

超密集网络导频复用干扰避免策略

黄杰¹, 杨凡¹, 高乙文², 张博为³

(1. 重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054; 2. 中国移动通信集团重庆有限公司, 重庆 400044;
3. 国家电网重庆电力公司信息通信分公司, 重庆 400012)

摘 要: 针对超密集网络中导频复用将产生同一导频的复用干扰, 严重影响信道估计的准确性, 提出了一种超密集网络导频复用干扰避免策略。通过建立超密集网络子载波的干扰模型, 推导子载波的干扰概率, 并采用压缩感知理论建立超密集网络非均匀导频位置优化模型, 据此提出了超密集网络导频复用干扰避免策略。仿真结果表明, 与传统信道估计算法相比, 所提策略增加了导频复用干扰避免策略的信道估计, 能有效避免导频复用产生的干扰, 保证信道估计的准确性。

关键词: 超密集网络; 导频复用; 干扰避免; 信道估计

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020120

Interference avoidance strategy for ultra dense network with pilot reuse

HUANG Jie¹, YANG Fan¹, GAO Yiwen², ZHANG Bowei³

1. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

2. China Mobile Group Chongqing Co., Ltd., Chongqing 400044, China

3. State Grid Chongqing Information and Telecommunication Company, Chongqing 400012, China

Abstract: In the ultra dense network (UDN), the pilot reuse scheme would produce significant interference, which will affect the accuracy of channel estimation. To solve this problem, an interference avoidance strategy for UDN with pilot reuse was proposed. An interference model of subcarriers for UDN was provided and the interference probability of subcarriers was derived. Then, based on the model, a pilot position selection model was proposed and an interference avoidance strategy for UDN with pilot reuse was provided. The simulation results show that compared with the traditional channel estimation algorithm, the channel estimation with proposed interference avoidance strategy can effectively avoid the interference and ensure the accuracy of channel estimation in UDN with pilot reuse.

Key words: ultra dense network, pilot reuse, interference avoidance, channel estimation

1 引言

随着智能终端数和通信业务的爆发式增长, 小区分裂不断叠加, 无线基站越来越密集且呈现大规模

模交叠覆盖趋势。未来移动通信网络将进一步向基站小型化与小区密集化方向发展。超密集网络 (UDN, ultra dense network) 应运而生, 被认为是 5G 移动通信系统的关键技术之一^[1]。然而, UDN

收稿日期: 2020-01-15; 修回日期: 2020-05-08

通信作者: 杨凡, yf_0220@cqut.edu.cn

基金项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究专项基金资助项目 (No.cstc2019jcyj-msxmX0233); 重庆市教育委员会科学技术研究计划基金资助项目 (No.KJQN201901125, No.KJQN201901103); 重庆理工大学科研启动基金资助项目 (No.2019ZD42, No.2019ZD63)

Foundation Items: Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology (No.cstc2019jcyj-msxmX0233), Science and Technology Research Program of Chongqing Education Commission of China (No.KJQN201901125, No.KJQN201901103), Scientific Research Foundation of Chongqing University of Technology (No.2019ZD42, No.2019ZD63)

中小基站密集部署会造成很大的干扰,其中导频复用产生的干扰将严重影响信道估计的准确性,极端情况下甚至使信道估计难以完成^[2-4]。如何有效抑制或避免导频复用产生的干扰是超密集网络亟待解决的问题。

针对无线通信的导频干扰问题(导频污染),现有研究主要可分为导频设计方案、导频分配方案、信道估计方案和预编码方案。文献[5]提出了一种单小区半正交导频设计方案,利用大规模多输入多输出(MIMO, multi-input multi-output)系统信道正交性及串行干扰抵消的信道估计方法,减轻导频干扰的影响,但并没有对传输过程和信道估计的均方误差进行分析。另外,该方案所得的当前信道估计准确性对后续相干时间影响较大。文献[6]研究了双工系统中的导频干扰问题,并提出了一种基于上下行功率控制的同信道干扰消除策略以减少非完美信道估计产生的误差,但并未对多用户的导频干扰提出有效解决方案。文献[7]利用信道的二阶统计特性以降低导频干扰影响,并对噪声有一定的抑制作用,但获取二阶统计特性计算复杂度很高,因此在实际系统应用中很难实现。文献[8-9]采用预编码技术,主要思想是将所有移动用户按顺序进行编码,在第一个移动用户完成编码后,第二个移动用户利用已知的信道状态信息(CSI, channel state information)消除第一个移动用户的干扰,依次类推,完成所有移动用户的预编码。但是该方法需要小区内所有移动用户数据进行联合编码,导致计算复杂度很高。文献[10]研究了一个多小区多用户 MIMO 系统的导频干扰问题,提出了一种联合导频和传输数据的迭代半盲信道估计算法。文献[11]研究了存在多普勒频移的多径信道场景下正交时频空间(OTFS, orthogonal time frequency space)系统中导频和数据的干扰问题,并提出了一种基于时延-多普勒平面的导频设计方案,以降低导频和数据的干扰。上述研究均未考虑导频复用的干扰问题。文献[12]针对大容量 MIMO 的导频干扰问题,提出了基于空间稀疏度的导频干扰消除方法,该方法能有效提高低信噪比区的信道估计性能,但只适用于白噪声的消除。文献[13]针对大容量 MIMO 同一导频的复用干扰问题,提出了一种基于位置辅助的干扰抑制算法,该算法能利用终端和基站的位置辅助信息构建目标角度区域,并提出一种

导频协调方法抑制干扰,但该算法需要终端和基站的位置信息,并且该算法仅适用天线数量较少的场景。

现有研究大多关注传统无线网络的导频干扰且方法多为干扰抑制和导频序列设计,较少关注超密集网络中导频复用产生的干扰问题。超密集网络需要大量正交导频进行用户设备(UE, user equipment)和射频拉远头(RRH, remote radio head)天线间的信道估计。然而,受限于正交导频数量,超密集网络场景只能采用导频复用方式满足信道估计的导频需求。由于 RRH 的高密度部署,UE 簇间存在大规模交叠特性,导频复用将产生同一导频的复用干扰,影响信道估计的准确性^[4,14-15]。这种导频复用干扰问题将随着 RRH 的密集化部署进一步加剧。如何有效抑制或避免导频复用产生的干扰是超密集网络亟待解决的关键问题。目前,尚未针对超密集网络的导频复用干扰问题提出有效的解决方案。

针对超密集网络导频干扰问题,本文建立了超密集网络子载波的干扰模型,推导子载波的干扰概率,并采用压缩感知理论建立了超密集网络非均匀导频位置优化模型,提出了超密集网络导频复用干扰避免策略。与传统信道估计算法相比,所提策略增加了导频复用干扰避免策略的信道估计,能有效避免导频复用产生的干扰,保证信道估计的准确性。

2 超密集网络模型

本文研究的场景为基于云计算的无线接入网络(C-RAN, cloud radio access network)^[16-17]结构的 UDN 场景,如图 1 所示。场景包括 m 个 RRH、 n 个 UE 和基带处理单元(BBU, baseband unit)池。其中,RRH 作为 UE 的接入点仅负责数据的发送和接收,每个 RRH 包含 k 个天线,每个 UE 为单天线;BBU 集中部署在 BBU 池内,利用云计算和虚拟化技术承担传统基站的信号处理任务,如信道估计、波束成形计算、资源管理和小区管理等。BBU 和 RRH 之间采用高速低时延的回程链路连接。这种结构能较好地支持联合资源调度、协同多点(CoMP, coordinated multiple point)传输等高复杂信号处理技术,同时实现低成本的 RRH 高密度部署。为简化场景,图 1 场景采用以 UE 为中心的簇结构,每个 UE 簇范围内

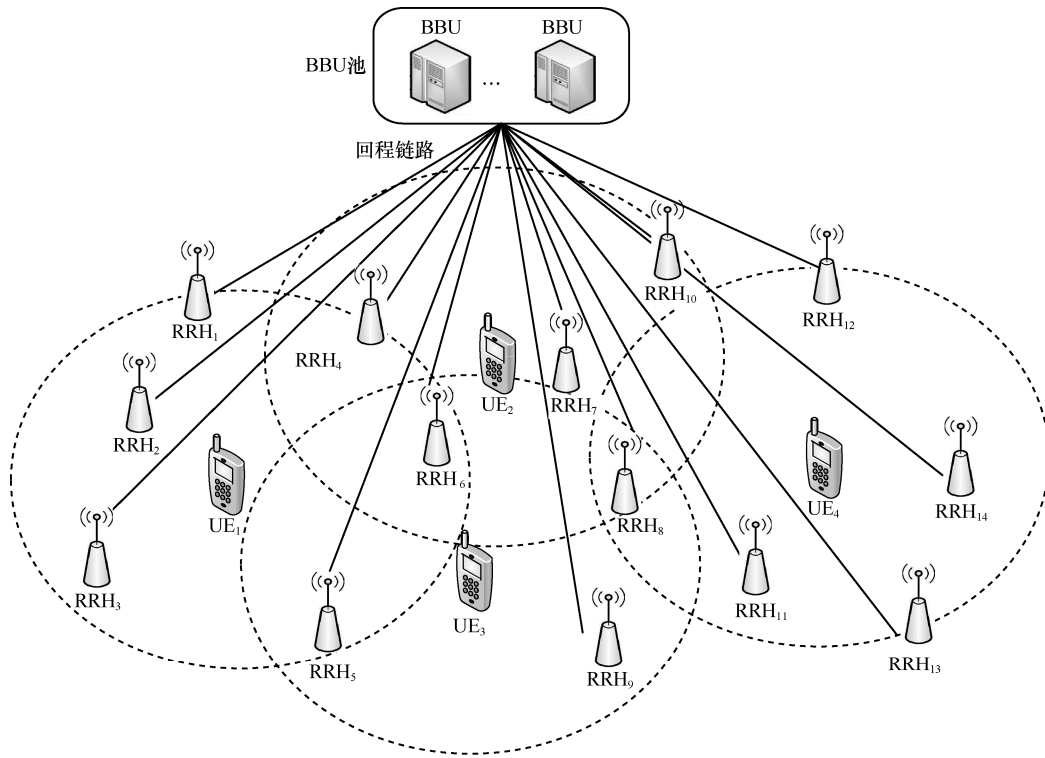


图 1 C-RAN 结构的 UDN 场景

包含多个 RRH，每个 RRH 可服务多个 UE，每个 UE 只接入一个 RRH。由于 RRH 具有多个天线且数量较多，该超密集网络场景需要大量正交导频进行 UE 和 RRH 天线间的信道估计，受限于正交导频数量，该类场景只能采用导频复用方式满足信道估计的导频需求。若该系统为频分双工 (FDD, frequency-division duplex) 系统，则下行信道估计共需要 km 组正交导频，分别分配给不同天线进行信道估计的导频信息发送。设正交导频共有 c 组，当 $km > c$ 时，由于正交导频组数量有限，无法满足系统信道估计所需导频数，则需要进行导频复用。导频复用次数为

$$q = \left\lceil \frac{km}{c} \right\rceil \quad (1)$$

其中， $\lceil x \rceil$ 表示大于 x 的最小整数。为避免同一导频序列复用产生的干扰，本文建立了超密集网络子载波干扰模型，并提出了基于导频位置优化的超密集网络导频复用干扰避免策略。

3 超密集网络子载波干扰模型

单个子载波的干扰占用如图 2 所示，其中阴影部分表示存在干扰，空白部分表示不存在干扰。

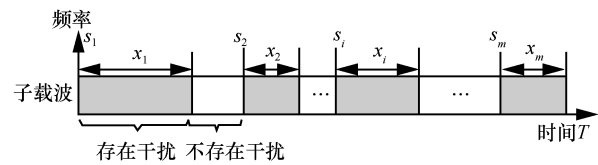


图 2 单个信道的干扰占用示意

令 m 为未被干扰时间段数量， t_w 为未被干扰时间段的持续时间， s_i 为干扰出现时间， x_i 为干扰的持续时间。设 s_i 服从泊松分布，则相邻 2 次干扰出现间隔服从指数分布，即 $y_i = s_{i+1} - s_i$ 服从指数分布，即

$$f_y(y) \approx \lambda e^{-\lambda y} \quad (2)$$

其中， $\lambda = \frac{m}{T}$ 表示干扰到达速率。 x_i 在 $(0, y_i]$ 范围内服从条件分布，可用截尾分布表示其条件概率密度函数，如式(3)所示。

$$f_{\text{cond}}(x) = \frac{f_x(x)}{F_x(y)} \quad (3)$$

其中， $f_x(x)$ 为 x 的概率密度函数。根据贝叶斯公式可得， x 和 y 的联合概率密度函数可表示为

$$f_{x,y}(x,y) = f_y(y)f_{\text{cond}}(x) \quad (4)$$

则 t_w 的概率密度函数可表示为

$$f_{t_w}(t_w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{x,y}(x, x+t_w) dx = \int_0^T \frac{f_x(x)}{F_x(x+t_w)} \lambda e^{-\lambda(x+t_w)} dx \quad (5)$$

x_i 可服从任意分布。式(5)表示干扰出现且服从泊松分布时, 未被干扰时间段的概率密度函数的通用表示形式。当 x_i 分别服从均匀分布和指数分布时, 式(5)可分别转化为

$$f_{t_w}(t_w) = \frac{m}{T} \int_{t_w}^T \frac{e^{-\beta x}}{x} dx \approx \lambda E_1(\lambda t_w) \quad (6)$$

$$f_{t_w}(t_w) = \lambda_x \lambda e^{-\lambda t_w} \text{hypergeom} \left(1 + \frac{\lambda}{\lambda_x}, 2 + \frac{\lambda}{\lambda_x}, \frac{1}{e^{\lambda_x t_w}} \right) \quad (7)$$

其中, $\beta = \frac{n}{T}$, E_1 为指数积分函数, hypergeom 为广义超几何函数。干扰状态转移模型如图3所示。其中, S_1 为子载波被干扰的状态, S_0 为子载波未被干扰的状态, $P_{0,1}$ 为子载波从未被干扰状态转移至被干扰状态的转移概率, $P_{1,0}$ 为子载波从被干扰状态转移至未被干扰状态的转移概率。

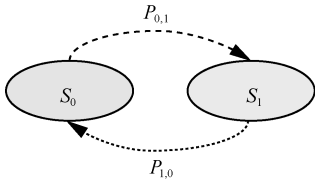


图3 子载波干扰状态转移模型

当干扰持续时间 $x(t)$ 服从指数分布时, 根据超密集网络子载波干扰模型可得, 未被干扰时间段 $f_{t_w}(t_w)$ 服从式(7)。则子载波被干扰时间段的期望和未被干扰时间段的期望可分别表示为

$$E[x(t)] = \frac{1}{\lambda_x} \quad (8)$$

$$E[f_{t_w}(t_w)] = \int_0^{+\infty} t_w \lambda_x \lambda e^{-\lambda t_w} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{e^{-\lambda_x t_w k}}{\lambda_x + \lambda + \lambda_x k} dt_w \quad (9)$$

则子载波被干扰的概率 $p_l (P_{0,1})$ 和 $P_{1,0}$ 分别表示为

$$p_l = P_{0,1} = \frac{1}{E[f_{t_w}(t_w)]} = \frac{1}{\int_0^{+\infty} t_w \lambda_x \lambda e^{-\lambda t_w} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{e^{-\lambda_x t_w k}}{\lambda_x + \lambda + \lambda_x k} dt_w} \quad (10)$$

$$P_{1,0} = \lambda_x \quad (11)$$

4 导频复用干扰避免机制

本节结合第3节的超密集网络子载波干扰模型, 建立非均匀导频位置优化模型, 将 N 个可用子载波划分成 q 个不同导频位置组, 每个导频位置组包括 S 个子载波位置, 则同一导频可复用至不同的导频位置组以避免导频复用干扰。非均匀导频位置优化模型如下。设场景中采用频率选择性慢衰落信道, UE 接收端的接收信号模型为

$$y_s = T_s h + z \quad (12)$$

$$T_s = X_s W_s, \quad X_s = S X P S_l^T, \quad W_s = S_l W \quad (13)$$

$$W = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{pmatrix} w^{00} & \dots & w^{(L-1)0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w^{0(N-1)} & \dots & w^{(L-1)(N-1)} \end{pmatrix} \quad (14)$$

其中, W 矩阵中的任一元素 $w^{nl} = e^{-j\frac{2\pi nl}{N}}$; $h = [h_0, h_1, \dots, h_{L-1}]$; $X = \text{diag}(x_1, x_2, \dots, x_N)$ 为 $N \times N$ 维发送信号矩阵; S_l 为 $S \times N$ 维导频位置选择矩阵; P 为 $N \times N$ 维干扰系数矩阵, 其对角线元素为 $1 - p_l$ 。设信道具有内在的稀疏性, 则可用压缩感知方法(如正交匹配追踪或正则化正交匹配追踪算法)重建稀疏信号 h 进行信道估计。若稀疏信号的稀疏度满足

$$K = \|h\|_0 \leq \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\mu(T_s)} + 1 \right) \quad (15)$$

$$\mu(T_s) = \max_{1 \leq i, k \leq L, i \neq k} \frac{|a_i^H a_k|}{\|a_i\| \|a_k\|} = \max_{1 \leq i, k \leq L, i \neq k} \frac{\sum_{n \in S} \frac{1}{N} x_{n,i} x_{n,k} e^{-j\frac{2\pi n(i+k)}{N}}}{\sqrt{\sum_{n \in S} \frac{1}{N} x_{n,i}^2 e^{-j\frac{4\pi ni}{N}}} \sqrt{\sum_{n \in S} \frac{1}{N} x_{n,k}^2 e^{-j\frac{4\pi nk}{N}}}} \quad (16)$$

其中, a_i 为 T_s 的第 i 列向量, $x_{n,i}$ 为 X_s 的第 n 行、第 i 列的值, $\mu(T_s)$ 为 T_s 中 2 个不同列的最大相关值, 则 h 的估计误差满足

$$e = \|\hat{h} - h\|_2^2 \leq \frac{(\varepsilon + \beta)^2}{1 - \mu(T_s)(4K - 1)} \quad (17)$$

从式(17)可知, h 的估计偏差与 $\mu(T_s)$ 成正比,

则合理选择导频位置, 减小 $\mu(\mathbf{T}_s)$ 值, 可有效降低 h 的估计误差。因此, 考虑子载波干扰的非均匀导频位置优化模型为

$$\min \mu(\mathbf{T}_s) = \min \max_{1 \leq i, k \leq L, i \neq k} \frac{\sum_{n \in S} \frac{1}{N} x_{n,i} x_{n,k} e^{-j \frac{2\pi n(i+k)}{N}}}{\sqrt{\sum_{n \in S} \frac{1}{N} x_{n,i}^2 e^{-j \frac{4\pi n i}{N}}} \sqrt{\sum_{n \in S} \frac{1}{N} x_{n,k}^2 e^{-j \frac{4\pi n k}{N}}}} \quad (18)$$

式(18)所示模型在考虑子载波干扰概率情况下, 将 N 个子载波中选择最优 S 个子载波作为导频位置的问题进行了转化, 转化为在 $N \times L$ 维矩阵

$$\mu(\mathbf{T}_{ik}) = \max_{1 \leq m, n \leq L, m \neq n} \frac{\frac{1}{N} x_{i,m} x_{i,n} e^{-j \frac{2\pi i(m+n)}{N}}}{\sqrt{\left(\frac{1}{N} x_{i,m}^2 e^{-j \frac{4\pi i m}{N}} + \frac{1}{N} x_{j,m}^2 e^{-j \frac{4\pi j m}{N}} \right) \left(\frac{1}{N} x_{i,n}^2 e^{-j \frac{4\pi i n}{N}} + \frac{1}{N} x_{j,n}^2 e^{-j \frac{4\pi j n}{N}} \right)}} \quad (19)$$

根据式(19)模型, 可进行近似化简求解, 具体步骤如下。

Step1 设 $a_{i,j}$ 为 \mathbf{T} 矩阵第 i 行、第 j 列的元素, 计算选择 $\prod_{j=1}^L a_{i,j}$ 最小的行为 i_p , 在 \mathbf{T} 矩阵中移出第 i_p 行至新建矩阵 \mathbf{b} , 剩余行的集合为 V 。

Step2 计算选择 $\mu(\mathbf{T}_{i_p,k})$ $k \in V$ 最小的行为 i_p , 在 \mathbf{T} 矩阵中移出第 i_p 行至矩阵 \mathbf{b} , 剩余行的集合为 V 。

Step3 重复 Step2 过程直至矩阵 \mathbf{b} 达到 $S \times L$ 维矩阵, 在 \mathbf{T} 矩阵中查找矩阵 \mathbf{b} 对应行向量的序号, 则得到导频选择向量 \mathbf{S}_p 。

所提策略复杂度为 $O\left(\frac{S^2(2N-S-1)}{2}\right)$ 。利用该

模型可分别得到每个导频的位置组。将正交导频组和导频位置组分配给不同天线, 即可实现同一导频复用的干扰避免。当正交导频组数为 c 时, 所提策略最多可实现 qc 个无干扰的导频分配。但所提策略需要采用非均匀导频, 因此所提策略是增加至压缩感知信道估计上使用。

5 仿真分析

本节采用 MATLAB 软件对所提基于导频干扰避免的压缩感知信道估计方法和现有信道估计方法进行了仿真对比。仿真场景为参考 3GPP TR38.913 设置的导频复用场景, 主要对比分析导频复用干扰情况下

\mathbf{T} 中选取 S 行, 构成 $S \times L$ 矩阵 \mathbf{T}_s , 并使 \mathbf{T}_s 矩阵不同列之间的相关值最小。该问题是一个复杂非确定性多项式难 (NP-HARD, non-deterministic polynomial hard) 问题, 很难得到最优解, 求解其全局最优解需计算比较 $\binom{S}{N}$ 种组合。如果遍历所有可行解, 则当子载波数目过多时, 算法复杂度过高, 搜索最优解的算法复杂度为 $O\left(\frac{N!}{S!(N-S)!}\right)$ 。本文对上述模型进行近似化简, 计算其次优解。 \mathbf{T} 矩阵任取两行 i 和 k 构成 \mathbf{T}_{ik} 矩阵, 则 $\mu(\mathbf{T}_{ik})$ 可表示为

的传输性能。其中, RRH 数量为 4, UE 数量为 40; 调制方式为正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 和正交相移键控 (QPSK, quadrature phase shift keying) 调制; 子载波数为 2 048, 其中导频数为 342, 分别采用均匀导频和非均匀导频排列; 信道模型采用瑞利衰落信道, 稀疏度为 10; 采样周期为 1 ms, 子载波干扰模型干扰持续时间服从指数分布, $\lambda_x = 0.4$ 。由于导频复用将产生同一导频的复用干扰, 使信道估计性能大幅下降, 导致误符号率 (SER, symbol error rate) 较高。误符号率和均方误差 (MSE, mean squared error) 的计算式分别如式(20)和式(21)所示。

$$r_{\text{SER}} = \frac{S_{\text{error}}}{S_{\text{all}}} \quad (20)$$

$$r_{\text{MSE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2 \quad (21)$$

其中, S_{error} 为错误的符号数, S_{all} 为总符号数, n 为数据数, x_i 为发送信息, \hat{x}_i 为解调出的信息。

图 4 给出了导频复用场景下不同信噪比条件下 4 种算法信道估计的误符号率。随着信噪比的增加, 4 种算法的误符号率都有所减少。在不同信噪比条件下, 压缩感知信道估计、最小二乘 (LS, least square) 信道估计和线性最小均方误差 (LMMSE, linear minimum mean square error) 信道估计都有着较高的误符号率, 严重影响通信性能。这是由于超密集网

络中小基站密集部署产生大规模交叠，导频复用产生同一导频的复用干扰，严重影响信道估计的准确性，甚至极端情况下使信道估计难以完成。所提策略在不同信噪比条件下都有着较低的误符号率，这是因为所提策略采用基于导频位置优化的超密集网络导频复用干扰避免方法，通过超密集网络非均匀导频位置优化模型将同一导频序列复用在不同导频位置组上进行复用，避免了导频复用干扰。

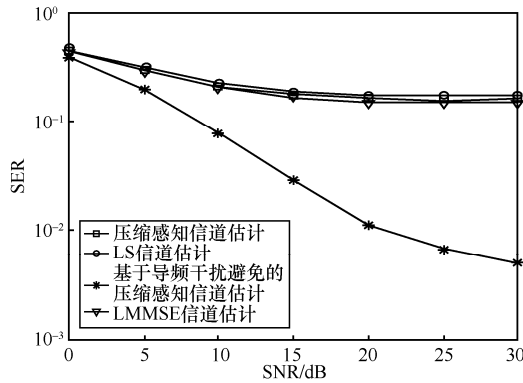


图 4 导频复用场景下信道估计的误符号率

图 5 给出了导频复用场景下不同信噪比条件下 4 种算法的信道估计的均方误差。随着信噪比的增加，4 种算法的均方误差都有所减少。其中，压缩感知信道估计、LS 信道估计和 LMMSE 信道估计在不同信噪比条件下的均方误差较高。所提策略在不同信噪比条件下都有着较低的均方误差。这是由于导频复用场景下，压缩感知信道估计、LS 信道估计和 LMMSE 信道估计将产生同一导频的复用干扰。采用受干扰的导频信息进行信道估计将严重影响信道估计的准确性，造成均方误差的升高。所提策略采用基于导频位置优化的超密集网络导频复用干扰避免方法，将同一导频序列复用在不同导频位置组上进行复用，避免了导频信息的复用干扰。

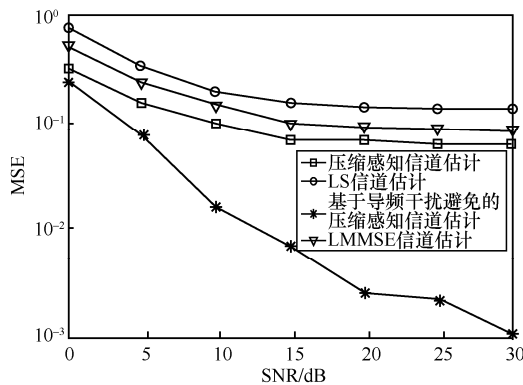


图 5 导频复用场景下信道估计的均方误差

图 6 和图 7 是超密集网络大范围交叠场景下存在同一信道的干扰用户且干扰用户以泊松分布出现时 4 种算法的性能分析。其中，泊松分布参数 λ 可表示干扰用户出现的频率。图 6 为不同干扰出现频率下 4 种算法信道估计的误符号率。当干扰用户出现的频率增加时，4 种算法的误符号率都有所增加。在不同干扰用户的出现频率下，压缩感知信道估计、LS 信道估计和 LMMSE 信道估计都有着较高的误符号率，所提策略误符号率相对较低。这是因为压缩感知信道估计、LS 信道估计和 LMMSE 信道估计没有结合干扰模型对导频位置进行选择，导频受干扰情况严重，使误符号率严重升高。所提策略选择被干扰概率较小的子载波作为导频，减少了干扰对导频信息的影响。

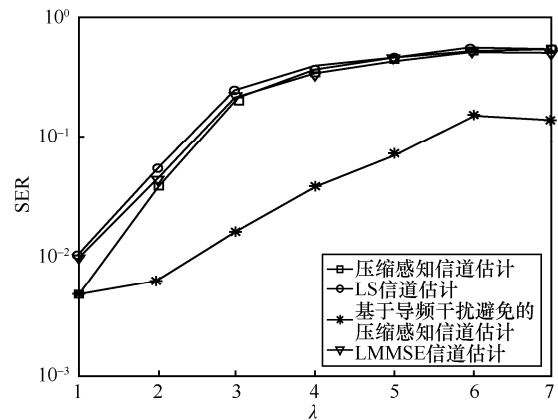


图 6 不同干扰出现频率下信道估计的误符号率

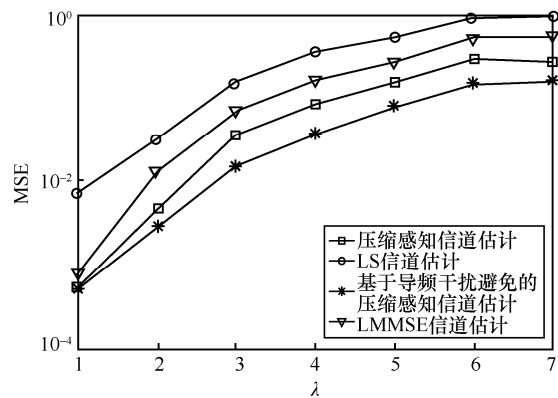


图 7 不同干扰出现频率下信道估计的均方误差

图 7 为不同干扰出现频率下 4 种算法的信道估计均方误差。当干扰用户出现的频率增加时，4 种算法的信道估计均方误差都有所升高。在不同干扰用户的出现频率下，压缩感知信道估计、LS 信道估计和 LMMSE 信道估计都有着较高的均方误差，所提策略均方误差相对较低。这是由于

压缩感知信道估计、LS 信道估计和 LMMSE 信道估计采用受干扰的导频信息进行信道估计, 将产生较高的信道估计均方误差。所提策略选择被干扰概率较小的子载波作为导频, 减少了随机干扰对导频信息的影响, 降低了信道估计的均方误差。

6 结束语

本文研究了超密集网络场景下的导频干扰问题, 建立了超密集网络子载波干扰模型, 推导了子载波的干扰概率, 并提出了基于导频位置优化的超密集网络导频复用干扰避免方法。仿真结果表明, 所提策略能有效避免导频复用产生的干扰, 保证信道估计的准确性。本文的研究成果对超密集网络导频复用场景下的高可靠传输有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] KAMEL M, HAMOUDA W, YOUSSEF A. Ultra-dense networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2522-2545.
- [2] PAN C, MEHRPOUYAN H, LIU Y, et al. Joint pilot allocation and robust transmission design for ultra-dense user-centric TDD C-RAN with imperfect CSI[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(3): 2038-2053.
- [3] PAN C, REN H, ELKASHLAN M, et al. Robust beamforming design for ultra-dense user-centric C-RAN in the face of realistic pilot contamination and limited feedback[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 18(2): 780-795.
- [4] TUGNAIT J K. On detection and mitigation of reused pilots in massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 66(2): 688-699.
- [5] 何毅. Massive MIMO 导频设计与信道估计[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
HE Y. Massive MIMO pilot design and channel estimation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [6] PARK E, BAE J, JU H, et al. Resource allocation for full-duplex systems with imperfect co-channel interference estimation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(4): 65-75.
- [7] SRINIVAS B, MAWATWAL K, SEN D, et al. An iterative semi-blind channel estimation scheme and uplink spectral efficiency of pilot contaminated one-bit massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 7854-7868.
- [8] RAVITEJA P, PHAN K T, HONG Y. Embedded pilot-aided channel estimation for OTFS in delay-doppler channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4906-4917.
- [9] GONG Z, LI C, JIANG F. Channel estimation for sparse massive MIMO channels in low SNR regime[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2018, 4(4): 883-893.
- [10] MUPPURISETTY L S, CHARALAMBOUS T, KAROUT J, et al. Location-aided pilot contamination avoidance for massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(4): 2662-2674.
- [11] TAN Y, ZHOU J, QIN J. Novel channel estimation for non-orthogonal multiple access systems[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(12): 1781-1785.
- [12] YANG H H, GERACI G, QUEK T Q S, et al. Cell-edge-aware precoding for downlink massive MIMO cellular networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(13): 3344-3358.
- [13] ALI S, CHEN Z, YIN F. Eradication of pilot contamination and zero forcing precoding in the multi-cell TDD massive MIMO systems[J]. IET Communications, 2017, 11(13): 2027-2034.
- [14] PAN C, REN H, ELKASHLAN M, et al. Weighted sum-rate maximization for the ultra-dense user-centric TDD C-RAN downlink relying on imperfect CSI[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(2): 1182-1198.
- [15] LIN Y, ZHANG R, YANG L, et al. Modularity-based user-centric clustering and resource allocation for ultra dense networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 12457-12461.
- [16] WU J, ZHANG Z, HONG Y, et al. Cloud radio access network (C-RAN): a primer[J]. IEEE Network, 2015, 29(1): 35-41.
- [17] ALIM I A, TEIXEIRA A L, MONTEIRO P P. Toward an efficient C-RAN optical fronthaul for the future networks: a tutorial on technologies, requirements, challenges, and solutions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 63(12): 132-156.

[作者简介]



黄杰 (1988-), 男, 重庆人, 博士, 重庆理工大学讲师, 主要研究方向为无线通信理论、通信网络、下一代移动通信技术、认知无线电、无线通信资源分配等。



杨凡 (1983-), 男, 湖北广水人, 博士, 重庆理工大学副教授, 主要研究方向为无线宽带自适应传输、无线通信网络、下一代移动通信技术、无线通信中的编码技术等。



高乙文 (1987-), 女, 重庆人, 中国移动通信集团重庆有限公司校园中心经理, 主要研究方向为移动通信网络、下一代移动、通信系统等。

张博为 (1988-), 男, 重庆人, 博士, 国家电网重庆电力公司信息通信分公司工程师, 主要研究方向为无线通信理论、MIMO 系统干扰管理、5G 网络通信技术。