**大 连 理 工 大 学 本 科 外 文 翻 译**

**异构网络中以用户为中心的跨层基站**

**协作机制研究：速率改进与节能**

**User-Centric Cross-Tier Base Station Clustering**

**and Cooperation in Heterogeneous Networks:**

**Rate Improvement and Energy Saving**

学 部（院）： 电子信息与电气工程学部

专 业： 电子信息工程

学 生 姓 名： 孟令辉

学 号： 201464112

指 导 教 师： 邓娜

完 成 日 期： 2018/3/14

大连理工大学

Dalian University of Technology

**异构网络中以用户为中心的跨层基站协作机制研究：**

**速率改进与节能**

Weili Nie, Fu-Chun Zheng, Senior Member, IEEE, Xiaoming Wang, Wenyi Zhang, Senior Member, IEEE, and Shi Jin, Member, IEEE

**摘要 - 异构蜂窝网络（HetNets）将用于未来的无线通信，以满足日益增长的移动通信需求。然而，小型蜂窝的密集性、随机性及其不协调的运作模式引起了人们对各种成本问题的重要关注，尤其是能源效率问题。基站之间的协作在管理异构蜂窝网络中的干扰方面起着重要的作用，本文首先会考虑下行链路HetNets中的基站协作，其中来自各个协作簇内的不同层的基站联合传输相同的数据给用户，并且本文会特别关注能量效率性能的优化问题。首先，基于此协作模型，本文使用随机几何中的工具来获得频谱效率。此外，本文会用最小频谱效率作为约束条件来计算功率最小化问题，并在一定的近似下推导出最佳接收信号强度（RSS）阈值的理论公式。基于这些结果，就可以在考虑频谱效率和能效的情况下设计合适的RSS阈值。仿真表明，所提出的协作模型比几何聚类模型更节能，与仅有宏网络层的模型相比，部署多层HetNet可以显著地节省能源。**

关键词– 协作，节能，异构蜂窝网络，随机几何，以用户为中心的协作。

**Ⅰ.介绍**

据报道，信息和通信技术（ICT）已经导致了全球约2％的二氧化碳排放量，并且预计未来这项指标将迅速增加。除了环境影响之外，ICT基础设施还占世界电能消耗的大约10％，而在其中无线通信行业占据主要成分。因此，较之前相比更节能的蜂窝网络更加需要被研发出来以降低该行业的成本和碳排放量。最近，绿色蜂窝网络的设计受到了网络运营商，监管机构（如3GPP和ITU）和绿色通信研究项目（如EARTH和GreenTouch）的高度重视。

通常，宏基站不是为提供高数据速率而设计的，而是为了大范围的覆盖范围。因此，由于移动数据业务的爆炸式增长，越来越多的移动数据和语音业务被期望从大型蜂窝网络更改为低能耗、低成本的小型蜂窝网络，从而形成异构蜂窝网络（HetNets）。HetNets包括一个传统的覆盖了一系列低功率基站或接入点（AP）的蜂窝网络，例如超级蜂窝，毫微微蜂窝，WiFi AP并可能包含中继。多样性被认为是未来蜂窝网络的一个关键特性，也是提供更高终端用户吞吐量的重要手段， 扩大其室内和小区边缘覆盖范围。 尽管如此，部署大量覆盖宏蜂窝的小蜂窝并不是没有新的技术挑战。

基于协作多点（CoMP）或网络多入多出（MIMO）的基站协作是一种管理小区间干扰和提高频谱效率的有效技术。具体地说，根据所采用的回程架构、可接受的移动性和复杂性以及其他约束条件，协作方式可以从协调调度和波束成形（CS / CB）到完全联合传输。尽管没有达到最初的目标，但基站协作仍然具有很大的潜力，并且可能需要重新定义HetNets中的不同节点。这需要用于性能预测和分析的新工具。

**A 相关工作和研究目的**  
 最近，已经提出了一种基于随机几何的无线节点分布的新通用模型，并且作者开发了一种易处理且合理精确的解决方案，用于分析重要的参数，例如信号与干扰加噪声比覆盖，平均遍历速率和速率覆盖。

基于随机几何框架，一些论文已经讨论了基站协作技术。通过大偏差理论研究了基站协作的中断概率。基站使用规则点阵聚类，由此通过零波束成形来减轻相互干扰。分析了随机部署的基站内簇间干扰协调问题，并且考虑了随机点过程中各个站点所在的随机聚类过程以及与同一个簇协调关联的基站组。一种不规则基站部署的成对基站协作模式在被提及，文章同时也考虑了带有或不带有附加脏纸模型的功率分离的相干联合传输。文献提出了一种分析非相干联合传输基站协作的通用模型，并在以用户为中心的聚类和信道相关调度下表征了信噪比分布。研究了多单元分布式天线系统的遍历容量，其中远程天线单元在每个单元内传播以协作传输给用户终端。将中的工作扩展到多层HetNets和衍生覆盖概率。文章的作者通过关注传输场景考虑了下行HetNets中基站协作的问题，并分别为用户和最差用户分配了覆盖概率。但是，上述所有工作很少涉及能源效率问题。

HetNets中的能效评估和优化近来吸引了很多专家的研究兴趣。例如，研究了双层HetNets中CoMP传输的节能预编码。研究了异构多小区多用户下行链路系统的协调节能传输设计。考虑了双层HetNets中节能的传输波束形成设计和功率分配策略。这些文章仅限于一个简化的双层HetNet场景，该场景由一个或少量的宏基站和每个宏小区中的固定数量的小区组成。另一方面，中的作者基于随机几何模型研究了HetNets中的能源效率问题。评估了两层网络在能源效率和资源分配公平性方面的表现。通过部署睡眠策略研究了节能HetNets的设计。的作者研究了HetNets中的分离架构，并证明它可以显著降低蜂窝网络的整体能耗。在中，大规模用户行为的异质性被定量表征并被利用来研究HetNets的能源效率。尽管如此，这些文章还没有研究HetNets的节能基站协作技术。

在这项研究中，我们基于随机几何框架（特别是在不同的路径损耗指数下），分析考虑了HetNets中基站协作的能量效率（或节能）问题。具体而言，我们将基站（宏小区和小小区）的位置建模为具有不同空间部署强度的独立泊松点过程（PPP）。受到基站协作和争用缓解广泛应用的基于阈值的思想的启发，我们考虑基于层特定接收信号强度（RSS）阈值的非相干联合传输。通过使用来自随机几何的工具，我们的目标是为频谱效率推导一个易处理的结果。从能源效率的角度来看，我们主要关注两个问题：不同层次的最优RSS阈值和HetNets中提出的聚类模型的性能增益。

**B 贡献和文章结构**

提出的聚类模型：我们基于特定于层级的RSS阈值提出了一个以用户为中心的聚类模型。与我们以前的工作中应用的几何聚类模型不同，其中协作集仅由基站和用户之间的欧几里得距离确定（另见于）在本文中，我们强调了衰落系数对聚类阈值的影响（即现在每层的协作区域是一个随机形状）。与几何聚类模型相比，表明所提出的聚类模型更加节能。更重要的是，我们现在允许不同层次的路径损失指数是不同的，这是一个至关重要的事实，据我们所知，这还没在文献中被认真考虑过。

频谱效率表征：我们通过分析计算位于K层HetNet中协作簇中心的用户的频谱效率。基于随机几何框架，该表达式是合理易处理的并且具有高度的通用性。例如，分析结果允许衰落系数的分布几乎是任意的，而我们以前的工作认为其服从瑞利衰落。另外，从面积功耗和频谱效率的结果可以容易地获得能量效率。从数值结果中，考虑到频谱效率和能量效率之间的折中，设计适当的RSS阈值至关重要。

最优RSS层次阈值：我们在最小频谱效率约束下制定功率最小化问题，并推导出近似结果。不是最小协作功耗，而是集中于优化网络的总基站功耗，这在现实中更为重要。数值结果证明了近似的紧密性。而且，近似结果在一些特殊情况下具有封闭形式。最佳的RSS门限受多个系统参数共同影响，如部署密度，发射功率，电路功率，回程功率和路径损耗指数。基于层级的最优RSS阈值，模拟表明，与传统的仅宏观网络相比，小型小区的额外部署更节能。

在本文的其余部分，第二节介绍了系统模型。频谱效率在第三节中得出。在第四节中，我们优化了功率最小化问题的RSS阈值。第五部分提供了数值结果和讨论。最后，第六部分总结了本文。为了比较和一致性，我们遵循中的表示系统（除非另有说明）。

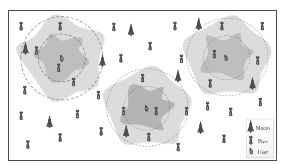


图1.利用宏和微微基站混合的双层HetNet的图示。每个用户位于其簇的中心，暗区表示微微层协作区域，浅色区域表示宏层协作区域。请注意，协作区域的不规则性来自衰落系数，虚线圆圈代表各自的平均协作区域。

**Ⅱ.系统模型**

我们考虑一个由K个独立网络层组成的HetNet，其中每个层以其传输功率和部署密度来区分。例如，传统的宏基站（通常认为第一层，本文中同）可能会有更高的发射功率和更低的密度（如微微蜂窝和蜂窝小区）。为了易于标记，我们表示= {1,2，...，K}。所有的网络层都是共同部署的。在这项工作中，不同层次的基站在部署密度，发射功率和路径损耗指数> 2)有所不同。每层的基站位置被假定为来自独立同构PPP{}的实现。用户随机分布为密度为的另一个独立同构PPP{}。基站和用户都配备了单天线。对于传播模型，我们考虑一般幂律路径损耗*l*(*x*)=，其中表示*x*与原点的距离。在图1中示出了使用宏和微微基站的混合的更强的HetNet的示例，其中每个用户可以由来自不同层的基站协作来服务。

**A 基站协作策略**

不失一般性，我们专注于位于原点的用户的下行链路分析。为此，基站协作策略是通过将相同数据联合传输给用户来协作基站的总体集合的子集。这种基站协作策略在“轻负载”场景[35]中是可行的，即。正如我们所知，由HetNets的兴起驱动的网络密集化带来了一个有趣而新颖的现象：

每个用户只会与少部分其他用户争用一个基站的服务，甚至可以有一个或多个基站来单独服务自己。从这个意义上说，“轻载”情景的假设在未来的HetNets中将非常重要。用表示用户的一组协作基站。因此，从协作基站到用户的链路是多输入单输出（MISO）信道。假设非相干联合传输技术和处理干扰噪声，用户的SINR由

(1)

其中表示干扰基站的集合，是位于*x*处的基站所属的网络层的角标，即，是位于*x*处的基站的发射功率，表示距离用户*x*的基站的衰落系数，是白噪声功率。

**B. 基站聚类模型**

本文采用的聚类方法是以用户为中心的，每个用户动态选择其周围的基站来形成其服务子集。请注意，在本文中，我们稍微滥用表示通过聚类进行基站聚类的符号。考虑到位于原点的用户，我们将具有足够高RSS的基站分配给用户组成协作聚类。也就是说，只有在时，来自位于处的第k层的第i个基站才属于用户的协作簇，其中是第k层RSS阈值。注意，这里假定信道是缓慢变化的（例如阴影），使得协作簇至少在几个数据块或帧内保持不变。

在下文中，为了简化，我们将用代替，并假设衰落系数是与具有相同分布且独立的随机变量。此外，我们允许在的条件下的分布是任意的。因此，来自用户的第k层的协作基站集合是

*除非另有说明，指的是为第k层中的每个用户服务的基站发射功率。*  
 (2)

请注意，和阈值可用作用于优化系统性能的特定层和可调谐设计参数。由于聚类模型中存在衰落系数，协作区域为随机形状，第k层平均协作半径由下式给出

(3)

此外，为了确保系统模型的有效性，我们提出以下假设。

*假设1*：由于所有用户的位置随机分布为PPP，因此几个不同用户的协作集可能会重叠。在这种情况下，这些用户将被分配到不同的正交资源块。

请注意，在轻负载的情况下，重叠概率相对较低，特别是对于小型协作区。根据以上假设，我们可以保证不存在群内干扰，即，并且协作集内的所有基站将总是可用于参与协作传输。

**C. 基站负载和面积功耗**

假设1揭示基站将使用不同的资源块来容纳其多个用户。然而，在轻负载情况下，许多基站在其大部分可用资源块中没有数据要传输，因此整个网络功耗在很大程度上取决于每个基站服务的用户数量。

1）基站负载：我们将基站负载定义为每个基站同时服务的用户的平均数量，这可以通过定义在以下引理中进行评估。

*引理1*：令是第k层基站在不同资源块上同时服务的用户数量。然后，第k层中的基站负载由下式给出=

*证明：见附录A*

从引理1可以看出，基站负载取决于用户密度和RSS阈值，通过合理调整RSS阈值，可以实现不同层次间的负载均衡。

2）面积功耗：我们将面积功耗定义为HetNets 中平均每单位面积消耗的基站功率，由下式给出：

(4)

其中表示第k层中每个基站的功耗。首先，我们对每一层基站功率模型取线性近似。为了捕获回程能量[41]和基站负载[40]，我们将线性模型扩展为如下的一般形式，

(5)

其中表示与成比例的由信号处理导致的动态电路功率，表示第k层基站功耗的斜率，是每单位负载的回程功，是静态电路功率，其与和无关。

*重叠概率可近似计算为，其中且由(3)给出。*

*的物理意义可以解释如下：当第k层基站同时接收到用户的服务请求时，根据假设1将参与协作簇，其消耗回程功率。*

请注意，我们上面提到的所有功率参数都是特定层级的。用(5)代入(4)，我们有了

(6)

其中第一项仅取决于基站密度，第二项不仅取决于基站密度，还取决于用户密度和协作区域。请注意，面积功耗也反映了网络的总的基站功耗。

**III. 频谱效率**

在本节中，我们推导了K层HetNet中用户的频谱效率的总体结果。假定使用适当的自适应调制/编码，那么频谱效率（以nats/s/Hz为单位）为

(7)

由于用户的SINR受到点过程和衰落系数的影响，所以期望是空间和时间平均。请注意，在轻负载情况下，基站负载对用户速率的影响是次要的，因此频谱效率可作为适当的性能指标[23]。

通过将(1)代入(7)，可以获得在所提出的聚类模型下用户的SINR，并且(7)可以相应地写为

(8)

其中表示第k层中的一组干扰基站。期望值取决于PPP{}和衰落系数{}. 值得注意的是，为了便于分析，并且在[23]和[26]中，我们考虑了用户的最坏情况干扰强度，即协作聚类之外的所有基站用作干扰源（实际上，他们可能不会传播，因此我们的假设是“最坏情况”情景），那么我们有.因为我们考虑一个轻负荷的情景，这个假设可能高估了实际的干扰[23]。

频谱效率的一般结果在下面的定理中被评估，这其中包含了热噪声的影响以及每层基站密度，发射功率，路径损耗指数，RSS阈值和具有任意分布的衰落系数.

*定理1*：所提出的基站协作策略和聚类模型的K层HetNet中的用户的频谱效率由

(9)

其中代表伽马函数并且

(10)

证明：引入两个辅助变量和，它们分别表示来自协作基站的接收信号功率和由干扰基站产生的总干扰，分别为：

(11)

由于我们考虑最坏的情况，是从(2)和中得到的。因此，(8)可以改写为

(12)

为了评估(12)中的频谱效率，我们首先根据[42，引理1]引入下面的方程，

(13)

其中 ,将(13)代入(12)，我们得到：

(14)

其中(a)是由等式而得到。由于和因而相互独立，所以我们应用了富比尼定理，得到：

(15)

其中和分别是随机变量和的拉普拉斯变换。首先，利用拉普拉斯变换的定义，

(16)

(a)由不同的衰落系数和不同层基站点过程的独立性得到，(b)由PPP[43]的PGFL性质得到并且，然后我们根据富比尼定理交换了积分和期望的顺序。

通过代入，(16)可以进一步简化为

(17)

并定义

(18)

我们可以通过使变量来计算上述积分，即

(19)

其中dt是较低的不完全伽马函数，并且(a)由分部积分得到。结合(16)和(19)完成了的计算。同样，的表达式由下式给出

(20)

其中

然后，通过将和的表达式代入(15)，我们可以得到(9)中的期望结果。

虽然不是封闭形式，但这个表达式适合于有效的数值计算，与通常的依靠重复随机抽样估计结果的蒙特卡罗方法相反。

由于网络能量效率被定义为单位面积频谱效率与面积功耗 [31]的比率，因此可以计算为

(21)

单位是Nats / Joule / Hz，来自(6)。

*备注1*：注意由于式(9)中的随着的增加而增加，是{}的严格单调递减函数。然而，根据(6)和引理1，由于RSS阈值{}任意小时，面积功耗和基站负载会不切实际的大。因此，在频谱效率和节能之间存在折衷(或基站负载)。

**Ⅳ. 能量最小化问题**

根据定理1中频谱效率的分析结果，在本节中，我们要确定K层HetNet中的最优RSS阈值，它在满足最小频谱效率要求的同时使(6)中的面积功耗最小化。由于HetNets中的基站密度通常较大，因此我们忽略噪声并将注意力集中在干扰限制机制上。因此，通过结合(6)和(9)，我们将问题表述如下，

(22)

其中(6)中的第一项由于其与{}的独立性而被省略，并且表示最小频谱效率，其明确表征每个用户的平均服务质量需求。

请注意，问题(22)是K个变量和一个复杂的不等式约束的优化问题。另外，这个问题可以隐含地表示为，其中并且我们将定义为问题(21)的目标函数，其中域限于可行集合，即dom ，其中是定理1中平均频谱效率的表达式.根据[46，Ch4.1.3]，对于最小化问题，如果有，那么原始问题等于.结果，在下面，我们将问题(22)分成两个子问题以解决它。

***A. 第一个子问题***

假设给出前K-1层的RSS阈值，问题(22)的目标函数是的严格单调递减函数。那么，问题(22)可以转化为如下单个变量的子问题，

(23)

问题(23)有一个独特的解决方案，因为约束的左边是的严格单调递减函数。我们不是通过二分搜索算法以数字方式获得最佳结果，而是利用一个可分析易处理的下界，这将通过第五节中的数值研究进一步证明是严谨的。

*定理2*：给定前K-1层的RSS阈值，最佳第K层RSS阈值具有下限，这满足

(24)

其中C是欧拉常数，并且

(25)

(26)

(27)

(28)

*证明：见附录B*

请注意，*l*的选择是任意的，因为(24)对于任何都取相同的值。此外，定理2还揭示了在现有HetNet中添加新层时的最优RSS阈值设计。

*备注2*：固定每层基站密度，的下界是的递减函数。它证实了我们的直觉，即当给定每层基站密度并且前K-1层的协作区域减少时，第K层协作区域应该通过降低的值来扩大。

另外，的下界也是的增函数，同时为最小频谱效率的上界。

*命题1*：给定前K-1层的RSS阈值，最小频谱效率具有最大值,满足

(29)

证明：从(24)中，当并且存在下界时。求解这个不等式即可给出的上界。

上述命题表明，当前K-1层协作区域固定时，即使第K层RSS阈值趋于零（即第K层协作区域无限扩张），也不能实现频谱效率。

在下面，我们考虑两个特殊情况，我们可以获得和的封闭形式（近似）结果

1）特例I（双层HetNet）：如果我们考虑一个双层的HetNet，即K = 2，那么可以被重写为

(30)

其中 并且。

然后，我们可以通过应用泰勒级数展开式将（30）变换成具有无限多个项的求和，如下所示，

（31）

其中(a)根据Fubini定理交换积分和求和的顺序，(b)由得到。

既然指数*l*和*j*是可以互换的，如果我们可以让*l* = 2，否则*l* = 1。因此和1之没有区别。不失一般性，我们关注系统参数满足的情况。因此，我们只需要将第一个M项近似为的值，即

(32)

通过将(32)代入(24)，我们可以得到一个封闭形式的近似结果，它满足下列表达式：

(33)

这个近似结果的准确性将在第五节中得到验证。

2）特例II（等路径损耗指数）：当所有层的路径损耗指数相同时，即可以改写为

(34)

其中(a)由(13)得到且变量，在(28)中用定义。 将（34）代入（24），我们得到

(35)

其中

(36)

从（35）中的封闭式结果中，我们可以了解第K层部署密度对第K层RSS阈值的影响，这在下面的命题中给出。

*命题2*：在相同路径损耗指数的情况下，给定前K-1层RSS的阈值和部署密度，当时，随增加而增加，当时，随增加而减小，其中并且由下式给出

(37)

(38)

*证明：见附录C。*

注意，命题2揭示了一个有趣的现象：当第K层部署强度足够大以确保时，增加导致更小的K层协作区域，因此K层中的基站负载随增多而减小; 另一方面，当第K层部署强度足够小以确保时，增加导致更大的第K层协作区域，因此第K层中的基站负载随着增加而增加。

*备注3*：在相同路径损耗指数的情况下，当考虑新网络层的最优RSS阈值设计添加到现有HetNet时，我们可以采取两种可能的方案来减少新层中的基站负载：尝试在新的层中部署尽可能少的基站，或试图在新层中部署尽可能多的基站。

***B.第二个子问题***

根据定理2，通过将(24)代入问题(22)的目标函数并应用一些代数操作，我们可以将第二个子问题(39)表示为

(39)

因为只有当才可以得到的可行值，所以存在约束。

最佳RSS阈值{}的一般近似结果如下给。

*定理3*：为了在满足最小频谱效率要求的同时使面积功耗最小，最佳K层RSS阈值{}的近似结果满足

(40)

其中，

(41)

特别地，当{}=时，{}闭型表达式由下式给出

(42)

*证明：见附录D*

注意，第k层最佳RSS门限的设计取决于多个系统参数，包括部署密度，发射功率，电路功率，回程功率和路径损耗指数。特别是随着和的增加而增加。这意味着当第k层具有更大的电路功率或回程功率时，第k层的最佳协作区域将变小。

此外，从附录D中的(70)可以看出，任何两层的最优RSS阈值的比例都满足.也就是说，这个比率只取决于这两层的功率参数。 相应地，我们可以得到如下有洞察力的观察结果。

*请注意，在解决第二个子问题（39）的过程中没有近似，并且对所有k∈保持的定理3中的最优结果来自上述两个子问题的组合。*

*备注4*：由于(40)是一个多项式方程，因此可以应用简单二分搜索法或迭代法来数值计算最优结果。同时，由于(70)中任意两层的最优RSS阈值之间的关系，我们只需要计算一个非线性方程，这进一步降低了计算复杂度。

*备注5*：当最小频谱效率增加时，满足此速率要求的最节能的方法是按比例降低每一层的RSS阈值。相反，即使在该层中每个基站的功耗较低，仅调整一个层的RSS阈值在节能方面总是不理想的。

通过将定理3中的最优RSS阈值代入式(6)，可以得到所提出的聚类模型的最小面积功耗。另外，为了证明节能方案的好处，下面我们还导出了[23,25]和[1]中几何聚类模型的最小面积功耗。在几何聚类模型中，第k层的协作基站集合定义为

.这里，表示以原点为中心，半径为的二维球。我们称之为几何方案，因为用户的协作集只由基站和用户之间的欧几里得距离决定。

但是，考虑到计算复杂度，我们不能让衰落系数的分布{}在这种情况下是任意的。为了有效地导出最优协作半径并保持解的一般性，我们假设表示形状为且刻度为的Gamma分布。由于它遵循类似的推导过程，因此我们直接给出以下命题的结果。

*命题3*：假设衰落系数为.为了在满足几何聚类模型下的最小频谱效率要求的同时使面积功耗最小，最佳K层协作半径的近似值{}满足

(43)

其中*l*并且

(44)

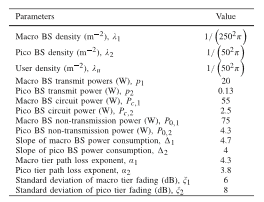
(45)

(46)

(47)

(48)

表1 仿真参数



(49)

通过将最佳协作半径{}代入的面积功耗表达式，可以得到几何聚类模型的最小面积功耗。请注意，在这个Gamma分布假设下，(28)中的值可以被评估为

(50)

所提出的聚类模型与几何模型的比较将在下一节中介绍。

**V.数值结果**

在本节中，我们提出仿真结果来验证我们的分析并评估所提出的聚类模型下的节能性能。除非另有说明，否则我们将我们的演示结果限制为由宏和微微基站组成的受干扰的两层HetNet。两层HetNet场景中的仿真参数如表1所示，其中根据[39]选择功率参数，默认情况下衰落系数的分布假设为对数正态分布，其中并且高斯随机变量*x~*. 为了指定的值，我们考虑[44]中的简化回程系统。根据[44]的表

达式(3)和(5)，假设其加权参数= 1且= 30，我们得== 11。

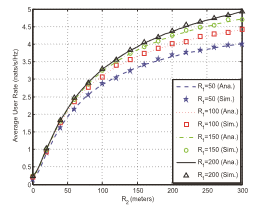


图2 频谱效率为平均协作半径的函数，其中R1和R2分别表示宏层和微微层平均协作半径

在蒙特卡罗模拟中，我们选择一个大的空间窗口，它是一个10km×10km的区域，并且产生具有它们各自密度的两个独立的基站位置PPP。对于每一个情况，位于处的每个基站的衰落系数是根据和高斯随机变量*x~*'独立生成的。然后通过(8)(通过让= 0)获得瞬时用户速率。最终的模拟结果是通过平均10000次独立实现而获得的。

**A.定理1的验证**

图2显示了用户的频谱效率，它是宏层和微微层平均协作半径的函数。请注意，由于平均协作半径{}和RSS阈值{}根据(3)可互换，因此我们使用{}作为可调参数而不是{}以便更好地理解。与仿真结果相比，分析积分即等式(9)可以更有效地计算出来，并且它的精确度可以很好地模拟。

*与[44]不同，这里我们只考虑下行链路回程功率，因此(5)中的可以评估为=，其中和根据[44]的表Ⅱ选择。*

由它可以看到，由于较大的协作区域导致较高的有用信号强度和较低的干扰功率。所以两个层的平均协作半径和的效率都有所提高。此外，当微微层的协作半径变得足够大时，频谱效率的增加更为微小。这是因为来自长距离微微基站的平均信号强度一般较弱，而那些远距离微微基站对频谱效率的影响可以忽略不计。

为了阐明网络功耗和频谱效率之间的权衡，我们可以考虑根据式(21)可以有效计算的能量效率。为此，图3显示了宏层和微微层平均协作半径对能量效率的影响。可以看出，对于固定的，存在使能量效率最大化的最优值; 同时，这个最优值随着而增加。这个结果让我们直接从能量效率角度设计合适的平均协作半径（或RSS阈值）。

此外，我们可以观察到，随着宏观层级意味着协作半径的减少，能源效率也会增加。 这可以解释如下：与效率的积极影响相比，更多宏基站将增加功耗的能源效率的负面影响变得更加重要。在这个图中，例如， = 50， = 30是能量效率方面的最佳选择，但对于 = 50， = 30的情况，频谱效率可能太小而不能满足不断增加的用户费率要求。

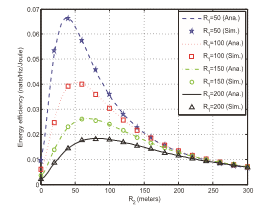


图3 能量效率为平均协作半径的函数，其中和分别表示宏层和微微层平均协作半径

因此，在实际情况下，我们应该考虑频谱效率和能源效率之间的权衡。

**B.定理2的严密性**

请注意，我们通过定义定理2中的第一个K-1层的RSS阈值，开发了最优K层RSS阈值的下界。重要的是看下界是多么紧密。在下面，根据定理2直接计算下界，其中（*l* = 2）通过(27)计算。(9)的二分搜索算法获得最优值。此外，由于K = 2(即双层HetNet)的情况并且参数设置满足，因此可以由(33)给出闭合形式的近似值，其中根据(32) ，M = 2。

图4示出了作为最小频谱效率的函数的最佳微微层RSS阈值，给定了宏平均协作半径的固定值，即= 500。首先，可以看出，下限接近于最优值，并且它们的间隙随着增加而减小。 由于随着高流量需求的不断增加，的值越来越大，这种差距是可以接受的。此外，我们看到近似值与下限一样精确，这验证了在两层HetNet情况下我们的近似值的有效性。也就是说，在一个双层HetNet中，我们可以有效地用闭型近似值代替下界，而不会失去准确性。

图5给出了最小频谱效率的固定值，即= 4，表示作为宏层平均协作半径的函数的最优微微层RSS阈值。我们可以看到，下限与最优值之间的差距非常小。 例如，当我们有 = 300时，差距约为0.12 dB。更直观地说，如果我们根据(3)等价地考虑最优微微层平均协作半径的差距，则差距大约为1.07米，这在可容忍的范围内。因此，上面的观察验证了下界的有效性。此外，与图4类似，近似值也完美匹配下界，这进一步证实了双层HetNet中封闭形式逼近的有效性。

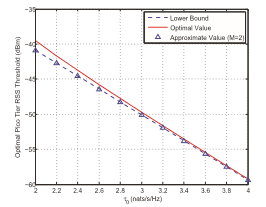


图4 函数的最优微微层RSS阈值与最小频谱效率的关系，其中 = 500

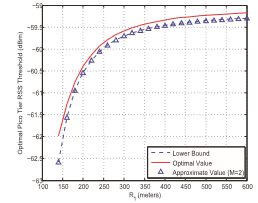


图5函数的最优微微层RSS阈值与宏层平均协作半径的关系，其中

**C.面积功耗**

图6分别显示了在传统的单层网络，由宏微微基站组成的两层HetNet和由宏微微和毫微微基站组成的三层HetNet的情况下，所提出的聚类模型下的最小面积功耗。毫微微基站的功率参数也来自[39]，即，并且我们还假设最大的毫微微基站的功率参数= 8 dB。我们观察到，随着宏层路径损耗指数的增加，所有情况下的面积功耗均下降，而且随着宏观层次的增加，的影响越来越小。这可以解释为：当宏层路径损耗指数增加时，干扰强度变小时，需要较少的协作基站来满足最小频谱效率要求; 另外，当层数增加时，更少的宏基站参与协作。

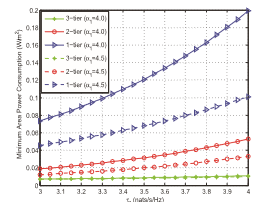


图6 传统的一层网络、由宏和微微基站组成的两层HetNet和由宏，微微和毫微微基站组成的三层HetNet（其中= 3.8，=3.5）

更重要的是，这个数据表明，与只有宏观的网络相比，微微和/或毫微微基站的额外部署显着地更节能。 特别是当我们将最小平均用户速率设置为3.5 nats / s / Hz时，当= 4.0和= 4.5时，双层HetNet的最小功耗可降低74.76％和71.78％ 分别。请注意，随着三层HetNet的部署，面积功耗将进一步下降。因此，它从节能角度验证了在所提出的聚类模型下部署HetNets的有效性。

图7显示最小面积功耗随最小频谱效率变化，其中我们假设衰落系数为.曲线“RSS聚类”代表所提出的聚类模型，曲线“几何聚类”代表几何聚类模型。可以看到，当信道增益增加或最小频谱效率降低时，最小面积功耗下降。

此外，所提出的聚类模型的最小面积功耗小于几何聚类模型的功耗。 特别是，当= 3.5 nats / s / Hz和= 1时，应用所提出的聚类模型可以减小最小面积功耗约21％。这个结果证明了所提出的的聚类模型的优点。直观地说，如果附近基站和用户之间的信道处于深阴影衰落中，则不能通过该链路可靠地发送信息。因此，这附近的基站很可能不会被视为服务基站。然而，几何聚类模型并没有考虑到阴影衰落的影响。

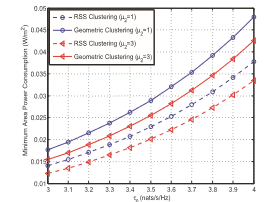


图7 建议的聚类模型下的最小面积功耗与满足且的几何聚类模型对比

**VI. 结论**

在本文中，我们考虑了下行链路HetNets中的基站协作，其中来自各个协作簇内的不同层的基站将相同的数据共同传输给典型的用户。提出了基于层级特定RSS阈值的以用户为中心的聚类模型。然后，我们推导出位于协作簇中心的用户的频谱效率表达式，从而可以评估网络吞吐量和能量效率。此外，我们制定了一个功率最小化问题的最小频谱效率约束，并推导出其近似解决方案，它被证明是高度准确的模拟。仿真结果表明，与传统的宏观网络相比，所提出的聚类模型相比几何聚类模型更节省能源，小型网格的额外部署显着增加了节能。请注意，我们尚未考虑以用户为中心的聚类模型中涉及的详细选择过程及其实现复杂性，并且仍然需要关于此主题的研究。

**附录**

**A 引理1的证明**

在不失一般性的情况下，我们考虑位于*x*中的第k层中的典型基站并且通过表示第*i*个用户的位置，则可以由下式给出：

(51)

其中1{·}是一个示性函数，(a)是由而得到并且。根据同质PPP [43]的平稳性，变量对于中的所有*x*具有相同的分布。因此，的平均值可写为

(52)

(a)遵循坎贝尔定理[43]。

**B.定理2的证明**

从(18)，我们得到

(53)

满足1-时不相等。注意，当变小时，(53)中的不等式变得更加严谨。

然后，通过将(53)代入(9)(令= 0)，我们可以给出频谱效率的近似下界：

(54)

在推导出最优第K层RSS阈值的下界之前，我们首先根据[45]引入下面的引理，

引理2：假设*p>0,q>0,*那么

(55)

其中C是欧拉常数

令,(54)可以简化为

(56)

其中，，(a)由(27)中的定义得到，(b)由得到,(d)满足(13)为了计算(c)的第一次积分并且引理2是为了计算(c)的二重积分。最后，由于约束条件是的严格单调递减函数，因此优化问题演变为求解方程式

(57)

令，我们得到：

(58)

**C.命题2的证明：**

令*y*=，从(35)可以看出

(59)

(60)

对*y*()求导，得到

(61)

(62)

由于是*y*的严格单调递增函数，而是的一个补充函数，当满足不等式(62)时，随增加。其次，当时，从(61)式可以得到

(63)

因此，当满足下式时，

(64)

同样，我们可以得出结论，当满足不等式(64)时，随减小。

最后，通过将(60)代入(62)和(64)，我们可以分别得到和。

**D.定理3的证明：**

首先，我们假设是一个有如下定义的函数

(65)

并且满足：

(66)

那么问题(39)可以转变为：

(67)

其中，

通过将它在上的导数设置为0，即，等价地

(68)

解上述等式，得到：

(69)

其中k=1,2,.考虑和的关系,可以得到：

(70)

将(70)代入(69)，结果为：

(71)

其中k=1,2,.根据(69)的结果，的最佳数值满足：

(72)

这意味着.根据[46]的结果，由于在定义域是一个完备函数，所以(71)中的最优值是问题(39)的解。而且，通过让(71)中的k = K，我们得到：

(73)

其中(a)从定理2中的(24)开始，则(71)对于所有的都成立，并且因此用作原始问题(22)的最优解。

**致谢**

作者要感谢审稿人的意见。

参考文献：略