

## 密集小蜂窝网络上行性能分析与导频调度

孙强<sup>①②</sup> 徐晨<sup>\*①</sup> 吴泳澎<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(南通大学电子信息学院 南通 226019)

<sup>②</sup>(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

<sup>③</sup>(慕尼黑工业大学通信工程学院 慕尼黑 D-80333)

**摘要:** 考虑导频资源受限的密集小蜂窝网络, 该文采用基于导频复用的最小均方误差估计进行信道估计, 推导出各种导频复用因子下采用最大比合并接收的上行可达速率表达式。由于严重的导频污染, 会制约密集小蜂窝网络的上行净可达和速率。为了最大化上行可达和速率, 提出利用大尺度衰落信道信息的贪婪导频调度算法减少导频污染, 在此基础上, 提出低复杂度半动态导频调度算法确定最佳导频复用因子。仿真结果验证了理论推导, 所提出的半动态导频调度算法能够减少导频开销, 有效地减轻导频污染并提升上行净可达和速率。

**关键词:** 密集小蜂窝网络; 导频调度; 最大比合并

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)11-2541-07

DOI: 10.11999/JEIT170161

## Uplink Performance Analysis and Pilot Scheduling for Dense Small-cell Networks

SUN Qiang<sup>①②</sup> XU Chen<sup>\*①</sup> WU Yongpeng<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(School of Electronic and Information Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

<sup>②</sup>(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

<sup>③</sup>(Institute for Communications Engineering, Technical University of Munich, Munich D-80333, Germany)

**Abstract:** Considering Dense Small-Cell Networks (DSCNs) with limited pilot resource, estimating channel is carried out using pilot-reused Minimum Mean Square Error (MMSE) estimator, and then exact expressions of the uplink achievable rate are derived with maximal ratio combining receiver for arbitrary pilot reuse factors. Severe pilot contamination will result in degrading the uplink net achievable sum rate. To maximize uplink achievable sum rate, a greedy pilot scheduling algorithm is proposed using large-scale fading channel information to reduce pilot contamination. On this basis, a low-complexity semi-dynamic pilot scheduling algorithm is proposed to determine best pilot reuse factor. Simulation results are presented to verify the theoretical derivation, and the proposed semi-dynamic pilot scheduling algorithm can reduce pilot overhead, mitigate pilot contamination and boost uplink net achievable sum rate.

**Key words:** Dense Small-Cell Networks (DSCNs); Pilot scheduling; Maximal Ratio Combining (MRC)

### 1 引言

密集小蜂窝网络(DSCNs)被认为是一种大幅提高系统的频谱效率和功率效率的有效技术<sup>[1]</sup>。与传统蜂窝网络相比, 密集小蜂窝网络通过密集布设低成本、低功耗小蜂窝基站, 可大幅缩短用户终端和发送节点之间的接入距离, 从而获得低传播损耗和高

空间复用增益。由于网络的密集化, 密集小蜂窝网络可以在同一频段允许同时服务更多的用户<sup>[2]</sup>。但是可用的正交导频资源通常是有限的, 不可能同时支持所有用户, 随着用户数的增加, 导频开销会随着用户数成比例增长, 这将限制整个系统的频谱效率。为了减少导频开销, 文献[3,4]采用非正交导频, 例如高斯随机序列或格拉斯曼子空间封装序列, 但非正交导频序列一般很难设计且复杂度高。为此, 通常还是选择更容易设计的导频复用技术。

导频复用的概念首次在大规模多输入多输出(MIMO)中提出<sup>[5]</sup>, 它主要的思想是不同用户在不同小区使用相同的导频资源进行信道估计, 这样可大幅节省导频开销。此时, 基站端对目标用户的上行

收稿日期: 2017-02-24; 改回日期: 2017-08-20; 网络出版: 2017-09-14

\*通信作者: 徐晨 xuchen@ntu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61501264), 东南大学国家移动通信重点实验室开放课题(2015D02)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61501264), The Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (2015D02)

信道估计被其他用户发送的非正交导频序列所干扰,从而引起导频污染,严重的污染问题甚至会影响整体系统性能<sup>[5,6]</sup>。为了抑制导频污染,目前在大规模 MIMO 系统下,文献[7]提出了时间偏移导频分配,通过把目标小区中的导频时隙对齐到相邻小区的数据时隙避免小区间导频相互重叠。文献[8]提出利用长时信道信息设计导频污染预编码,可有效地消除导频污染的影响。另外,贝尔实验室的 Yang 等人<sup>[9]</sup>提出静态导频复用方法,研究不同固定导频复用方案下在不同场景下的抑制导频污染的性能。但在密集小蜂窝网络中导频污染分析和导频调度设计却鲜有报道。

本文考虑时分双工(Time Division Duplex, TDD)上行密集小蜂窝网络,在信道估计阶段,用户间采用导频复用技术,将所有用户分成不同组,相同组的用户使用相同导频,不同组之间使用正交导频。在此场景,推导出不同的导频复用因子下最大比合并(Maximal Ratio Combining, MRC)接收下的遍历可达速率。为了减少导频污染,提出利用大尺度信道信息的贪婪导频调度算法。在此基础上,为了进一步减少导频开销,提出一种低复杂度的半动态导频调度算法,确定密集小蜂窝网络的最佳导频复用因子。通过计算机仿真,所提出的半动态导频调度算法不但减少导频开销,而且有效地抑制导频污染,提升了系统的频谱效率。

本文的结构如下:第2节,描述密集小蜂窝网络系统模型和基于导频复用下的最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)信道估计;第3节分析了不同导频复用因子下每用户上行可达速率;第4节提出利用大尺度衰落信道信息的导频调度算法;第5节分析不同场景下的仿真结果;第6节给出全文的总结。

## 2 系统模型

### 2.1 网络模型

考虑 TDD 上行传输<sup>1)</sup>的密集小蜂窝网络布设  $N$  个小蜂窝基站,每个小蜂窝基站配置  $M$  根接收天线。所有小蜂窝基站通过有限容量的回程链路与小区的中心处理单元相连。在相同频带可以同时服务  $K$  个单天线用户,每个用户只与一个小蜂窝基站通信。为了简化用户调度过程,假设不管小蜂窝基站的密

度,小区始终可以服务  $K$  个用户( $K < N$ )<sup>2)</sup>,每个用户随机分布在小区覆盖区域内,并且连接路径损耗最小的小蜂窝基站。同一频率资源服务的用户集合  $\mathcal{K} = \{UE_1, UE_2, \dots, UE_K\}$ ,则相应服务的小蜂窝基站集合为  $\mathcal{N} = \{SBS_1, SBS_2, \dots, SBS_K\}$ 。

如图 1 所示,密集小蜂窝网络采用 2 维的  $L$  层六边形网络结构,一共有  $N = 3L^2 + 3L + 1$  个小蜂窝基站组成。所有用户被分成  $\tau$  组,不同用户组之间分配不同的正交导频,而相同用户组使用相同导频,例如图 1 所示,用户组 1 中的用户使用导频 1,而用户组 2 中的用户使用导频 2。 $\varphi_i^H$  表示第  $i$  组用户使用的导频且  $\varphi_i^H \varphi_j = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}, T = \{1, 2, \dots, T\}$  为

正交导频序号集合。令  $\mathcal{U}_i$  表示为使用导频序列  $\varphi_i$  的用户集合,若  $\mathcal{U}_i = \emptyset$ ,则说明没有用户使用导频序列  $\varphi_i$ 。 $UE_{i_k}$  表示用户组  $i$  中的第  $k$  个用户。整个拓扑网络的形状可以近似为一个半径为  $R$  的圆,每个小蜂窝基站位于六边形区域的中心,第  $n$  个小蜂窝基站的极坐标为  $(D_n, \vartheta_n)$ ,  $n \in \mathcal{N}$ ,假设用户在小区内是独立均匀分布的,第  $i$  组的第  $k$  个用户的极坐标为  $(r_{i_k}, \theta_{i_k})$ ,  $i_k \in \mathcal{K}$ 。

用户  $UE_{i_k}$  与小蜂窝基站  $SBS_n$  之间的信道矢量  $\mathbf{h}_{ni_k}$  可以建模为

$$\mathbf{h}_{ni_k} = \sqrt{\beta_{ni_k}} \mathbf{g}_{ni_k} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{g}_{ni_k}$  表示用户  $UE_{i_k}$  与  $SBS_n$  之间快衰落信道矢量,其各元素是均值为零、方差为 1 的独立同分布复高斯随机变量。 $\beta_{ni_k} = d_{ni_k}^{-\eta}$  表示用户  $UE_{i_k}$  与小蜂

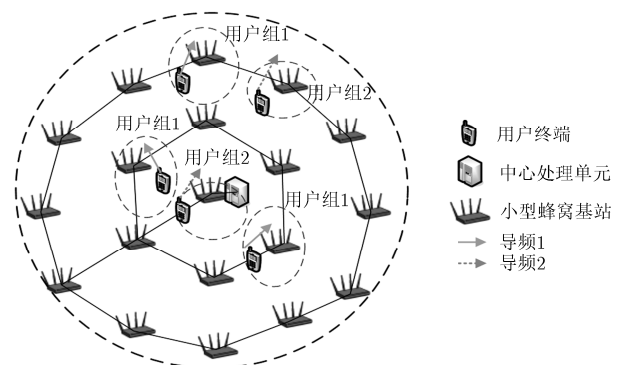


图1 密集小蜂窝网络系统模型

<sup>1)</sup>本文主要考虑密集小蜂窝网络上行信道估计与上行传输。在 TDD 模式下,上行信道估计获取的信道状态信息,同样可用于下行传输。

<sup>2)</sup>现有文献针对密集小蜂窝网络  $K < N$  的场景展开研究<sup>[1,2,10]</sup>。当  $K > N$  时,需要增加用户调度算法,将  $K > N$  划分成若干个  $K < N$  的场景,通过不同的时频资源来服务所有用户,那么本文的分析和所提算法都可以推广。

窝基站  $SBS_n$  之间的大尺度衰落参数, 其中  $d_{ni_k}$  表示用户  $UE_{i_k}$  与小蜂窝基站  $SBS_n$  之间距离, 可以计算为

$$d_{ni_k} = \sqrt{r_{i_k}^2 + D_n^2 - 2r_{i_k} D_n \cos(\theta_{i_k} - \vartheta_n)} \quad (2)$$

## 2.2 信号模型

考虑上行传输, 则第  $n$  个小蜂窝基站接收到的信号矢量为

$$\mathbf{y}_n = \sqrt{p_u} \sum_{i=1}^{\tau} \sum_{k=1}^{|\mathcal{U}_i|} \mathbf{h}_{ni_k} x_{i_k} + \mathbf{n}_n \quad (3)$$

其中,  $x_{i_k}$  表示用户  $UE_{i_k}$  发送的信号。  $p_u$  是每个用户平均发送功率。  $\mathbf{n}_n \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  是高斯白噪声矢量, 它的分布是  $\mathbf{n}_n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_M)$ 。

小蜂窝基站  $SBS_n$  采用 MRC 去接收来自用户  $UE_{i_k}$  的信号, 通过乘以 MRC 矢量  $\mathbf{w}_{nt_k}^H$  可以得到

$$\begin{aligned} r_{nt_k} = & \underbrace{\sqrt{p_u} \mathbf{w}_{nt_k}^H \mathbf{h}_{nt_k} x_{t_k}}_{\text{理想信号}} + \underbrace{\sqrt{p_u} \sum_{j=1, j \neq k}^{|\mathcal{U}_i|} \mathbf{w}_{nt_k}^H \mathbf{h}_{nt_j} x_{t_j}}_{\text{来自相同用户集合的干扰}} \\ & + \underbrace{\sqrt{p_u} \sum_{i \neq t}^{\tau} \sum_{l=1}^{|\mathcal{U}_i|} \mathbf{w}_{nt_k}^H \mathbf{h}_{ni_l} x_{i_l}}_{\text{来自其他用户集合的干扰}} + \underbrace{\mathbf{w}_{nt_k}^H \mathbf{n}_n}_{\text{等效噪声}} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, 式(4)右边第 1 项是来自于用户  $UE_{i_k}$  的理想信号; 第 2 项来自于第  $t$  组用户集合中其他用户的干扰, 他们都使用相同的导频  $\varphi_t$ ; 剩余项依次表示来自其他用户集合的干扰以及等效噪声。

## 2.3 基于导频复用的信道估计

由于信道的相干时间受限, 所以可用的导频数  $\tau$  是有限的。另一方面, 在密集小蜂窝网络中期望能够支持服务的用户数  $K$  是很大的。由于  $K > \tau$ , 所以必须采用导频复用才能支持服务更多的用户。接下来, 我们描述基于导频复用的信道估计, 以及当信道估计用于上行数据接收时的接收 SINR。

每个相干时间块  $T$  被分为上行训练和数据传输两个阶段<sup>[11]</sup>。在上行训练阶段, 所有用户发送各自分配的导频信号, 则  $SBS_n$  接收到的信号为

$$\mathbf{Y}_n = \sum_{i=1}^{\tau} \sum_{q=1}^{|\mathcal{U}_i|} \mathbf{h}_{ni_q} \varphi_i^H + \frac{1}{\sqrt{\rho_p}} \mathbf{N}_n \quad (5)$$

其中,  $\rho_p$  是上行链路发送导频所需的平均发送功率, 即  $\rho_p = \tau p_u$ ,  $\mathbf{N}_n$  是复高斯白噪声矩阵。为了估计信道矢量  $\mathbf{h}_{nt_k}$ ,  $\mathbf{Y}_n$  被映射到  $\varphi_t$ , 得到  $\mathbf{y}_{nt} = \sum_{q=1}^{|\mathcal{U}_t|} \mathbf{h}_{nt_q} + \mathbf{n}_{nt} / \sqrt{\rho_p}$ 。

$\mathbf{h}_{nt_k}$  的 MMSE 估计结果为<sup>[12]</sup>

$$\hat{\mathbf{h}}_{nt_k} = \beta_{nt_k} \left( \sum_{q=1}^{|\mathcal{U}_t|} \beta_{nt_q} + \frac{\sigma^2}{\rho_p} \right)^{-1} \mathbf{y}_{nt} \quad (6)$$

由于采用线性 MMSE<sup>[13]</sup>, 信道估计  $\hat{\mathbf{h}}_{nt_k}$  与估计误差  $\tilde{\mathbf{h}}_{nt_k}$  是相互独立的。因此  $\mathbf{h}_{nt_k}$  可以分解成为

$$\mathbf{h}_{nt_k} = \hat{\mathbf{h}}_{nt_k} + \tilde{\mathbf{h}}_{nt_k} \quad (7)$$

其中,  $\hat{\mathbf{h}}_{nt_k} \sim \mathcal{CN}(0, \bar{\beta}_{nt_k} \mathbf{I}_M)$ ,  $\tilde{\mathbf{h}}_{nt_k} \sim \mathcal{CN}(0, \mathbf{I}_M (\beta_{nt_k} - \bar{\beta}_{nt_k}))$ ,  $\bar{\beta}_{nt_k} = \beta_{nt_k}^2 / \left( \sum_{q=1}^{|\mathcal{U}_t|} \beta_{nt_q} + \sigma^2 \rho_p^{-1} \right)$ 。从式(6)可以发现相同用户组的不同用户的信道估计存在如式(8)的关系:

$$\hat{\mathbf{h}}_{nt_q} = \frac{\beta_{nt_q}}{\beta_{nt_k}} \hat{\mathbf{h}}_{nt_k} \quad (8)$$

小蜂窝基站  $SBS_n$  在获取  $\hat{\mathbf{h}}_{nt_k}$  后, 假设归一化 MRC 矢量  $\|\mathbf{w}_{nt_k}\|^2 = 1$ , 则  $UE_{i_k}$  的上行接收信干噪比 (SINR) 为

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{nt_k} = & p_u \left| \mathbf{w}_{nt_k}^H \hat{\mathbf{h}}_{nt_k} \right|^2 \left/ \left\{ p_u \sum_{j=1, j \neq k}^{|\mathcal{U}_i|} \left| \mathbf{w}_{nt_k}^H \hat{\mathbf{h}}_{nt_j} \right|^2 \right. \right. \\ & \left. \left. + p_u \sum_{i \neq t}^{\tau} \sum_{l=1}^{|\mathcal{U}_i|} \left| \mathbf{w}_{nt_k}^H \hat{\mathbf{h}}_{ni_l} \right|^2 + p_u \varepsilon_{\tilde{\mathbf{h}}} + \sigma^2 \right\} \right. \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)的分子部分表示有用信号功率, 分母的第 1 项表示组内干扰功率, 第 2 项表示组间干扰功率,

$\varepsilon_{\tilde{\mathbf{h}}} = \sum_{i=1}^{\tau} \sum_{l=1}^{|\mathcal{U}_i|} \beta_{ni_l} \left( 1 - \beta_{ni_l} \left( \sum_{q=1}^{|\mathcal{U}_i|} \beta_{ni_q} + \sigma^2 \rho_p^{-1} \right)^{-1} \right)$  表示小蜂窝基站  $SBS_n$  对各组用户信道估计误差之和。

其相应的上行遍历可达速率为

$$R_{nt_k} = \mathbb{E} \left[ \log_2 (1 + \text{SINR}_{nt_k}) \right] \quad (10)$$

## 3 上行每用户可达速率分析

采用 MRC 接收, 将式(8)和  $\mathbf{w}_{nt_k} = \hat{\mathbf{h}}_{nt_k} / \|\hat{\mathbf{h}}_{nt_k}\|$  代入到式(9), 则  $UE_{i_k}$  的上行 SINR 为

$$\gamma_{nt_k} = \frac{p_u X_{nt_k}}{p_u \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq k}}^{|\mathcal{U}_i|} \left( \frac{\beta_{nt_j}}{\beta_{nt_k}} \right)^2 X_{nt_k} + p_u Y_n + p_u \varepsilon_{\tilde{\mathbf{h}}} + \sigma^2} \quad (11)$$

其中,  $X_{nt_k} \triangleq \|\hat{\mathbf{h}}_{nt_k}\|^2$ ,  $Y_n \triangleq \sum_{i \neq t}^{\tau} \sum_{l=1}^{|\mathcal{U}_i|} \left| \hat{\mathbf{h}}_{ni_l}^H \hat{\mathbf{h}}_{ni_l} \right|^2 / \|\hat{\mathbf{h}}_{nt_k}\|^2$ 。

此时, 由于  $\hat{\mathbf{h}}_{nt_k}$  中的各元素独立且都服从均值为 0, 方差为  $\bar{\beta}_{nt_k}$  的正态分布, 因此  $X_{nt_k}$  服从伽玛分布

Gamma( $M, \bar{\beta}_{nt_k}$ ), 其概率密度函数为

$$p_X(x) = \frac{e^{-x/\bar{\beta}_{nt_k}} x^{M-1}}{(M-1)! \bar{\beta}_{nt_k}^M}, \quad x \geq 0 \quad (12)$$

其中,  $M$  为小蜂窝基站配置的天线数。另外, 式(11)中分母的第 2 项可以写成

$$Y_n = \sum_{i \neq t} \sum_{l=1}^{|\mathcal{U}_i|} \left( \frac{\beta_{ni_l}}{\beta_{ni_t}} \right)^2 \frac{|\hat{\mathbf{h}}_{nt_k}^H \hat{\mathbf{h}}_{ni_l}|^2}{\|\hat{\mathbf{h}}_{nt_k}\|^2} = \sum_{i \neq t} |Z_i|^2 \quad (13)$$

在给定条件  $\hat{\mathbf{h}}_{nt_k}$  下,  $Z_i$  是一个均值为零, 协方差为  $\frac{\sum_{l=1}^{|\mathcal{U}_i|} \beta_{ni_l}^2}{\left( \sum_{l=1}^{|\mathcal{U}_i|} \beta_{ni_l} + \frac{\sigma^2}{\rho_p} \right)}$  的复高斯变量, 并且独立于  $\hat{\mathbf{h}}_{nt_k}$ 。因此,  $Y_n$  为  $\tau-1$  个独立且不同分布的指数随机变量之和, 其概率密度函数为

$$p_Y(y) = \sum_{m=1}^{s(\mathcal{A}_n)} \sum_{v=1}^{\tau_m(\mathcal{A}_n)} \mathcal{X}_{m,v}(\mathcal{A}_n) \frac{\mu_{n,m}^{-v}}{(v-1)!} y^{v-1} e^{-y/\mu_{n,m}}, \quad y \geq 0 \quad (14)$$

其中,  $\mathcal{A}_n \triangleq \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_{n-1}, g_{n+1}, \dots, g_\tau)$ ,  $g_i = \frac{\sum_{l=1}^{|\mathcal{U}_i|} \beta_{ni_l}^2}{\left( \sum_{l=1}^{|\mathcal{U}_i|} \beta_{ni_l} + \frac{\sigma^2}{\rho_p} \right)}$ ,  $s(\mathcal{A}_n)$  表示  $\mathcal{A}_n$  中不同对角线元素的数目,  $\mu_{n,1} > \mu_{n,2} > \dots > \mu_{n,s(\mathcal{A}_n)}$  表示不同对角线元素按照从大到小次序排列,  $\tau_m(\mathcal{A}_n)$  表示  $\mu_{n,m}$  的重数,  $\mathcal{X}_{m,v}(\mathcal{A}_n)$  表示  $\mathcal{A}_n$  中第  $(m,v)$  项特征系数<sup>[4]</sup>。

利用上述已知的概率密度函数式(13)和式(14), 可得到定理 1 关于上行每用户遍历可达速率的精确解。

**定理 1** 考虑导频复用下的密集小蜂窝网络, UE <sub>$t_k$</sub>  到 SBS <sub>$n$</sub>  上行遍历可达速率为

$$R_{nt_k} = F(\delta_{nt_k}, \phi) - F(\xi_{nt_k}, \phi) \quad (15)$$

其中,

$$F(a, b) = \log_2 e \sum_{m=1}^{\tau-1} \sum_{p=0}^{M-1} \frac{\prod_{v=1, v \neq m}^{\tau-1} (1 - \mu_{n,v}/\mu_{n,m})^{-1}}{(M-1-p)! \mu_{n,m}} \cdot \left[ (-1)^{M-2-p} e^{\frac{1}{a\bar{\beta}_{nt_k}}} \mathcal{I}_{0, M-1-p} \left( \frac{b}{a\bar{\beta}_{nt_k}}, \frac{1}{a\bar{\beta}_{nt_k}}, \frac{1}{\mu_{n,m}} - \frac{b}{a\bar{\beta}_{nt_k}} \right) + \sum_{k=1}^{M-1-p} \frac{(k-1)!}{(-a\bar{\beta}_{nt_k})^{M-1-p-k}} e^{\frac{1}{b\mu_{n,m}}} \cdot (b\mu_{n,m})^{M-p-k} \Gamma \left( M-p-k, \frac{1}{b\mu_{n,m}} \right) \right] \quad (16)$$

$$\mathcal{I}_{0,l}(c, d, \alpha) = \left[ \sum_{q=0}^{l-1} \frac{l!}{(l-q)! (\alpha/c)^q} \left( \frac{1}{\alpha} d^{l-q} \text{Ei}(-d) + \frac{e^{-d}}{\alpha} \sum_{k=0}^{l-q-1} \frac{(l-q-1)! d^k}{k! (\alpha/c+1)^{l-q-k}} \right) + \frac{l! c^l}{\alpha^{n+1}} \left( \text{Ei}(-d) - e^{\frac{\alpha d}{c}} \text{Ei}(-(1+\alpha/c)d) \right) \right] \quad (17)$$

$$\text{且 } \delta_{nt_k} = \frac{p_u \sum_{j=1}^{|\mathcal{U}_i|} \left( \frac{\beta_{nt_j}}{\beta_{nt_k}} \right)^2}{p_u \varepsilon_{\bar{h}} + \sigma^2}, \quad \xi_{nt_k} = \frac{p_u \sum_{j=1, j \neq k}^{|\mathcal{U}_i|} \left( \frac{\beta_{nt_j}}{\beta_{nt_k}} \right)^2}{p_u \varepsilon_{\bar{h}} + \sigma^2}, \quad \phi = \frac{p_u}{p_u \varepsilon_{\bar{h}} + \sigma^2}.$$

Ei( $\cdot$ ) 是指数积分函数,  $\Gamma(\cdot)$  是伽玛函数。

证明略。

定理 1 提供了密集小蜂窝网络在导频复用因子  $\tau \neq 1$  的上行每用户遍历可达速率。当  $\tau = 1$ , 即所有用户只使用同一导频, 可以简化式(15)和式(16)得到推论 1。

**推论 1** 当导频复用因子  $\tau$  为 1 时, UE <sub>$k$</sub>  到 SBS <sub>$n$</sub>  上行 MRC 接收的遍历可达速率为

$$R_{nk} = F(\delta_{nk}) - F(\xi_{nk}) \quad (18)$$

其中

$$F(a) = \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\log_2 e}{(M-1-m)!} \left[ \frac{(-1)^{M-m-2}}{(a\bar{\beta}_{nk})^{M-1-m}} e^{1/a\bar{\beta}_{nk}} \cdot \text{Ei} \left( -\frac{1}{a\bar{\beta}_{nk}} \right) + \sum_{k=1}^{M-1-m} \frac{(k-1)!}{(-a\bar{\beta}_{nk})^{M-1-m-k}} \right] \quad (19)$$

$$\text{且 } \bar{\beta}_{nk} = \beta_{nk}^2 / \left( \sum_{q=1}^{|\mathcal{U}_i|} \beta_{nq} + \frac{\sigma^2}{\rho_r} \right), \quad \delta_{nk} = p_u \sum_{q=1}^{|\mathcal{U}_i|} \left( \frac{\beta_{nj}}{\beta_{nk}} \right)^2 / (p_u \varepsilon_{\bar{h}} + \sigma^2), \quad \xi_{nk} = p_u \sum_{j=1, j \neq k}^{|\mathcal{U}_i|} \left( \frac{\beta_{nj}}{\beta_{nk}} \right)^2 / (p_u \varepsilon_{\bar{h}} + \sigma^2).$$

证明略。

推论 1 给出所有用户都使用同一导频时 UE <sub>$k$</sub>  到 SBS <sub>$n$</sub>  上行 MRC 接收的遍历可达速率表达式, 此时只有导频污染所引起的干扰, 当用户之间的相互距离较远时, 则采用导频复用因子  $\tau$  为 1 是完全可行的。定理 1 和推论 1 得到的上行遍历可达速率与用户的大尺度衰落信道信息(长时信道状态信息)有关, 而大尺度衰落信道信息在一定时间内相对于小尺度衰落信道信息(短时信道状态信息)是保持不变的。一般而言, 大尺度衰落至少在 40 个小尺度衰落

相干时间的间隔内保持不变<sup>[15]</sup>。因此如何利用大尺度衰落信道信息设计导频调度算法，减少导频污染从而提高上行可达速率值得深入研究。

#### 4 导频调度算法

在密集小蜂窝网络中，由于服务的用户数远大于导频数，因此需要复用导频来支持更多的服务用户。但导频复用必然会带来导频污染，导频污染会造成信道估计误差，严重制约密集小蜂窝网络的上行可达速率。而传统的随机导频调度算法给每个服务用户从预先设定的导频码本中随机分配一个导频序列，但是距离相近的用户可能被分配到相同导频将会造成严重的导频污染。另外静态导频复用方案(类似于多色频分复用方案<sup>[9]</sup>)也存在一定的局限性：导频复用因子小，不能充分利用用户空间位置的差异性来减少导频污染；导频复用因子大，会造成导频开销大，从而制约系统净可达和速率。因此本节根据各用户信道的空间位置差异，在小区中空间位置相距较远的用户复用相同的导频，进行上行导频信道参数估计。随着系统参数变化，即用户数的增减，用户移动位置的更新，以及不同的应用场景，利用大尺度衰落信道信息实施半动态导频调度。

在给定导频复用因子  $\tau$ ，通过导频调度最大化系统遍历可达和速率，该问题可以描述成如式(20)的优化问题：

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathcal{U}_i, i \in T} \sum_{i=1}^{\tau} R(\mathcal{U}_i) \\ & \text{s.t. } \mathcal{U}_i \cap \mathcal{U}_j = \emptyset, i \neq j \\ & \mathcal{K} = \mathcal{U}_1 \cup \mathcal{U}_2 \dots \cup \mathcal{U}_{\tau} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

其中，

$$R(\mathcal{U}_i) = \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{i_k \in \mathcal{U}_i} \lambda_{ni_k} R_{ni_k} \delta_{ni_k} \quad (21)$$

并且  $\delta_{ni_k} = \begin{cases} 1, & \beta_{ni_k} = \max \{ \beta_{mt_k}, m \in \mathcal{N} \} \\ 0, & \beta_{ni_k} \neq \max \{ \beta_{mt_k}, m \in \mathcal{N} \} \end{cases}$  表示当用户

接入最近的小蜂窝基站时，则  $\delta_{ni_k} = 1$ ，当用户接入其他小蜂窝基站时，则  $\delta_{ni_k} = 0$ 。 $\lambda_{ni_k}$  是调度周期内  $UE_{i_k}$  分配到第  $i$  组的优先级加权系数。为了保证调度的公平性，不同的用户可以根据用户的信道信息和优先级等设置不同的加权系数<sup>[16]</sup>。本文只考虑所有用户的加权系数都是 1，那么该导频调度就变成了最大遍历可达和速率调度。

上述问题是一个组合优化问题，最优解可以通过穷举法获得，但却带来指数级的复杂度，在实际应用中不可能实施。为此，本文提出一种利用大尺

度衰落信道信息的贪婪导频调度算法来获得次优解，其具体步骤见算法 1 所示。

**算法 1 利用大尺度衰落信道信息的贪婪导频调度算法。**

步骤 1 初始化用户集合  $\mathcal{K} = \{UE_1, UE_2, \dots, UE_K\}$ ，初始化用户分组  $\mathcal{U}_l = \emptyset, l = 1, 2, \dots, \tau$ ；

步骤 2 各用户间歇地发送上行探测信号，小蜂窝基站根据接收到的探测信号估计各用户的大尺度衰落信道信息，并发送到中心处理单元。

步骤 3 中心处理单元选出当前导频复用因子  $\tau$ ，使得上行可达和速率最大，每个用户得到分配的导频，直到所有用户都分配到最佳导频。

while( $\mathcal{K} \neq \emptyset$ )

$$(\mathcal{U}_{k^*}, l^*) = \max_{l \in \{1, 2, \dots, \tau\}} \left\{ R(\mathcal{U}_l \cup \{UE_k\}) + \sum_{j=1}^{\tau} R(\mathcal{U}_j) \right\}$$

$$\mathcal{U}_{l^*} \leftarrow \mathcal{U}_{l^*} \cup \{UE_{k^*}\}, \mathcal{K} \leftarrow \mathcal{K} \setminus \{UE_{k^*}\}$$

end

为了进一步减少导频开销(导频开销就是由  $\tau$  来衡量)，通过导频调度最大化系统净和速率，该问题可以描述成如式(22)的优化问题：

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\tau \in T} \left( \frac{T - \tau}{T} \right) \sum_{i=1}^{\tau} R(\mathcal{U}_i) \\ & \text{s.t. } \mathcal{U}_i \cap \mathcal{U}_j = \emptyset, i \neq j \\ & \mathcal{K} = \mathcal{U}_1 \cup \mathcal{U}_2 \dots \cup \mathcal{U}_{\tau} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

该问题同样是一个组合优化问题，可以在算法 1 的基础上，提出一种利用大尺度衰落信道信息的半动态导频调度算法求解。在导频资源受限条件下，通过比较不同导频复用因子下的净和速率，从而选出最佳导频复用因子，其具体步骤见算法 2 所示。

**算法 2 利用大尺度衰落信道信息的半动态导频调度算法。**

步骤 1 初始化用户集合  $\mathcal{K} = \{UE_1, UE_2, \dots, UE_K\}$ ；

步骤 2 在每个调度周期开始，各用户间歇地发送上行探测信号，小蜂窝基站根据接收到的探测信号估计各用户的大尺度衰落信道信息，并发送到中心处理单元；

步骤 3 按照导频复用因子  $\tau$  为 1，中心处理单元计算上行可达和速率；

步骤 4  $\tau = \tau + 1$ ，初始化用户分组  $\mathcal{U}_l = \emptyset, l = 1, 2, \dots, \tau$ ；

步骤 5 选出当前导频复用因子  $\tau$  下，使得上

行可达和速率最大, 每个用户得到分配的导频, 直到所有用户都分配到最佳导频;

步骤 6 选择上行净和速率最大的导频复用因子, 若导频复用因子  $\tau$  的上行净和速率高于导频复用因子  $\tau-1$  的上行净和速率, 则转步骤3, 若导频复用因子  $\tau$  的上行净和速率低于导频复用因子  $\tau-1$  的上行净和速率, 则结束该周期的导频调度, 转步骤2。

正如后面仿真验证所示, 所提出的算法性能能够接近最优解, 而且算法复杂度可以显著减少。在给定导频复用因子  $\tau > 1$ , 求解优化问题式(20), 采用穷举法需要搜索  $A_\tau/\tau!$  种组合, 其中  $A_\tau = \tau^K - \sum_{i=1}^{\tau-1} C_\tau^i A_i$ , 而算法 1 只需要  $K(K+1)\tau/2$  种组合。为了选择最佳导频复用方案使得净和速率最大, 求解优化问题式(22), 采用穷举法需要搜索  $\sum_{t=1}^{\tau} A_t/t!$  种组合, 而算法 2 只需要  $1 + \sum_{t=2}^{\tau} K(K+1)t/2$  种组合。

## 5 仿真结果

本节验证推导得出的上行每用户遍历速率表达式, 然后通过蒙特卡罗仿真比较了随机导频分配、静态导频分配、穷举法和所提导频调度算法的性能。在仿真中使用式(1)建立了信道模型, 设置路径损耗因子  $\eta = 3.5$ , 噪声功率设置为  $-107$  dBm, 而发送功率设置为  $-5 \sim 15$  dBm, 每个小蜂窝基站配置4根天线。假设每个用户采用等功率发送, 另外整个密集小蜂窝网络半径为  $R = 1600$  m, 用户数  $K = 10$ 。

图2给出上行密集小蜂窝网络采用静态导频复用方案, 在不同导频复用因子和不同发送功率下的遍历可达和速率比较。从图中可以看出, 所推导的遍历速率表达式的数值结果与蒙特卡洛仿真结果完全一致。随着小蜂窝网络层数  $L$  和导频复用因子  $\tau$  的增加, 系统和速率得以提升。

图3在给定导频复用因子, 不同导频调度方案随不同用户发送功率的遍历可达和速率对比。显然, 算法1可以接近穷举法所能实现的最优性能, 但复杂度却大幅减少。如表1所示, 随着导频复用因子增加, 当  $\tau = 3$ , 算法1的复杂度只有穷举法复杂度的1.8%。与随机导频调度方案和静态导频复用方案相比, 算法1更能减轻导频污染, 获得更高的上行可达和速率。

图4给出密集小蜂窝网络在不同相干时间下系统净和速率以及最佳导频复用因子<sup>3)</sup>, 其中用户的发

<sup>3)</sup>最佳导频复用因子与整个网络中小蜂窝的密度, 用户数, 小蜂窝基站与用户的分布, 相干时间, 用户发送信号的功率等因素有关。

表 1 固定导频复用因子下不同算法的复杂度对比(种)

	$K = 10,$ $\tau = 2$	$K = 10,$ $\tau = 3$	$K = 10,$ $\tau = 4$	$K = 10,$ $\tau = 5$
穷举法	511	9330	34105	42525
算法 1	110	165	220	275

送功率是 0 dBm, 密集小蜂窝网络的层数  $L$  分别为 2 和 3。当  $T = 14$  个小尺度衰落相干时间时,  $L = 2$  时最佳导频复用因子  $\tau'$  为 2。而  $L = 3$  时, 最佳导频复用因子  $\tau'$  为 1。当  $T = 28$  个小尺度衰落相干时间,  $L = 2$  时最佳导频复用因子  $\tau'$  为 3, 而  $L = 3$  时, 最佳导频复用因子  $\tau'$  为 2。在此场景下, 导频开销对系统净和速率大小起着主导作用。随着网络中小蜂窝密度增加, 所需的最佳导频复用因子也越少, 获得净和速率越大。表 2 表示采用穷举法和算法 2 确定最佳导频复用因子的复杂度对比。当最佳导频复用因子  $\tau'$  为 3 时, 算法 2 所需的复杂度只有穷举法复杂度的 1.1%。

结合图 3 和图 4, 当密集小蜂窝网络的层数  $L = 3$ ,  $T = 14$  且  $p_u = 0$  dBm, 导频复用因子为 3 时, 随机导频调度算法、静态导频复用算法和算法 1 的系统净和速率分别为 48.3 bit/(s·Hz), 49.5 bit/(s·Hz) 和 51.4 bit/(s·Hz)。而采用算法 2 可确定最佳导频复用因子为 1, 则系统净和速率为 54.5 bps/Hz, 比随机导频调度算法、静态导频复用算法和算法 1 的系统净和速率分别增长 13%, 10% 和 6%, 此时导频开销减少为原来的 1/3。

## 6 结束语

在导频资源受限的密集小蜂窝网络上行信道训练阶段, 采用基于导频复用的信道估计方法; 数据传输阶段采用最大比合并接收方式, 推导出任意导频复用因子下上行每用户遍历可达速率。为了减少导频污染, 提出了利用大尺度衰落信道信息的贪婪导频调度算法。在此基础上, 为了进一步减少导频开销, 提出一种低复杂度的半动态导频调度算法。仿真结果表明所提出的导频调度算法可以近似达到最优解, 而且算法复杂度能够显著减少。

表 2 确定最佳导频复用因子的复杂度对比(种)

	$K = 10,$ $\tau' = 1$	$K = 10,$ $\tau' = 2$	$K = 10,$ $\tau' = 2$
穷举法	512	9842	43947
算法 2	111	276	496

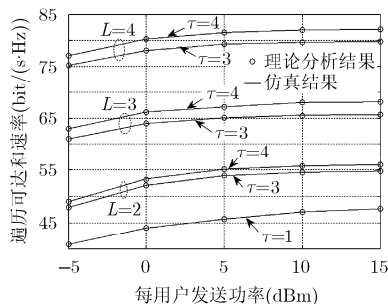


图 2 遍历速率的分析结果与蒙特卡洛仿真结果对比

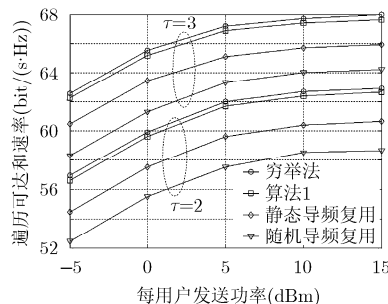


图 3 不同每用户发送功率下的遍历可达和速率 ( $L = 3$ )

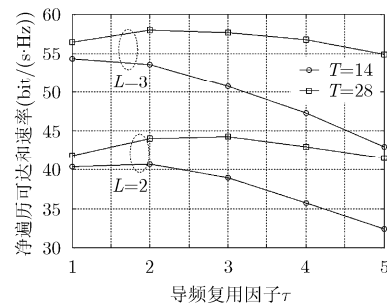


图 4 算法 2 确定最佳导频复用因子 ( $p_u = 0$  dBm)

## 参考文献

- [1] LÓPEZ-PÉREZ D, DING M, CLAUSSEN H, *et al.* Towards 1 Gbps/UE in cellular systems: Understanding ultra-dense small cell deployments[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 2078–2101. doi: 10.1109/COMST.2015.2439636.
  - [2] KAMELI M, HAMOUDA W, and YOUSSEF A. Ultra-dense networks: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(4): 2522–2545. doi: 10.1109/COMST.2016.2571730.
  - [3] SHEN J C, ZHANG J, and LETAIEF K B. Downlink user capacity of massive MIMO under pilot contamination[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(6): 3183–3193. doi: 10.1109/TWC.2015.2403317.
  - [4] CHOI J, LOVE D J, and BIDIGARE P. Downlink training techniques for FDD massive MIMO systems: Open-loop and closed-loop training with memory[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2014, 8(5): 802–814. doi: 10.1109/JSTSP.2014.2313020.
  - [5] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(11): 3590–3600. doi: 10.1109/TWC.2010.092810.091092.
  - [6] 胡莹, 黄永明, 俞菲, 等. 多用户大规模MIMO 系统能效资源分配算法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(9): 2198–2203. doi: 10.11999/JEIT150088.  
HU Ying, HUANG Yongming, YU Fei, *et al.* Energy-efficient resource allocation based on multi-user massive MIMO system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(9): 2198–2203. doi: 10.11999/JEIT150088.
  - [7] FEMANDES F, ASHIKHMIN A, and MARZETTA T L. Inter-cell interference in noncooperative TDD large scale antenna systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(2): 192–201. doi: 10.1109/JSAC.2013.130208.
  - [8] ASHIKHMIN A and MARZETTA T. Pilot contamination precoding in multi-cell large scale antenna systems[C]. *IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT)*, Cambridge, MA, 2012: 1137–1141. doi: 10.1109/ISIT.2012.6283031.
  - [9] YANG H and MARZETTA T L. Performance of pilot reuse in multi-cell massive MIMO[C]. *IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (Black SeaCom)*, Constanta, 2015: 157–161. doi: 10.1109/BlackSeaCom.2015.7185106.
  - [10] NGO H Q, ASHIKHMIN A, YANG H, *et al.* Cell-free massive MIMO versus small cells[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(3): 1834–1850. doi: 10.1109/TWC.2017.2655515.
  - [11] NGUYEN V D and SHIN O S. Performance analysis of ZF receivers with imperfect CSI for uplink massive MIMO systems[J]. *Telecommunication Systems*, 2016, 65(2): 1–12. doi: 10.1007/s11235-016-0225-8.
  - [12] PAPAFAFEIROPOULOS A, NGO H, and RATNARAJAH T. Performance of massive MIMO uplink with zero-forcing receivers under delayed channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(4): 3158–3169. doi: 10.1109/TVT.2016.2594031.
  - [13] KAILATH T, SAVED A H, and HASSIBI B. *Linear Estimation*[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000: 23–112.
  - [14] SHIN H and WIN M Z. MIMO diversity in the presence of double scattering[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(7): 2976–2996. doi: 10.1109/TIT.2008.924672.
  - [15] ASHIKHMIN A, MARZETTA T L, and LI L. Interference reduction in multi-cell massive MIMO systems I: Large-scale fading precoding and decoding[OL]. <http://arxiv.org/abs/1411.4182>, 2014.
  - [16] SUN Q, JIN S, WANG J, *et al.* Downlink massive distributed antenna systems scheduling[J]. *IET Communications*, 2015, 9(7): 1006–1016. doi: 10.1049/IET-COM.2014.0775.
- 孙 强: 男, 1980 年生, 副教授, 研究方向密集分布式无线网络。  
徐 晨: 男, 1960 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向宽带无线通信。  
吴泳澎: 男, 1986 年生, 高级研究员, 研究方向 MIMO 无线通信。