

文章编号:1004-9037(2014)03-0384-06

基于有限反馈的大规模 3D MIMO 多用户 传输方法及其码本设计

张 帆¹ 何世文^{1,2} 黄永明¹ 杨绿溪¹

(1. 东南大学信息科学与工程学院, 南京, 210096; 2. 东南大学毫米波国家重点实验室, 南京, 210096)

摘要:针对大规模 MIMO 通信系统研究了一种基于码本的有限反馈大规模 3D MIMO 多用户传输方法,给出一种基于水平和垂直方向码字直积的 3D MIMO 码书设计方案,并提出了两种垂直码本设计方法,且在合理的调度方案下,对所设计的码本进行了仿真分析。仿真表明本文所提的三维码本相对于二维码本以及传统的三维 DFT 直积码本,提高了系统频谱利用率和吞吐量性能。

关键词:大规模 MIMO; 全维 MIMO; 垂直码本设计; 有限反馈; 均匀平板阵列

中图分类号: TN911.22

文献标志码: A

Limited Feedback Based Massive 3D MIMO Multi-user Transmission Method and Its Codebook Design

Zhang Fan¹, He Shiwen^{1,2}, Huang Yongming¹, Yang Luxi¹

(1. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China;

2. The State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

Abstract: A codebook based limited feedback transmission scheme is investigated for downlink multiuser massive MIMO system. A 3D MIMO codebook design method is proposed based on Kronecker product of codewords in the horizontal and the vertical domains to focus on two vertical codebook design. Simulation analysis is made for the proposed 3D MIMO codebook with reasonable scheduling scheme. Simulation shows that the system spectral efficiency and throughput performance of the proposed 3D MIMO codebook are significantly improved compared with 2D codebook and traditional 3D MIMO DFT codebook.

Key words: massive MIMO; full dimension MIMO; vertical codebook design; limited feedback; UPA(uniform planar array)

引 言

近年来,多用户 MIMO(MU-MIMO)通信技术充分利用多天线提供的空间自由度,通过时频资源复用方式同时服务多个用户,从而有效提高系统平均吞吐量和频谱效率^[1-3]。多用户 MIMO 系统中,若基站知道准确的信道状态信息(Channel state information, CSI),则可以通过闭环预编码预先消除多用户间干扰,显著提高系统性能。但对频分双工(Frequency division duplex, FDD)系统,

瞬时 CSI 只能通过用户反馈得到,且实际中反馈链路的带宽总是很有限的,因此常采用基于码本的有限反馈预编码传输方案,对码本的设计和 CSI 反馈策略的研究也变得尤为重要。

大规模 MIMO 通信系统作为一种新颖的蜂窝网络结构成为当前的研究热点^[4-6],在大规模 MIMO 系统中,基站端有数量巨大的低功率小天线,天线数目远远超过同时调度的单天线用户数量。大规模 MIMO 技术具有以下优点:首先,大规模 MIMO 直接通过增加基站端的天线数就可以使得系统容量增加,而不需要缩小小区的规模^[7],它可

基金项目:国家自然科学基金(61372101, 61271018)资助项目;国家科技重大专项(2012ZX03004-005-003)资助项目;江苏省科技计划(BE2012167)资助项目。

收稿日期:2014-04-10; **修订日期:**2014-05-16

以采用主动天线系统(Active antenna system, AAS)技术,对每一个天线单元实现独立的数字控制,有效地降低MU-MIMO用户之间的干扰,从而显著地提高系统的容量;其次,大规模MIMO通过增加基站天线数可以使得终端射频模块所要消耗的功率更低,符合绿色通信和节能通信的思想^[8],文献[9]已经证明在多小区MU-MIMO系统中,保证一定的服务质量(Quality-of-Service, QoS)情况下,具有理想CSI时,用户的发射功率与基站的天线数成反比,而当CSI不理想时,用户的发射功率则与基站天线数的平方根成反比;再次,利用信道互易性,信道训练的开销仅与每小区的用户数相关,而与基站天线数无关,当基站天线数趋向无穷时,并不会增加系统的反馈开销,而且文献[10]已证明额外多出来的天线总是对性能有益的。因此,与传统的MIMO通信系统相比,大规模MIMO系统通过在基站端配备大量低功率天线,可以有效地提升频谱效率,提高链路可靠性,降低能量损耗^[11]。

当然,对于大规模MIMO系统,目前仍有许多技术问题亟待研究,其中一个很重要的问题就是“导频污染(Pilot Contamination)”^[12-13]。从信息论的角度看,当基站的天线数趋近于无穷时,信道容量应该是无限大,但是在实际应用的场景中,这并不成立,其限制因素就是导频污染。由于大规模MIMO的频分双工(Frequency division duplex, FDD)系统中基站获得反馈的信道信息较困难,很多文献仅考虑将大规模MIMO应用于时分双工(Time division duplex, TDD)系统,这时基站估计上行信道并利用信道互易性来获得下行信道状态信息^[14-16]。但是由于导频信号空间的维数总是有限的,所以不可避免地总是存在不同小区的用户采用相同的导频同时发射,从而导致基站无法区分,形成所谓的“导频污染”^[17-18]。目前并没有很有效的方法可以完全消除导频污染。针对不同的场景,应当利用不同的解决方法。所以,针对FDD大规模MIMO系统,研究基于码本的有限反馈预编码传输方案仍是很有实际意义的。

大规模MIMO系统在实际应用中遇到的另一挑战是基站天线数量通常被基站和工作载频所限制。例如,基站工作在最低的长期演进技术(Long term evolution, LTE)载频700 MHz时,在基站水平面上配置间距为 0.5λ 的8个天线单元,需要水平空间大约1.7 m,其中 λ 是载波波长。实际情况中,基站没有足够的空间放置这些天线。因此就提

出了3D MIMO蜂窝通信系统,考虑在基站的二维面上架设大量的有源天线单元。这样不仅节约了空间,而且还可以区分水平维度方向相同但垂直维度方向不同的用户^[19]。3D MIMO系统在水平和垂直维度分别进行波束赋形,大大提高了系统的吞吐量。

对于FDD大规模3D MIMO系统,只能由用户通过反馈链路将瞬时信道状态信息(Instantaneous channel state information, ICSI)反馈给基站,基站根据用户的反馈信息进行预编码,从而在数字域实现波束赋形。由于基站处天线数目的大量增加,传统的CSI反馈量是随天线数目线性增长的,实际系统中反馈链路的频率资源总是有限的,因此对于码本的设计以及CSI反馈方案的研究变得尤为重要。通常,码本的设计需要匹配信道特性,对于基站天线采用天线元素间隔较小的均匀线性阵列(Uniform linear array, ULA)而形成的强相关信道,DFT码书是一个很好的选择。但对于基站配置均匀平板阵列(Uniform planar array, UPA)的3D MIMO场景,码书需要重新设计。如何利用大规模3D MIMO信道的新特性,结合UPA天线下的三维码书设计思想,通过低复杂度的用户调度和有限反馈算法等有效实现大规模3D MIMO传输,将是本文研究要解决的问题。

本文研究了一种基于码本的有限反馈大规模3D MIMO多用户传输方法,首先介绍了系统模型,然后给出了一种基于水平和垂直方向码字直积的3D MIMO码书设计方案,并提出了两种垂直码本设计方法,且在合理的多用户调度方案下,对所设计的码本进行了仿真分析。仿真结果表明,本文所提的三维码本相对于二维码本以及传统的三维DFT直积码本,提高了系统频谱利用率和吞吐量性能。

1 系统模型

考虑单个小区,用户均匀分布在小区内的简单场景。假设单个小区中总共有 K 个用户,基站每次同时服务 N 个用户,分别记为用户1,用户2, ..., 用户 N ,基站共有 N_t 根发射天线,每个用户配置 N_r 根接收天线,且对应的数据经过层映射后的层数为1。用户 i 的接收信号可表示为

$$\mathbf{y}_i = \sqrt{\frac{P}{N}} \mathbf{H}_i \mathbf{w}_i u_i + \sqrt{\frac{P}{N}} \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{H}_i \mathbf{w}_j u_j + \mathbf{n}_i, j \in \{1, 2, \dots, N\} \setminus i \quad (1)$$

式中: $\mathbf{y}_i \in \mathbf{C}^{N_r \times 1}$ 为用户 i 的接收信号, $u_i \in \mathbf{C}$ 为其

发送符号,且满足 $E\{u_i^* u_i\} = 1$, $\mathbf{H}_i \in \mathbf{C}^{N_r \times N_t}$ 为相应的信道矩阵, $\mathbf{w}_i \in \mathbf{C}^{N_t \times 1}$ 为相应的单位模值的预编码矢量, $\mathbf{n}_i \sim \mathbf{CN}(0, \sigma_n^2 \mathbf{I})$ 为加性复高斯噪声, σ_n^2 为噪声方差, P 为总发射功率, 基站对其进行平均分配, 即每个用户的功率为 P/N 。

多用户 MU-MIMO 技术充分利用多天线提供的空间自由度, 通过时频资源复用方式有效提高系统的平均吞吐量。当基站采用均匀线性阵列 ULA 结构时: 如图 1 所示, 波束的下倾角固定, 只能在水平的二维平面内进行波束赋型; 如图 2 所示, 这时它能够区分不同水平角度的用户, 但是不能区分同一水平角度, 不同距离的两个用户。当基站采用均匀平板阵列 UPA 时: 如图 1 所示, 它可以充分开发垂直维的自由度, 不仅可以在水平的二维平面内进行波束赋型, 而且可以在垂直维度进行波束赋型, 使得波束的指向性更加明确; 如图 2 所示, 它能够区分同一水平角度, 距离较远的两个用户。

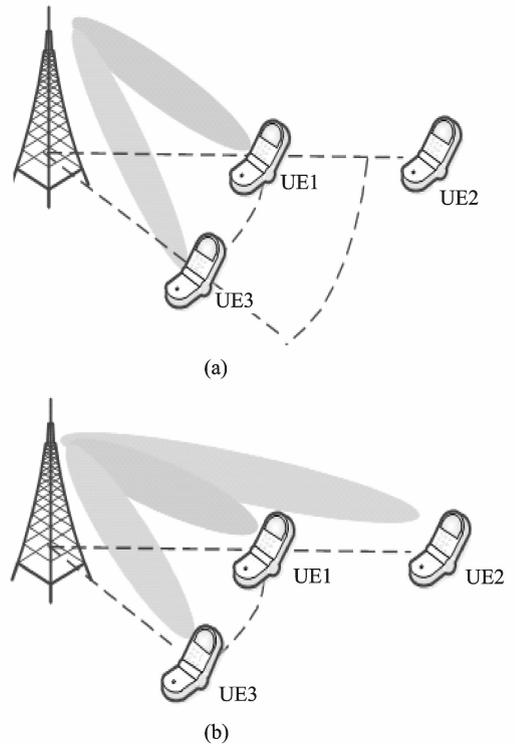


图 2 多用户 MIMO
Fig. 2 MU MIMO

(Channel quality indication, CQI)) 从码本 $\mathbf{C} = \{\mathbf{c}_0, \mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_{N_v \times N_h - 1}\}$ 中合理选择预编码矢量, 实现高效传输。其中基站对多用户的调度方式, 由于是大规模 3D MIMO 系统, 可以采用简单的随机调度。

2 面向大规模 3D MIMO 码本设计

目前相关文献中提出的 3D MIMO 码本是一种基于直积的 DFT 码本^[19], 其水平码字与垂直码字均为 DFT 码字, 最终码字为水平码字与垂直码字的直积。DFT 波束具有较为明显的方向性, 其波束指向在圆周上的分布比较均匀, 适合水平方向波束成型。然而, 垂直方向波束的角度可调范围较小, 另外分布也不均匀。所以, DFT 码本不适合垂直方向的波束成型。为了克服现有技术中存在的不足, 本节给出一种基于 3D MIMO 码本设计的大规模 MIMO 多用户传输方法, 基于空间分割的思想提出两种新的垂直码本设计方案, 充分利用空间垂直维度, 对空间进行了更加合理有效的分割。

2.1 码本方案 1

基站采用垂直方向和水平方向的阵元数分别为 N_{v0} 和 N_{h0} 的均匀平板阵列结构, 设垂直码本包括 N_v 个垂直码字, N_v 个垂直码字将小区划分为 N_v 个等距离的环形, 每一个垂直码字的波束均指

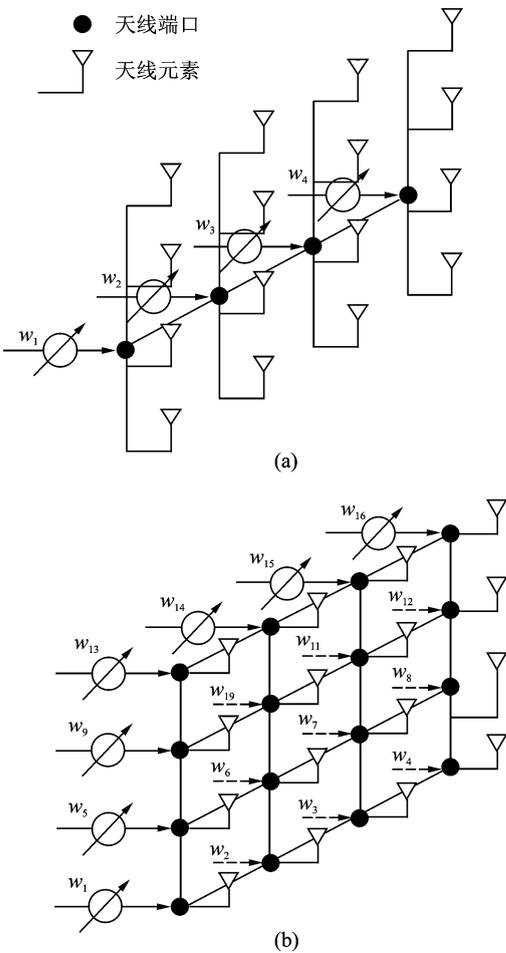


图 1 UPA 结构示意图
Fig. 1 UPA structure

本文研究的有限反馈 MU-MIMO 传输技术, 就是基站根据用户有限反馈的参数 (如码字索引 (Precoding matrix index, PMI)、信道质量指示

向一个环形中心位置。如图 3 所示, H_{BS} 为基站天线高度; H_{MS} 为用户天线高度; S 为环形中心位置与基站的距离。对于第 m 个垂直码字, 第 m 个环形中心相对于基站天线的下倾角为

$$\theta_m = \arctan\left(\frac{S_m}{H_{BS} - H_{MS}}\right) \quad (2)$$

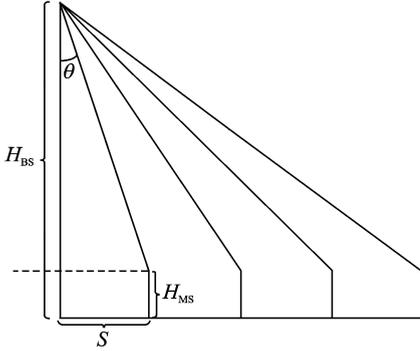


图 3 码字方案 1 设计示意图

Fig. 3 Design diagrammatic sketch of 3D codebook 1

式中: S_m 为第 m 个环形中心距离基站的水平距离。则基站天线阵元间相位差 $\Delta\varphi_m = \frac{2\pi d \cos\theta_m}{\lambda}$, 假设第一个天线阵元的相位为参考相位 0, 则第 m 个垂直码字可以表示为

$$\mathbf{c}_m^{(v)} = \frac{1}{\sqrt{N_{rv}}} [1 \ e^{j\frac{2\pi d \cos\theta_m}{\lambda}} \ \dots \ e^{j\frac{2\pi(N_{rv}-1)d \cos\theta_m}{\lambda}}] \quad (3)$$

式中: d 为基站天线垂直阵元间隔, λ 为波长 ($m = 0, 1, \dots, N_V - 1$); 水平子码本采用 DFT 码本, 则水平 DFT 码字表示为

$$\mathbf{c}_n^{(h)} = \frac{1}{\sqrt{N_{th}}} [1 \ e^{j\frac{2\pi n}{N_{th}}} \ \dots \ e^{j\frac{2\pi(N_{th}-1)n}{N_{th}}}] \quad (4)$$

式中: N_{th} 表示水平码字的个数 ($n = 0, 1, \dots, N_h - 1$)。则面向 3D MIMO 的直积码本可以表示为

$$\mathbf{c} = \mathbf{c}_m^{(v)} \otimes \mathbf{c}_n^{(h)} \quad (5)$$

本文所设计的垂直码字, 其天线阵元之间的相位差 $\Delta\varphi$ 是根据波束所期望的指向而定, 对于同一个垂直码字, 各个天线阵元之间的相位差 $\Delta\varphi$ 是固定的。其本质上是对 DFT 码本的采样方式进行了调整, 使其更适应实际环境。

2.2 码本方案 2

对于码字方案 1, 设计垂直码字时, 把基站天线 UPA 阵列当作一个整体。实际上, 基站垂直方向各个阵元都有自己的位置, 如果设计码本时, 考虑不同阵元具体位置来确定码字的相位, 则可以使波束的指向性更加准确。基于此想法, 对方案 1 稍加改进, 提出了另外一种垂直码本设计方案。

基站采用垂直方向和水平方向的阵元数分别

为 N_{rv} 和 N_{th} 的均匀平板阵列结构, 设垂直码本包括 N_V 个垂直码字, N_V 个垂直码字将小区划分为 N_V 个等距离的环形, 每一个垂直码字的波束均指向一个环形中心位置。如图 4 所示, H_1 为基站第一个天线阵元的高度; H_L 为基站第 L 个天线阵元的高度; H_{MS} 为用户天线高度。对于第 m 个垂直码字, 计算第 m 个环形中心与第 l 个天线阵元的距离 $d_{m,l} = \sqrt{(H_l - H_{MS})^2 + S_m^2}$, 其中, H_l 为第 l 个天线阵元的高度, H_{MS} 为移动站天线的高度, S_m 为第 m 个垂直码字形成的波束对准的位置距离基站的水平距离; 假设第一个天线阵元的相位为参考相位 0, 则第 l 个天线阵元的相位为 $\varphi_{m,l} = \frac{2\pi(d_{m,l} - d_{m,1})}{\lambda}$, 则第 m 个垂直码字表示为

$$\mathbf{c}_m^{(v)} = \frac{1}{\sqrt{N_{rv}}} [1 \ e^{j\varphi_{m,2}} \ \dots \ e^{j\varphi_{m,N_{rv}}}] \quad (6)$$

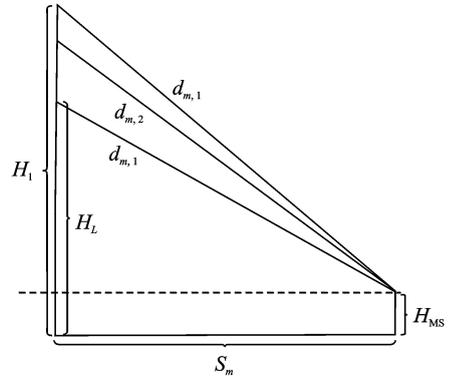


图 4 码字方案 2 设计示意图

Fig. 4 Design diagrammatic sketch of 3D codebook 2

类似地, 水平 DFT 码字表示为

$$\mathbf{c}_n^{(h)} = \frac{1}{\sqrt{N_{th}}} [1 \ e^{j\frac{2\pi n}{N_{th}}} \ \dots \ e^{j\frac{2\pi(N_{th}-1)n}{N_{th}}}] \quad (7)$$

联合水平与垂直方向码本设计, 面向 3D MIMO 的直积码本为

$$\mathbf{c} = \mathbf{c}_m^{(v)} \otimes \mathbf{c}_n^{(h)} \quad (8)$$

3 基于码本的有限反馈多用户传输

主要包括基站对多用户的调度策略, 以及各个用户从码本中选取其对应的最优码字, 并反馈码字索引号 PMI_i 的方法。

在大规模 MIMO 系统中, 基站端有数量巨大的低功率小天线, 天线数目远远超过同时调度的单天线用户数量, 基站和用户之间通过时分双工进行通信, 可以获得明显的多用户分集增益, 由此引发

多用户调度传输问题。调度目标通常就是保证这些用户都能得到一定的机会使用系统资源,并且应该使得系统总的吞吐量尽量大,调度代价主要是计算的复杂度和反馈开销的资源占用情况,而调度结果就是经过调度算法安排次序之后,各个用户实际获得的服务质量。不失一般性与公平性,本文按照随机调度的准则进行大规模 MIMO 系统下的多用户调度传输,其中,每次被同时随机调度的用户数与基站配置的天线数的比例为 1:8。

本文的大规模 3D MIMO 系统还将采用基于有限反馈的多用户预编码传输方案。小区中的用户根据接收功率最大的准则在码本集合 $\mathbf{C} = \{c_0, c_1, \dots, c_{N_v \times N_h - 1}\}$ 中选择其所对应的码字,即小区中的用户 i 需要反馈的信息量为其最优码字对应的索引 PMI_{*i*}, PMI_{*i*} 是根据最大接收功率准则确定

$$\text{PMI}_i = \underset{m=0, \dots, N_v \times N_h - 1}{\text{argmax}} \{ |H_i c_m|^2 \} \quad (9)$$

基站接收到所有用户的有限反馈量,根据随机调度的准则,每次随机调用多个用户,并且根据各个用户所反馈的最优码字索引信息 PMI_{*i*} 选择合适的码字进行预编码,实现闭环多用户 MIMO 传输。

4 仿真分析

仿真场景设置如下:基站天线为 UPA 阵列,即 $N_t = N_v \times N_h$,高度为 50 m。用户端天线为单天线接收,高度为 1 m。用户到基站的距离为 35 m 到 500 m。信道模型采用 Winner II C2 NLOS 模型^[20],共有 60 个用户在小区内随机播撒。

图 5 为基站天线为 $N_t = N_v \times N_h = 8 \times 8$ 的 UPA 阵列(垂直方向 8 个天线阵元,水平方向 8 个天线阵元)时,不同码字方案的归一化吞吐量(Cumulative distribution function, CDF)曲线,其中码本尺寸是垂直 8 个码字,水平 8 个码字,每次随机地同时调度 8 个用户,图中比较了采用本文提出的两种码本与二维 DFT 码本及三维 DFT 直积码本所对应的多用户传输方案性能。

图 6 为基站天线为 $N_t = N_v \times N_h = 4 \times 8$ 的 UPA 阵列(垂直方向 4 个天线阵元,水平方向 8 个天线阵元)时,不同码字方案的容量 CDF 曲线,其中码本尺寸是垂直 4 个码字,水平 8 个码字,每次随机地同时调度 4 个用户,图中也比较了 4 种传输方案的归一化吞吐量性能。

由仿真结果可以看出,三维直积码书方案由于充分利用了空间垂直维度,相比二维码书,有效提高了系统的平均吞吐量。本文所提的两种垂直码字相对 DFT 码字进行了更合理的垂直空间分割,

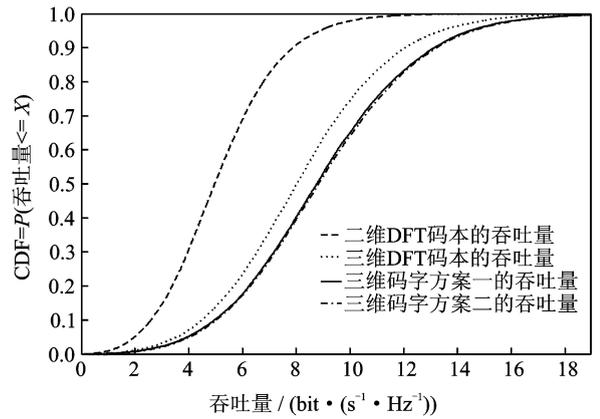


图 5 基站 UPA 天线阵元为 $N_v = 8, N_h = 8$ 时,不同码字的容量 CDF 曲线

Fig. 5 Throughput comparison of different codebooks for $N_v = 8, N_h = 8$ antenna arrays

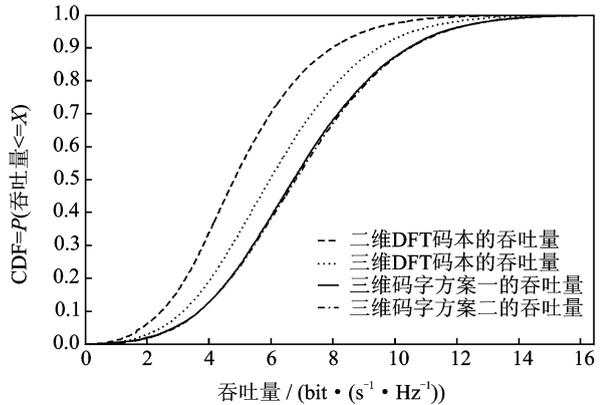


图 6 基站 UPA 天线为 $N_v = 4, N_h = 8$ 时,不同码字的容量 CDF 曲线

Fig. 6 Throughput comparison of different codebooks for $N_v = 4, N_h = 8$ antenna arrays

更好地匹配了实际信道,因此显著提高了系统的平均吞吐量。由于垂直方向上天线数目不多且天线间距比较小,加上信道条件的不确定因素较多,所提的码本方案 1 与码本方案 2 的性能差异不明显,但是它们的性能都明显好于二维 DFT 码本和传统的三维 DFT 直积码本所对应的多用户传输方法。

5 结束语

本文提出一种基于 3D MIMO 码本设计的大规模 MIMO 多用户调度传输方法,该方法中码书的设计是基于垂直和水平方向上的码书直积构造的,适用于发射天线采用 UPA 阵列的多天线系统。本文所提码本对传统的三维 DFT 直积码本进行了改进,基于空间分割的思想提出两种新的垂直码本设计方案并给出合适的调度方案。本文所提

方案充分利用空间垂直维度,相对垂直DFT码本进行了更合理的垂直空间分割,更好地匹配了信道,显著提高了系统频谱利用率和吞吐量性能。

参考文献:

- [1] Liu L, Chen R, Geirhofer S, et al. Downlink MIMO in LTE-ADVANCED: SU-MIMO vs. MU-MIMO [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(2): 140-147.
- [2] Duplcy J, Badic B, Balraj R, et al. MU-MIMO in LTE Systems [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2011(1):496763.
- [3] Ramprasad S A, Caire G, Papadopoulos H C. Cellular and network MIMO architectures; MU-MIMO spectral efficiency and costs of channel state information [C]//2009 Forty-Third Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. [S. l.]: IEEE, 2009:1811-1818.
- [4] Gesbert D, Kountouris M, Heath R W, et al. Shifting the MIMO paradigm [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(5):36-46.
- [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.
- [6] Rusek F, Persson D, Lau B K, et al. Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(1):40-60.
- [7] Andrews J G, Claussen H, Dohler M, et al. Femto-cells: past, present, and future [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3):497-508.
- [8] Li G Y, Xu Z, Xiong C, et al. Energy-efficient wireless communications; tutorial, survey, and open issues [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(6):28-35.
- [9] Ngo H, Larsson E, Marzetta T. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 61(4):1436-1449.
- [10] Marzetta T L. How much training is required for multiuser MIMO [C]//2006 Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. [S. l.]: IEEE, 2006:359-363.
- [11] 王海荣,王玉辉,黄永明,等.大规模MIMO多小区TDD系统中的导频污染减轻方法 [J]. 信号处理, 2013(2):171-180.
Wang Hairong, Wang Yuhui, Huang Yongming, et al. Pilot contamination reduction in very large MIMO multi-Cell TDD systems [J]. Journal of Signal Processing, 2013(2):171-180.
- [12] Hoydis J, Ten Brink S, Debbah M. Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(2):160-171.
- [13] Jose J, Ashikhmin A, Marzetta T L, et al. Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(8):2640-2651.
- [14] Guey J C, Larsson L D. Modeling and evaluation of MIMO systems exploiting channel reciprocity in TDD mode [C]//2004 IEEE 60th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC2004-Fall). [S. l.]: IEEE, 2004, 6:4265-4269.
- [15] Esmailzadeh R, Nakagawa M, Jones A. TDD-CDMA for the 4th generation of wireless communications [J]. IEEE Wireless Communications, 2003, 10(4):8-15.
- [16] Qiu R C, Zhou C, Zhang J Q, et al. Channel reciprocity and time-reversed propagation for ultra-wide-band communications [C]//2007 IEEE AP-S International Symposium on Antennas and Propagation. [S. l.]: IEEE, 2007, 1:29-32.
- [17] Jose J, Ashikhmin A, Marzetta T L, et al. Pilot contamination problem in multi-cell TDD systems [C]//2009 IEEE International Symposium on Information Theory (IEEE ISIT'2009). [S. l.]: IEEE, 2009:2184-2188.
- [18] Ngo H Q, Marzetta T L, Larsson E G. Analysis of the pilot contamination effect in very large multicell multiuser MIMO systems for physical channel models [C]//2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (IEEE ICASSP). [S. l.]: IEEE, 2011:3464-3467.
- [19] Xie Y, Jin S, Wang J, et al. A limited feedback scheme for 3D multiuser MIMO based on Kronecker product codebook [C]//2013 IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (IEEE PIMRC). [S. l.]: IEEE, 2013:1130-1135.
- [20] Kyosti P. IST, Tech. Rep. IST-4-027756 WINNER II D1. 1. 2 v1. 2 [J]. Winner II channel models, 2009:39-92.

作者简介:张帆(1991-),女,硕士研究生,研究方向:多用户通信,大规模多输入多输出通信,三维多输入多输出通信, E-mail: zhangf. seu@163. com; 何世文(1978-),男,博士,博士后,研究方向:协作通信、绿色通信、大规模多输入多输出通信、毫米波通信无线局域网通信和优化理论; 黄永明(1977-),男,博士,教授,研究方向:通信信号处理、多用户通信信号处理、协作通信、绿色通信、大规模多输入多输出通信和无线局域网通信技术; 杨绿溪(1964-),男,教授、博士生导师,研究方向:移动通信空时信号处理、协作通信、绿色通信、大规模多输入多输出通信、网络编码和无线局域网通信技术。

