

大规模 MIMO 系统中伪随机序列 加扰法的导频分配

韩知雨, 董静薇, 闫宁, 王欣, 李佳

(哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 哈尔滨 150080)

摘 要: 针对大规模 MIMO 系统中由于各小区复用相同导频序列而产生的导频污染问题, 提出一种联合极坐标导频分配和伪随机码导频设计的方案。先对每个小区内的所有用户用极坐标对其方位进行标注, 并根据用户的极角大小依次分配导频序列, 再采用不同时延的伪随机码对不同小区使用同一导频序列的用户进行加扰, 以此提升信道估计的准确度。通过理论推导与数据仿真分析, 该方案能够有效地减少信道估计的均方误差, 提高用户端上行链路传输的信干噪比及平均传输速率。从而减轻导频污染给信道估计造成的不利影响并提高信道吞吐量。

关键词: 大规模 MIMO; 导频污染; 信道估计; 导频序列; 均方误差

DOI: 10.15938/j.jhust.2021.01.016

中图分类号: TN929.53 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2021)01-0115-07

Pilot Allocation Scheme for Pseudo-random Sequence Scrambling in Massive MIMO System

HAN Zhi-yu, DONG Jing-wei, YAN Ning, WANG Xin, LI Jia

(School of Measure-Control Technology and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In this paper, a scheme of joint polar coordinate pilot assignment and pseudo-random code pilot design is proposed to solve the pilot contamination caused by the reuse of the same pilot sequence in each cell of the Massive MIMO system. First, all users in each cell were marked with polar coordinates, and pilot sequences were allocated according to the size of the user's polar angle. Then, pseudo-random codes with different time delays were used to disturb to users using the same pilot sequence in different cells, so as to improve the accuracy of channel estimation. Through theoretical derivation and data simulation analysis, the scheme can effectively reduce the minimum mean square error of channel estimation and improve the signal-to-noise ratio and average transmission rate of uplink transmission. Thus the adverse effect of pilot contamination on channel estimation is reduced and the channel throughput is improved.

Keywords: massive MIMO; pilot contamination; channel estimation; pilot sequences; mean square error

收稿日期: 2019-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(61601149); 黑龙江省科学基金(QC2017074); 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划资助项目(UNPYSCT-2018199)。

作者简介: 董静薇(1972—), 女, 教授, 硕士研究生导师;

闫宁(1996—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 韩知雨(1994—), 男, 硕士研究生, E-mail: 543271213@qq.com。

0 引言

由于无线通信技术近几年得到了快速的发展,人们最初设想的智慧互联场景也逐渐变为现实。随之而来,用户对于无线数据传输的需求也呈现出指数增长的趋势,因此目前的通信系统越来越难以满足人们对未来智能互联场景的需要。5G正是在此背景下提出的新一代通信系统网络^[1]。而作为5G通信系统关键技术之一的大规模多输入多输出(massive multiple input multiple output, Massive MIMO)技术,因其能够充分利用空间资源,显著提升网络容量和频谱效率,大幅降低时延和噪声干扰等优势,得到了学者广泛的关注^[2-3]。相较于传统的MIMO技术只设置十以内的天线而言,大规模MIMO技术通过将系统中的发射端与接收端的天线数量提升至几十根或几百根不等来提高小区系统的传输性能^[4]。Marzetta等发现,当基站的天线数量趋近于无穷时,通信环境中部分随机变量将趋于稳定,小尺度衰落将会被平均掉,加性噪声对用户的非相干干扰也将逐渐消失,基站与用户之间的信道向量将会呈现渐进正交的趋势^[5]。

然而,大规模MIMO技术性能的优劣大部分取决于信道状态信息估计的准确性。在理想条件下,系统应该为每一个用户分配相互正交的导频序列,但是由于受信信道相干时间长度的影响,相互正交的导频数量和导频序列的长度受到了制约,在用户数量较多时,很难为每一个用户分配相互正交的导频序列。经典场景中,1ms信道相干时间内最大只能容纳200个正交导频序列^[6]。因此,人们通常在大规模MIMO系统中采用复用导频的分配策略。随之而来,用户之间使用的导频序列也将出现非正交或完全相同的情况,导频污染因此产生,并将影响系统信道状态信息估计的准确性。因此,对导频污染消除的探索对于提升大规模MIMO系统的性能至关重要。

目前,针对大规模MIMO导频污染抑制技术的方案主要分为四类:改善信道估计的方式,改善预编码矩阵的方式,改善导频分配的方案以及对导频序列进行优化设计。其中文[6-9]从信道估计切入,通过改善信道估计的计算方法来减轻导频污染对系统的影响。文[6]将指数相关模型应用于信道自相关矩阵的构建中。文[8]在压缩感知的稀疏信道估计基础上,提出了一种基于稀疏自适应匹配跟踪的

算法。文[10]从改善预编码矩阵的方式入手解决导频污染问题,提出了基于Gauss-Seidel迭代的ZF预编码算法。文[11-16]通过从导频分配入手,分别利用调整不同小区发送导频信号的时间或对小区进行扇形分区等方法来抑制导频污染给系统带来的影响。文[7]则是从优化导频序列设计入手,提出了一种无需进行变量求逆运算的ZC序列作为导频序列的方案。

本文提出一种联合极坐标导频分配和伪随机码导频设计的方案,利用极坐标先对小区内每一用户的方位进行标注,根据用户极角的大小进行排序并依次分配导频序列。再采用不同时延的伪随机码分别对不同小区使用同一导频序列的用户进行干扰。与传统对小区内用户只进行极坐标导频分配的方案相比较,本方案能够在合理分配导频序列的基础上,进一步减少不同小区使用同一导频序列用户的相关性,并且系统模型简单,计算复杂度较低,相较于诸如:分层导频分配方案^[14],整数导频分配方案^[15]等其它传统的导频分配方案,本方案能够节约系统中所使用的正交导频序列个数,并且能够更加有效地提升系统信道估计的准确度。

1 系统模型

本文研究的是由 L 个六边形小区组成的大规模MIMO多小区TDD蜂窝系统,其中,每个小区将包含一座配备有 M 根定向天线的基站和 K 个单天线的客户端。所有客户端将共享相同带宽的频带资源。其中基站传输数据的平均功率为 p_t ,客户端传输数据的平均功率为 p_r 。 j 小区第 k 个用户到 i 小区基站天线的信道传输向量为

$$g_{ijk} = h_{ijk} \sqrt{\beta_{ijk}} \quad (1)$$

其中; h_{ijk} 表示用户与天线之间的小尺度衰落向量,并且服从均值为0,方差为1的复正态分布 $CN(0, 1)$, β_{ijk} 表示用户与天线之间的阴影衰落和几何衰落向量,其具体表示形式为

$$\beta_{ijk} = \frac{z_{ijk}}{(r_{ijk}/R)^\alpha} \quad (2)$$

其中: z_{ijk} 是均值为0,方差为 σ_{shadow} 的对数正态随机变量; r_{ijk} 表示小区 j 中 k 用户到 i 小区基站的距离; R 表示小区半径; α 为路径损耗系数。

2 信号传输方案

在大规模MIMO多小区TDD蜂窝系统中,小区

基站利用客户端上传的导频序列进行信道估计,并通过信道估计结果完成信号检测与下行预编码,最后将信号传输回客户端。由于同一小区内不同用户之间的相互干扰较大,因此通常我们将小区内的用户分别分配相互正交的导频序列

$$\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_k]^T \in C^{k \times \tau} \quad (3)$$

其中: τ 代表导频序列的长度; φ_k 表示小区中第 k 个用户所使用的导频序列,其满足 $\varphi_k \varphi_k^H = I$ 。

在上行链路中,小区基站接收各小区用户发送的相互正交的导频序列矩阵为

$$Y_i^p = \sqrt{p_r} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K g_{ijk} \varphi_k^T + N_i^p \quad (4)$$

式中: N_i^p 表示 $M \times \tau$ 维的加性高斯白噪声矩阵,通常假设为服从均值为 0,方差为 σ_N^2 的独立同分布随机变量。

基站接收导频信号后,将利用其进行信道估计。本文将采用最小二乘(least square, LS)信道估计,基站得到的信道估计结果为

$$\hat{g}_{iik} = \frac{1}{\sqrt{p_r}} Y_i^p \varphi_k^H = \sum_{j=1}^L g_{ijk} + w_{ik} \quad (5)$$

式中 $w_{ik} = \frac{1}{\sqrt{p_r}} N_i^p \varphi_k^H$ 为等效噪声。

根据式(5)可以看出,小区内用户 k 与本小区基站的信道估计结果是一组各个小区使用相同导频序列的用户与目标小区基站之间信道传输矢量的迭加,因此产生了导频污染。

在完成信道估计后,小区基站将接收客户端上传的数据信号,其表达式为

$$Y_i^u = \sqrt{p_r} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K g_{ijk} x_{jk}^u + n_i^u \quad (6)$$

其中: x_{jk}^u 为第 j 个小区中用户 k 发送的上行数据信息; n_i^u 表示服从均值为 0,方差为 σ_N^2 的 $M \times 1$ 维复高斯噪声。

之后基站将利用式(4)的信道估计结果与接收到的用户数据信息,进行信号检测,此处将使用匹配滤波(matched filter, MF)检测方法,把基站接收到的数据信号与信道估计值的共轭转置相乘,得到小区 i 中用户 k 的信号检测为

$$\hat{x}_{ik}^u = \hat{g}_{iik}^H Y_i^u = \left(\sum_{j=1}^L g_{ijk} + w_{ik} \right)^H \left(\sqrt{p_r} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K g_{ijk} x_{jk}^u + n_i^u \right) = \sqrt{p_r} \left(g_{iik}^H g_{iik} x_{ik}^u + \sum_{j \neq i} g_{ijk}^H g_{ijk} x_{jk}^u \right) + \epsilon_{iik}^u \quad (7)$$

由上式可得出小区 i 中用户 k 的上行信干噪比 s_{ik}^u 为

$$S_{ik}^u = \frac{|g_{iik}^H g_{iik}|^2 / M}{\sum_{j \neq i} |g_{ijk}^H g_{ijk}|^2 / M + \frac{|n_{iik}^u|^2}{p_r M}} \quad (8)$$

当小区基站天线数量趋近于无穷时,小区信道将呈现出渐进正交的特性。根据矩阵理论,当天线数量趋于无穷大时,信道矩阵满足如下定理:

令 $p = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$, $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ 为两个相互独立的 $n \times 1$ 向量,他们均为 i. i. d 分布,且均值为 0, $E\{|p_i|^2\} = \sigma_p^2$, $E\{|q_i|^2\} = \sigma_q^2$ ($i = 1, \dots, n$)。根据大数定理可以得当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\frac{1}{n} p^H p \xrightarrow{a.s.}$

σ_p^2 和 $\frac{1}{n} p^H q \xrightarrow{a.s.} 0$ 。其中 $\xrightarrow{a.s.}$ 表示必然收敛性。此外当 $n \rightarrow \infty$ 时,根据中心极限定理可得: $\frac{1}{\sqrt{n}} p^H q \xrightarrow{d}$

$CN(0, \sigma_p^2 \sigma_q^2)$, 其中 $\xrightarrow{d}$ 表示分布收敛。

因此,当 $M \rightarrow \infty$ 时可得小区 i 中用户 k 的上行信干噪比 s_{ik}^u 为

$$\lim_{M \rightarrow \infty} S_{ik}^u = \frac{\beta_{iik}^2}{\sum_{j \neq i} \beta_{ijk}^2} \quad (9)$$

由上式可知,当小区基站天线数量趋近于无穷时,小尺度衰落系数和噪声对系统的影响将可以忽略,上行信道的信干噪比仅仅受到各小区复用相同导频序列用户的大尺度衰落。根据式(8)和香农公式可得目标小区 i 中第 k 个用户的上行链路可达速率为

$$c_{ik}^u = (1 - \mu_0) E\{\log_2(1 + S_{ik}^u)\} \quad (10)$$

其中: μ_0 为导频开销系数,表示在信道估计过程中由导频序列造成的频谱效率的损失,当采用其它导频调度方案时, μ_0 应做出相应的调整^[11]。

3 联合极坐标导频分配和伪随机码导频设计的方案

3.1 方案介绍

根据式(8)可知,小区内用户的信干噪比主要受到大尺度衰落的限制,而大尺度衰落主要与客户端到目标小区基站的距离有关。系统中不同的用户,因与目标基站的距离不同,受到的信道衰落也互不相同。因此,复用同一导频序列的不同用户之间的干扰影响也存在差异。所以通过合理安排导频的分配,能够有效提升用户服务的公平性与系统的整体性能。本文将以合理分配导频序列,尽可能地减小使用相同导频序列用户间的干扰为出发点,来抑制导频污染给系统带来的不良影响。

如图 1 所示,假设有 3 个小区,每个小区随机分布 6 个单天线客户端。

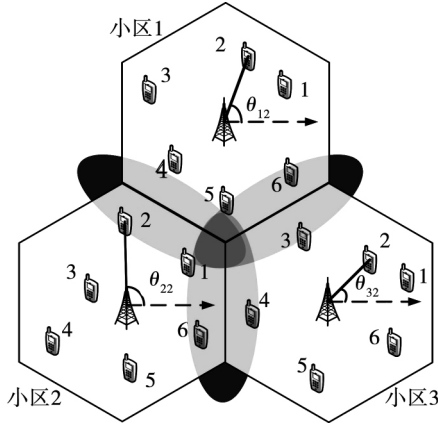


图1 系统模型

Fig. 1 System model

根据客户端的方位情况,我们分别按极角由小到大的顺序对其进行标注^[9],其极角分别为小区1: $\{\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{14}, \theta_{15}, \theta_{16}\}$; 小区2: $\{\theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}, \theta_{24}, \theta_{25}, \theta_{26}\}$; 小区3: $\{\theta_{31}, \theta_{32}, \theta_{33}, \theta_{34}, \theta_{35}, \theta_{36}\}$ 。其中小区内部分配相互正交的导频序列,并将其标注为 $\{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6\}$,小区间复用同一套导频序列。则小区内导频分配 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6$ 分别对应用户1、用户2、用户3、用户4、用户5、用户6。

通过该导频分配方案,解决了图1小区间灰色区域用户受到由于导频复用而造成极大性能下降的问题。但是小区之间因复用同一导频序列而带来的干扰依然存在。

为此,我们将在此基础上进一步采用不同时延的伪随机码对系统中用户的导频序列进行人为加扰,从而减少不同小区复用同一导频序列用户之间的相关性,以达到最大化抑制导频污染,提升系统性能的目的^[24]。

伪随机码不仅是具有良好自相关性与互相关性的确定序列,而且其还具备有类似于随机序列的基本特性。本文将利用伪随机码的这一优点来提高不同小区复用相同导频序列用户之间的正交性。在系统内小区共享同一组正交导频序列的前提下,将不同时延的伪随机码分别分配给不同的小区,以此来区分不同的小区,并对各小区用户的导频序列进行人为同步加扰来获得新的导频序列。

其中伪随机码加扰导频序列的设计方案如图2所示,假设 $\varphi_k = [\varphi_{k1}, \varphi_{k2}, \varphi_{k3}, \dots, \varphi_{k\tau}]^T$ 为小区内第 k 个用户的导频序列,相应小区的伪随机码为 $m = [m_1, m_2, m_3, \dots, m_N]$ 。

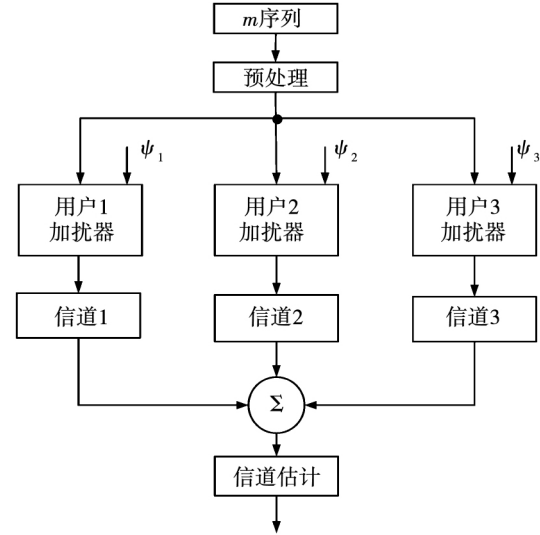


图2 基于伪随机码的导频设计方案

Fig. 2 Pilot design scheme based on pseudo-random code

通常伪随机码的长度远大于导频序列的长度。为确保能够顺利的通过伪随机码对导频序列进行加扰。我们需对伪随机码进行预处理: 首先,生成长度为导频序列长度 τ 的矩形窗,对生成的伪随机码进行截短; 其次,对截短后的伪随机序列进行调制,使其频谱搬移到合适的频段; 最后,将调制后的伪随机码对角化。处理后的伪随机码矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m_\tau \end{bmatrix} \quad (11)$$

将该矩阵输入到加扰器中,得到加扰后用户的伪随机序列为

$$\psi_k = P\varphi_k = [m_1\varphi_{k1}, m_2\varphi_{k2}, \dots, m_\tau\varphi_{k\tau}] \quad (12)$$

本方案将同步使用同一伪随机码对小区内部所有用户进行加扰处理,则小区内 k 个用户处理后的导频序列为

$$\Psi = \begin{bmatrix} m_1\varphi_{11} & \cdots & m_1\varphi_{k1} \\ \vdots & & \vdots \\ m_\tau\varphi_{1\tau} & \cdots & m_\tau\varphi_{k\tau} \end{bmatrix} \quad (13)$$

之后,客户端就可将向基站发送处理后的导频序列,基站将利用此序列进行信道估计以获取所需要的信道状态信息。

除此之外,关于伪随机码的选取也在本方案的考虑范围之内。由于不同的伪随机码之间的互相关性不同。如果选择互相关性较大的伪随机码对导频

序列进行处理,小区之间的导频污染对系统的影响将依然会很严重。为此,我们应择取互相关性较小的伪随机码对系统内的导频序列进行处理。根据理论分析,不同伪随机码之间的互相关性越小,导频污染抑制的效果越明显。因此我们用于处理导频序列的伪随机码之间满足

$$|\rho(m_i, m_j)|_{i \neq j} < \gamma, j = 1, 2, \dots, L \quad (14)$$

其中: L 为小区个数; $\rho(m_i, m_j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n m_{ik} m_{jk}$, 表示不同伪随机码之间的归一化互相关函数, $\gamma \in [0, 1]$ 为常数值, 其表示用于对导频序列进行加扰处理的不同伪随机码之间归一化相关函数值的上限。

3.2 性能分析

通过对本文方案系统的上行信干噪比和信道估计的均方误差进行推导分析, 来对本文所提的抑制导频污染新方案的性能进行分析。

由第 2 节可知, 目标小区 i 中第 k 个用户的上行信干噪比为

$$S_{ik}^u = \frac{|g_{ik}^H g_{ik}|^2}{\sum_{j \neq i} |g_{ijk}^H g_{ijk}|^2 + \frac{|g_{ik}^u|^2}{p_r}} \xrightarrow{M \rightarrow \infty} \frac{\beta_{ik}^2}{\sum_{j \neq i} \beta_{ijk}^2} \quad (15)$$

当基站的天线数目 M 趋近于无穷时, 系统将会平均掉加性噪声和小尺度衰落。但是在上行链路中, 系统容量将会受到导频污染的影响, 如式 (15), 如何减小式子中的 $\sum_{j \neq i} \beta_{ijk}^2$, 将成为抑制导频污染, 提升系统整体性能的关键。

通过对式 (2) 的研究, 我们发现, 系统中的大尺度衰落反比于用户端到基站的距离。如果用户 u_{jk} 到基站的距离满足 $r'_{ijk} > r_{ijk}$, 则 $\beta'_{ijk} \propto \frac{1}{r'_{ijk}} < \frac{1}{r_{ijk}} \propto \beta_{ijk}$ 。因此调整系统中复用同一导频序列用户的距离, 将直接影响用户端的上行信干噪比。所以, 增加复用同一导频序列用户之间的距离, 能够有效抑制导频污染给系统带来的影响。

由式 (12) 可得, 小区中第 k 个用户经过伪随机码加扰后的导频序列为 $\psi_k = P\varphi_k$, 则式 (4) 可表示为

$$Y_i^p = \sqrt{p_r} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K g_{ijk} \psi_k^T + N_i^p = \sqrt{p_r} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K g_{ijk} \varphi_k^T P_j^T + N_i^p \quad (16)$$

当基站天线数量有限时, 期望信道的 LS 估计为

$$\hat{G}_{ii} = \frac{1}{\sqrt{p_r}} Y_i^p \psi^H + W_i = \frac{1}{\sqrt{p_r}} Y_i^p \Phi^H P^H + W_i = \sum_{j=1}^L g_{ij} + W_i \quad (17)$$

由式 (5) 可知, 导频污染产生的原因是小区内用户 k 与本小区基站的信道估计结果是一组各个小区使用相同导频序列的用户与目标小区基站信道传输矢量的迭加。本方案通过对不同小区复用的导频序列进行人为的伪随机码加扰后, 使不同小区之间原本复用的导频序列的互相关值减小, 从而减少了导频污染给信道估计带来的干扰, 进而降低信道估计的均方误差。

$$\begin{aligned} M^{\text{mse}} &\triangleq E\{\|\hat{G}_{ii} - G_{ii}\|_F^2\} = E\{(G_{ii} - \hat{G}_{ii})^H (G_{ii} - \hat{G}_{ii})\} = \\ &E\{(H_{ii} - \psi^{-1} Y_i^p)^H (H_{ii} - \psi^{-1} Y_i^p)\} = \\ &E\{W_i^H (\psi_i \psi_i^H)^{-1} W_i\} = \frac{1}{S_{\text{SNR}}} \end{aligned} \quad (18)$$

其中 S_{SNR} 为小区用户的信噪比。

由于信道估计的均方误差与小区用户的信噪比成反比, 因此本方案可提升用户的信干噪比。并且根据式 (10) 进一步可得本方案亦可提升小区整体的传输速率与系统容量。

4 性能仿真

本节将通过数值模拟仿真的方法, 对本方案给大规模 MIMO 系统性能带来的提升进行评估。并分析调整不同参数后对系统性能的影响。在本文数值仿真中, 将考虑 3 个小区的情况, 小区半径 $R = 1000$ m, 每个小区将包含 6 个客户端。其中, 用户端的平均发射功率 $p_r = 10$ dBm, 伪随机码的归一化互相关值的上限 $\gamma = 0.3$, 信道的对数阴影正态衰落标准差 $\sigma_{\text{shadow}} = 4$ dB, 路径损耗因子 $\alpha = 3$, 导频长度 $\tau = 16$ 。为了更直观的体现出本方案给系统性能带来的提升, 仿真中将还将与无导频污染情况和未使用导频污染抑制方案的情况进行对比。

图 3 给出了不同情况下, 系统天线数量在 50 到 1000 之间的信道估计均方误差变化曲线。其中仅采用极坐标导频分配的方案和本文采用的联合极坐标导频分配和伪随机码导频设计的方案相较于未使用导频污染抑制方案的情况下, 信道估计的性能有了很大幅度的提升, 其中信道估计均方误差的数值下降均将近达到 1 dB。而本文采用的联合极坐标导频分配和伪随机码导频设计的方案相较于仅仅进行极坐标导频分配的方案^[9], 在性能上能够得到进一

步的提升,使系统性能在不增加算法复杂度的情况下,更加接近无导频污染情况时的状态。

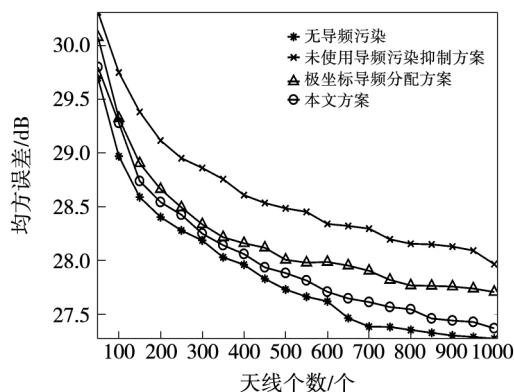


图3 信道估计的均方误差与天线数量的关系

Fig. 3 The relationship between the mean square error of channel estimation and the number of antennas

图4给出了小区基站天线数量 $M=1000$ 时,不同情况下目标小区用户端上行信干噪比的累积分布函数。可以看出本文采用的联合极坐标导频分配和伪随机码导频设计的方案相较于极坐标导频分配方案,在用户端上行信干噪比的方面有限提升,提升约11 dB。系统性能更加接近于无导频污染的情况,导频污染对系统性能的影响得到了很大程度的抑制。

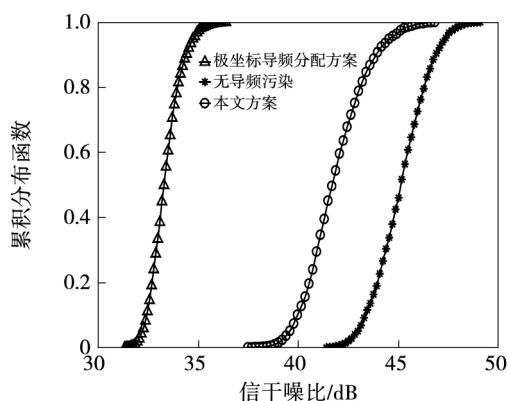


图4 目标小区用户端上行信干噪比的累积分布函数

Fig. 4 The cumulative distribution function of the Signal to Interference plus Noise Ratio of the uplink of the target cell

图5为不同情况下,系统中目标小区上行链路用户端平均可达速率随基站天线数量变化的曲线。其中可看出本文采用的联合极坐标导频分配和伪随机码导频设计的方案相比于极坐标导频分配方案,在该性能上有了明显的改善与提升。可达速率提升

将近4 bps/Hz。更加接近无导频污染情况下的平均可达速率。

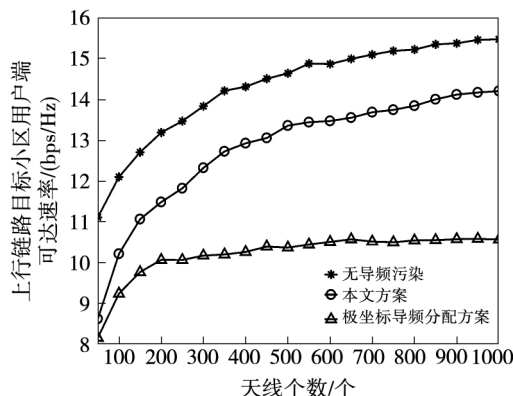


图5 目标小区上行链路用户端平均可达速率与天线数量的关系

Fig. 5 The relationship between the average client reachable rate of uplink in target cell and the number of antennas

5 结论

本文为了抑制大规模MIMO系统中的导频污染问题提出了联合极坐标导频分配和伪随机码导频设计的方案。并介绍了本方案的具体执行步骤,并对性能指标进行了理论推导与数据仿真。通过对系统中信道估计的均方误差,目标小区用户端上行信干噪比的累积分布函数和目标小区上行链路用户端平均可达速率进行模拟仿真与数值分析得出,本方案相较于未使用导频污染抑制方案的情况和基于极坐标导频分配的方案,系统整体性能有了明显的改善与提升。

参考文献:

- [1] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等. 5G移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学:信息科学,2014,44(5):551.
YOU Xiaohu, PAN Zhiwen, GAO Xiqi, et al. The 5G Mobile Communication: the Development Trends and Its Emerging Key Techniques[J]. Scientia Sinica Informationis, 2014, 44(5):551.
- [2] LU L, LI G Y, SWINDLEHURST A, et al. An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5):745.
- [3] NGO H Q, LARSSON E, MARZETTA T. Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(4):1436.
- [4] 戚晨皓,黄永明,金石. 大规模MIMO系统研究进展[J]. 数据

- 采集与处理, 2015, 30(3): 544.
- QI Chenhao, HUANG Yongming, JIN Shi. Overview of Massive MIMO System [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(3): 544.
- [5] MARZETTA T. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590.
- [6] ALBDHAN S, ALSHAMMARI A, AHAD M R, et al. Effect of Exponential Correlation Model on Channel Estimation for Massive MIMO [C] // IEEE International Conference on Computer and Information Technology. Dhaka, Bangladesh: IEEE Press, 2016: 80.
- [7] 周乔, 许魁, 徐友云, 等. 联合波束域分解和 SVD 的多用户大规模 MIMO 系统信道估计 [J]. 信号处理, 2018, 34(4): 439.
- ZHOU Qiao, XU Kui, XU Youyun, et al. Jointbeam Domain Decomposition and SVD for Channel Estimation in Multi-user Massive MIMO System [J]. Journal of Signal Processing, 2018, 34(4): 439.
- [8] ZHANG Y, VENKATESAN R, DOBRE O, et al. Novel Compressed Sensing-based Channel Estimation Algorithm and Near-optimal Pilot Placement Scheme [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(4): 2590.
- [9] 王茜竹, 邱聪聪. Massive MIMO 系统基于子空间的半盲信道估计 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(8): 91.
- WANG Qianzhu, QIU Congcong. Subspace-based Semi-blind Channel Estimation for Massive MIMO Systems [J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(8): 91.
- [10] GAO X, DAI L L, ZHANG J Y, et al. Capacity-approaching Linear Precoding with Low-complexity for Large-scale MIMO Systems [C] // 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). London, UK: IEEE Press, 2015: 1577.
- [11] 吴玉成, 刘统, 曹猛, 等. 大规模 MIMO 多小区多用户 TDD 系统导频污染抑制方法 [J]. 工程科学与技术, 2018, 50(2): 105.
- WU Yucheng, LIU Tong, CAO Meng, et al. Pilot Contamination Suppression in Massive MIMO Multi-cell Mult-user TDD Systems [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(2): 105.
- [12] FERNANDES F, ASHIKHMIN A, MARZETTA T. Inter-cell Interference in Noncooperative TDD Large Scale Antenna Systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(2): 192.
- [13] JIN S, WANG X Y, LI Z, et al. Zero-forcing Beamforming in Massive MIMO Systems with Time-shifted Pilots [C] // 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). Sydney, NSW, Australia, 2014: 4801.
- [14] ZHANG D C, WANG H R, FU Y H. Uplink Sum Rate Analysis with Flexible Pilot Reuse [C] // 2016 8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). Yangzhou, China, 2016: 1.
- [15] ZHAO Z, CHEN Z G, LIU Y T. Cellsectorization-based Pilot Assignment Scheme in Massive MIMO [C] // 2015 Wireless Telecommunications Symposium (WTS). New York, NY, USA, 2015: 1.
- [16] WEI T, FENG W, SHI R, et al. Coordinated Multi-cell Multi-user Pilot Allocation in Massive MIMO Systems with Time-shifted Pilots [C] // 2015 International Conference on Wireless Communication & Signal Processing (WCSP). Nanjing, China, 2015: 1.
- [17] 杨祺, 王琼, 牛芳琳. 大规模 MIMO 中 ZC 码导频序列设计的研究 [J]. 信息通信, 2018, 184(4): 1.
- YANG Qi, WANG Qiong, NIU Fanglin. Research on ZC Code Pilot Design in Massive MIMO [J]. Information & Communications, 2018, 184(4): 1.
- [18] 宋新雷, 杨霖, 杜嘉良. 联合时移和空间划分方法抑制大规模 MIMO 导频污染 [J]. 通信学报, 2017, 38(2): 165.
- SONG Xinlei, YANG Lin, DU Jialiang. Pilot Decontamination in Massive MIMO System Combining Time-shifted and Cell Sectorization Pilot Assignment [J]. Journal on Communications, 2017, 38(2): 165.
- [19] 杜嘉良, 杨霖, 宋新雷. 大规模 MIMO 系统中基于用户位置信息的导频分配 [J]. 通信学报, 2017, 38(8): 156.
- DU Jialiang, YANG Lin, SONG Xinlei. Pilot Allocation Based on User Location Information in Massive MIMO Systems [J]. Journal on Communications, 2017, 38(8): 156.
- [20] 方昕, 张建峰, 曹海燕, 等. 大规模 MIMO 系统中的伪随机码导频设计 [J]. 应用科学学报, 2016, 36(1): 1.
- FANG Xin, ZHANG Jianfeng, CAO Haiyan, et al. Pilot Design Based on Pseudo-random Code in Massive MIMO System [J]. Journal of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering, 2016, 36(1): 1.

(编辑: 温泽宇)