到用户的路径损耗/dB	128.1+37.6 lb(dh)
微基站到用户的路径损耗/dB	140.7+36.7 lb(dw)
带宽/(bit·s ⁻¹)	1
宏基站个数(小区数)/个	10
微基站个数/个	10
宏基站覆盖半径/km	15
微基站覆盖半径/m	30~300

根据设置的仿真场景和仿真参数,通过 MATLAB 软件仿真后得到实验结果如图2和图3所示。

依据本文建立的异构网络模型和提出的基站分簇方法进行了系统仿真,验证方法的性能,将微小区中的边缘用户传输速率作为性能指标。如图2所示,随着信噪比的增加,参考文献[12]所提方法(功率最大法)与本文所提方

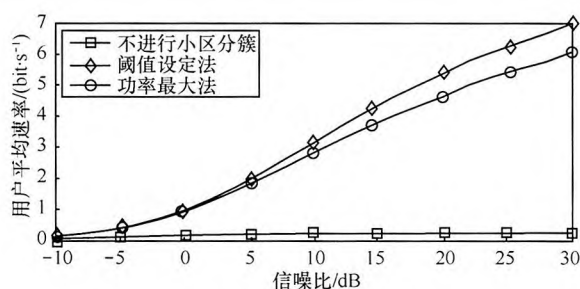


图2 传输速率比较

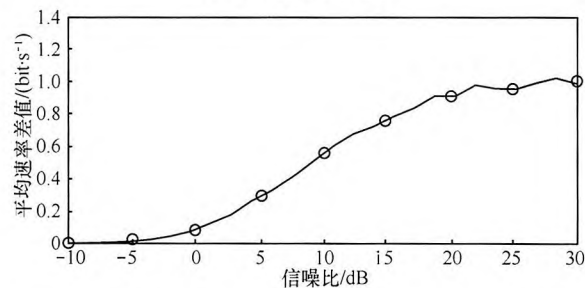


图3 基于阈值分簇法和功率最大分簇法的用户速率差值

法(阈值设定法)得到的用户传输速率都增加,且阈值设定法的用户速率高于功率最大法的用户速率。在信噪比为 18 dB 时,阈值设定法用户的传输速率为 4.96 bit/s,功率最大法为 4.297 bit/s,阈值设定法用户传输速率有 14% 的性能提升。如图 3 所示,两种方法用户传输速率之间的差距随着信噪比提高不断变大,但是在信噪比大于 25 dB 时变化较平缓。分析式(10)可知,当信噪比变大时,阈值变大,此时满足式(11)的可以协作的基站个数变少,满足式(11)的基站与用户 K_{ij} 所处小区的微基站 L_j 协作,共同向用户 K_{ij} 发送数据得到的传输速率,与功率最大法得到的可以协作的基站向用户发送数据的传输速率基本相同,进而使得平均速率差值变化变缓。可以得出,当信噪比在 10~25 dB 变化时,阈值设定法能获得较好的系统性能。

采用基于 ZF 的 THP 非线性预编码,验证本文方法用户传输速率性能,得出仿真曲线,如图 4 所示。

图 4 是线性预编码和非线性预编码下,不同分簇方法

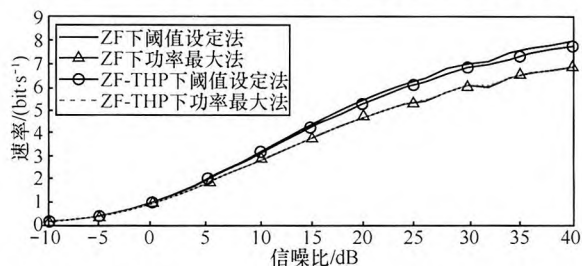


图4 不同预编码下对应的用户传输速率

对应的用户传输速率的比较。仿真中分别采用了线性 ZF 预编码和基于 ZF 的非线性 THP 预编码^[4],从曲线变化的情况可知,在两种类型的预编码方式下,阈值设定法的传输速率大于功率最大法的传输速率,说明阈值设定法不受预编码方式的影响。分簇方法在线性 ZF 预编码方式下得到的用户传输速率比非线性预编码方式得到的传输速率高。根据参考文献[15]可知,当进行 THP 预编码时,会出现功率损失的情况,造成有效信号功率变小。从式(14)得出边缘用户的传输速率变小,造成通过 THP 预编码后得到的传输速率低于 ZF 预编码得到的传输速率。

5 结束语

新一代移动通信技术中的协作多点传输能减小小区间干扰,提高系统性能,基站分簇是实现协作多点传输的一种方式。本文通过分析目前基站分簇方法的不足,提出了基于异构网络设定阈值的分簇方法,该方法实现较简单、适用性较好。仿真验证结果表明,通过设定功率阈值可以提高协作小区边缘用户的传输速率,并且基站分簇算法不受预编码方式的影响,同时验证了协作传输能显著提高系统的传输速率。但对于存在多用户移动情况下的协作基站分簇方法还需要进一步的研究。

参考文献

- 1 科讯广电网 alina. 微基站: 专为 LTE 深度覆盖而生. <http://bc.tech-ex.com/2014/tbusiness/57727.html>, 2014
- 2 郑健. TD-LTE-Advanced 协作多点传输技术研究 (硕士学位论文). 北京邮电大学, 2012
- 3 姜伟. LTE-A 中协作多点传输的方案研究. 微型机与应用, 2014, 33(2): 55~59
- 4 赵培, 周胜, 高鹏. 小区分簇方法在 3G 网络规划与优化中的应用. 邮电设计技术, 2009(9): 6~10
- 5 Zhao P, Zhou S, Gao P. Methods on defining cell clusters and its application to 3G network planning and optimization. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2009(9): 6~10



- 5 Boccaedi F, Huang H. Limited downlink network coordination in cellular networks. Proceedings of IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Athens, Greece, 2007
- 6 Venkatesan S. Coordinating base stations for greater uplink spectral efficiency in a cellular network. Proceedings of IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Athens, Greece, 2007
- 7 Papadogiannis A, Gesbert D, Hardouin E. A dynamic clustering approach in wireless networks with multi-cell cooperative processing. Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Beijing, China, 2008
- 8 Liu J X, Wang D M. An improved dynamic clustering algorithm for multi-user distributed antenna system. Proceedings of the Wireless Communications & Signal Processing, Nanjing, China, 2009
- 9 Zhou S, Gong J, Niu Z S, *et al.* A decentralized framework for dynamic downlink base station cooperation. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference, Honolulu, Hawaii, USA 2009: 1~6
- 10 李坤, 黄开枝, 鲁国英等. 基于平均信干比增益的基站群分簇模型. 计算机应用研究, 2012, 29(12): 4699~4702
Li K, Huang K Z, Lu G Y, *et al.* Base stations clustering model based on average of signal to interference ratio gain. Application Research of Computers, 2012, 29(12): 4699~4702
- 11 黄开枝, 郑丽清, 李坤等. 基于协同度的基站群利益树动态分簇算法. 电子与信息学报, 2012, 34(6): 1469~1475
Huang K Z, Zheng L Q, Li K, *et al.* Benefit-tree dynamic clustering algorithm based on degree of wiliness to cooperate for base station cooperation. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(6): 1469~1475
- 12 Chris T K N, Huang H. Linear precoding in cooperative MIMO cellular networks with limited coordination clusters. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28 (9): 1446~1454
- 13 Dhillon H S, Ganti R K, Baccelli F, *et al.* Modeling and analysis of K -tier downlink heterogeneous cellular networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3): 550~560
- 14 增加生, 田宝玉. MU-MIMO THP 预编码技术的研究. <http://www.paper.edu.cn/html/releasepaper/2011/11/260/>, 2011
Zeng J S, Tian B Y. The research on MU-MIMO TH precoding technology. <http://www.paper.edu.cn/html/releasepaper/2011/11/260/>, 2011
- 15 祁美娟. MIMO 系统中预编码技术研究 (硕士学位论文). 重庆大学, 2012
Qi M J. Study on precoding technique in MIMO system (master dissertation). Chongqing University for the Master's Degree, 2012

[作者简介]



韩东升, 男, 博士, 华北电力大学电子与通信工程学院讲师, 主要研究方向为无线通信新技术。



丁莎莎, 女, 华北电力大学电子与通信工程学院硕士生, 主要研究方向为异构无线通信。



余萍, 女, 华北电力大学电子与通信工程学院副教授, 主要研究方向为无线通信、信息处理。

2015086-6

(上接 2015087-6)

[作者简介]



吴明昊, 男, 宁波大学信息科学与工程学院硕士生, 主要研究方向为数字无线通信、宽带信息传输。



郑紫微, 男, 宁波大学信息科学与工程学院教授、博士生导师, 教育部新世纪优秀人才、浙江省杰出青年、宁波市有突出贡献专家, 曾获得 2009 年国家科学技术、进步奖二等奖 1 项, 主要研究方向为移动通信、宽带信息传输。

2015087-7