

面向 5G 的大规模 MIMO 预编码算法比较研究

秦舒雅, 杨龙祥

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要:针对 5G 核心技术—大规模 MIMO 系统的预编码技术,文中重点阐述了 ZF 预编码技术、MMSE 预编码技术、BD 预编码技术,以及脏纸预编码技术、矢量预编码技术、THP 预编码技术,并通过仿真比较线性预编码的优劣,得出同一信噪比情况下 MMSE 预编码技术性能明显优于 ZF 和 BD 预编码技术。最后提出新的多小区 MIMO 预编码技术,同时考虑小区内和小区间的干扰,在计算量和误差方面做了权衡,对信道状态信息进行估计,并与 ZF 预编码进行仿真比较,结果表明容量有了明显提高。

关键词:5G;大规模 MIMO;预编码技术;多小区

中图分类号:TN929

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)07-0150-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.07.033

Research on Comparison of Pre-coding Algorithm in Massive MIMO for 5G

QIN Shu-ya, YANG Long-xiang

(College of Communication and Information System, Nanjing University of Posts and
Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract:In terms of the pre-coding technology in massive Multiple Input Multiple Output (MIMO) system which is a core technology of the fifth-generation mobile communication, focus on ZF pre-coding, MMSE pre-coding, BD pre-coding, DPC, THP, vector pre-coding and analyze linear pre-coding using MATLAB which proves that MMSE pre-coding is superior to ZF and BD pre-coding under the same SNR. Finally, a new pre-coding for the multi-cell MIMO which takes the global CSI into account is mentioned. It strikes a balance between computational complexity and error, estimating the channel state information and is proved to be effective compared with the ZF pre-coding.

Key words:5G; massive MIMO; pre-coding technology; multi-cell

1 概述

随着 4G 移动通信的逐步商用,学者们在此基础上纷纷开始对 5G 移动通信的研究。5G 应具备一些基本特性:超高的频谱利用率和超低的功耗;在传输速率和资源利用率等方面比 4G 系统提高 10 倍;无线覆盖性能和用户体验显著提高;满足未来 10 年移动互联网流量增加 1 000 倍的需求。5G 最初由 Toni Janevski 提出^[1],文中叙述了 5G 移动手机的概念,提出 5G 应由 3G 的以操作者为中心或 4G 的以服务为中心的概念过渡到以用户为中心。5G 协议栈的设想,可以概括为传统的物理层和数据链路层建立在开放的无线结构

上(Open Wireless Architecture, OWA)。网络层中 5G 使用移动 IP,可以支持在同一平台上同时使用多个无线标准,所以每个不同的无线接口会有不同的 IP 地址,这些地址会成为每个移动手机即外部代理(Foreign Agent, FA)中的转交地址(Care of Address, CoA)。5G 手机会维持虚拟化的多种无线虚拟网络环境。针对这个,把网络层分为两部分,下部网路层(针对每个接口)、上部网络层(针对移动终端)。开放传输协议层(Open Transport Protocol layer):网络阻塞会造成丢包,5G 移动终端中将可以下载并安装针对基站的具体无线技术的传输层版本。应用层中,5G 手机会

收稿日期:2014-08-17

修回日期:2014-11-20

网络出版时间:2015-06-23

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划项目(2013CB329104);国家自然科学基金资助项目(61372124)

作者简介:秦舒雅(1989-),女,硕士研究生,研究方向为基于 5G 的大规模预编码技术、无线移动通信网络;杨龙祥,教授,博士,博士后,博士生导师,研究方向为无线通信系统和物联网。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150623.1005.007.html>

进行测试并且将 QoS 的测量数据存储在数据库中,然后根据该数据和个人的消费能力智能地选择最好的无线连接方案。

文献[2-4]中提到的5G核心技术包括大规模密集网络(大规模MIMO)^[5-6]。它是一个配备很多天线的传输点,可以同时服务多个用户。不同于基站只配备少于十根天线的传统MIMO,大规模MIMO将配备上百或更多天线,几个终端的多个消息可以在相同的时间和频率资源上传输,从而获得最大的波束成形增益和最小的干扰^[7-8],同时提高系统容量,以替代传统的通过减小小区半径来提高系统容量的方法。和传统意义上的干扰协调不同,它根据大数原理用数量众多的天线来减小不相干的干扰和噪声对有用信号的影响。同时它的实现算法很简单,只需要最大比合并(Maximum Ratio Combining, MRC)或者空间匹配滤波器(Spatial Matched Filter)就可以实现干扰大幅减少。从信息论的角度看,当基站的天线数趋近于无穷,信道容量应该是无限大。Telatar E 和 Foschini J 的研究工作表明:MIMO系统的信道容量与收发端的最小天线数成正比^[9-10]。使用大规模天线可以比传统的MIMO系统有更高的速率、更好的能量与效率的权衡。MIMO系统^[11-12]主要分为:单用户MIMO系统、多用户MIMO系统、多小区MIMO系统^[13]。单用户MIMO系统也称点对点MIMO系统,对应于蜂窝系统中,等价于一个多天线基站在某个时刻某个频点上只服务于一个用户。多用户MIMO系统是指每个基站采用多天线技术服务多个用户的系统,又称为点对多点的MIMO系统。多用户MIMO系统的信道特性相对单用户MIMO系统有一定的复杂性。多小区MIMO即多个小区服务多个用户。

大规模天线系统的预编码技术^[14],是在下行链路的发送端利用已知的CSI对将发送的信号进行预处理的一个过程。将线性预编码器看作一个多模波束形成器,它将发送信号去耦之后形成空间正交特征波束,从而各个用户及天线间的干扰将最小化,并且根据当前的信道条件在相对稳健的信道中分配较多的能量,少分配或不分配能量到较差的信道中,从而提高大规模天线系统的频谱利用率、信道容量,简化接收端接收器的算法并且减小误码率,获得较好的信噪比,最终起到优化系统性能的作用。在接收端,移动台将只需对信号进行简单的处理就能解出自己所需的信号。同时预编码技术也应随着系统的性能及信道的情况而变化。

预编码技术可以按照编码设计方案分为线性预编码^[15-16]和非线性预编码两类。在多用户MIMO系统中,在基站发送端进行线性处理的发送信号方法称为线性预编码。主要的线性预编码方案有:迫零(Zero

Forcing, ZF)线性预编码方案、块对角化(Block Diagonalization, BD)线性预编码方案、最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)线性预编码方案。非线性预编码是指在发送信号上添加设计好的预编码矢量来达到抑制用户间干扰的预编码方法。非线性处理方法主要是基于“脏纸编码(Dirty Paper Coding, DPC)”思想的各种预处理方案,包括 Tomlinson-Harashima Pre-coding (THP)预编码及矢量(Vector Pre-coding, VP)预编码。在常规场景下,非线性预编码性能优于线性预编码,但是线性预编码有复杂度低的优势,更加容易应用于实际场景中。

2 大规模MIMO的预编码算法

2.1 系统模型

文中着重研究下行大规模MIMO信道。有 L 个小区,每个小区1个基站,配备 M 根天线,小区中有 K 个用户,每个终端配备 N 根天线。 $\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_K]^T$ 表示发送端发送给用户的信息矢量。预编码矩阵为 $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_K]$, \mathbf{B}_k 表示第 k 个用户的预编码矩阵。 $\mathbf{H} = [h_1^T, h_2^T, \dots, h_K^T]^T$ 为用户的信道矩阵。 \mathbf{P} 表示功率矩阵。

MIMO系统框图如图1所示。

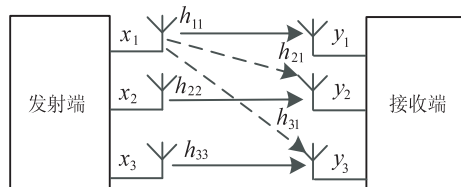


图1 MIMO系统框图

2.2 线性预编码

ZF线性预编码方案:ZF即迫零线性预编码方案,最初由飞思卡尔半导体(Freescale Semiconductor)公司提出。ZF预编码可完全消除用户间的干扰,它要求系统中的所有用户接收的信号中不含其他用户的干扰,即当第 k 个用户的预编码向量 \mathbf{b}_k 处于其他用户的信道矩阵 $[h_1^T, \dots, h_{k-1}^T, h_{k+1}^T, \dots, h_K^T]^T$ 的零空间内,即第 k 个用户接收的信号中其他用户的干扰项:

$$\sum_{j=1, j \neq k}^K h_k b_j s_j = 0 \quad (1)$$

当用户为单天线且用户数小于、等于基站发射天线数,并且信道矩阵 \mathbf{H} 为满秩时,ZF预编码可表示为用户信道矩阵的伪逆矩阵:

$$\mathbf{B} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \quad (2)$$

BD线性预编码方案:当用户配备天线数为多天线时,ZF预编码不再适用,由此引入BD预编码。它采用收发端协调波束成形技术,同时消除用户间和同一个用户各天线间的干扰,其主要思想是将下行信道分

解为多个独立的平行或正交的单用户 MIMO 信道。假设第 k 个用户的预编码矩阵 $\mathbf{B}_k = \tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)} \mathbf{V}_k^{(1)}$, 其中 $\tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)}$ 用于消除不同用户间干扰, 则 $\mathbf{H}_i \tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)} = \mathbf{0}, i \neq k$, 同时假设:

$$\tilde{\mathbf{H}}_k = [h_1^T, \dots, h_{k-1}^T, h_{k+1}^T, \dots, h_K^T]^T \quad (3)$$

则 $\tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)}$ 包含在 $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 的零空间中。利用奇异值分解:

$$\tilde{\mathbf{H}}_k = \tilde{\mathbf{U}}_k \tilde{\mathbf{S}}_k [\tilde{\mathbf{V}}_k^{(1)} \tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)}]^H \quad (4)$$

可得到 $\tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)}$ 。 $\tilde{\mathbf{V}}_k^{(1)}$ 用来抵消同一个用户内的干扰,

$\mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)}$ 可作为等效信道, 所以通过奇异值分解:

$$\mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)} = \mathbf{U}_k \begin{bmatrix} S_k & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [\mathbf{V}_k^{(1)} \mathbf{V}_k^{(0)}]^H \quad (5)$$

则:

$$\mathbf{B} = [\tilde{\mathbf{V}}_1^{(0)} \mathbf{V}_1^{(1)}, \dots, \tilde{\mathbf{V}}_K^{(0)} \mathbf{V}_K^{(1)}] \mathbf{P}^{1/2} \quad (6)$$

MMSE 线性编码方案: 区别于 ZF 预编码方案将其他用户的干扰化为零, MMSE 预编码方案以接收端的 SINR 达到最大为目的。通过引入参数 σ^2 , 使得系统的和容量随着 $\min(M, N)$ 线性增长, 并且 MMSE 预编码方案在低信噪比的情况下性能更好。其预编码矩阵可表示为:

$$\mathbf{B} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \frac{K}{P}, P = \{\text{diag}(P_1^{1/2}, P_2^{1/2}, \dots, P_K^{1/2})\}$$

为每个用户对应分配的功率。

2.3 非线性预编码技术

脏纸编码的思想最初由 Costa 提出^[17], 他将传输中产生的干扰信号比喻成纸上的污点, 假设读者已知污点的大小和位置, 那么就可以获得和纸上没有污点相同的信息量, 即在发射端已知干扰信号的大小, 就可以通过该技术在发射端将干扰消除, 从而在接收端相当于感受不到干扰的影响, 并且这种编码理论上可以逼近信道容量, 但是因为计算量庞大等因素, 实际中难以应用。

THP 预编码最初被用来对抗时域的符号间干扰 (Inter Symbol Interference, ISI), 然后被提出用在空域的 MIMO 系统下消除多用户干扰。它实际上是一个串行过程, 把判决反馈均衡器 (Decision Feedback Equalizer, DFE) 的反馈部分放到发射端, 由此, 第二个用户抵消第一个用户的干扰, 第三个用户抵消第一、二个用户的干扰, 以此类推, 后面用户中前面用户的干扰可被抵消。由于添加了反馈滤波器, 因此需要增加一个模数加法器来保证其稳定性。随后在接收端利用一个相应的模数加法运算就可以还原出数据。根据它的特性可以将它引入到 MIMO 系统中来消除多天线之间的干扰, 更进一步可应用到多用户 MIMO 系统中来消除多

用户之间的干扰。

矢量预编码即以最小化发射功率为目的, 在发射信号矢量上添加扰动矢量, 以改变原始信号的向量特性。扰动矢量的选择实际上是一个联合优化的过程, 联合选择最优的扰动矢量中所有的元素。从物理意义上讲, 由扰动矢量推导出的某个值应与信道逆矩阵的奇异值成反比, 当奇异值越大时, 这个值越小, 奇异值越小时, 这个值越大。如果这个值与每个奇异值的乘积近似相等, 则此时的扰动矢量是最优的。在接收端, 通过模操作将扰动矢量去除, 从而使扰动矢量不影响信号的均衡和解调。

3 大规模 MIMO 预编码算法性能比较

为了比较 ZF、MMSE 及 BD 线性预编码的性能在 MATLAB 平台上进行仿真, 比较其吞吐率。仿真场景: 1 个基站, 每个基站配置 4 根天线; 4 个用户, 每个用户配置 1 根天线。假设信道为瑞利衰落, 令 $P = 1$, 采用平均功率分配, 每个基站的发送总功率一定。

3 种不同线性预编码的容量随 SNR 变化比较如图 2 所示。由图可知, 三种预编码的容量均随 SNR 增长, MMSE 速度最快, BD、ZF 次之。而相同 SNR 情况下, MMSE 性能最好, 随后是 BD, ZF 性能最差。

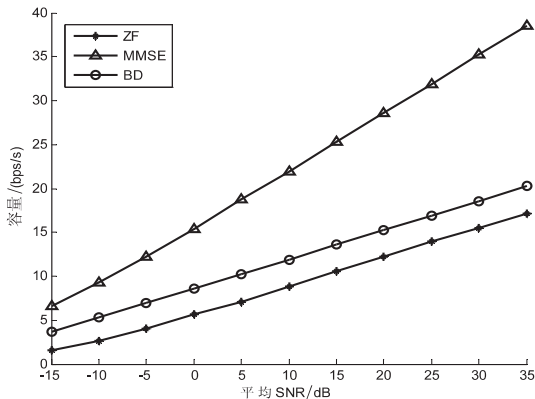


图 2 三种线性预编码的容量比较

4 IA-ZF 预编码

4.1 IA-ZF 预编码概述

多小区 MIMO 系统存在严重的小区间干扰, 影响系统性能, 但是通过多小区 MIMO 协作可以消除这些干扰^[18]。多小区 MIMO 协作可以分为完全协作和不完全协作: 完全协作也被称为联合处理, 处于联合处理的基站的发射端能够接收到所有其他协作小区的用户数据和信道状态信息 (CSI), 这些数据通过回程链路传递, 这就要求链路有较高的容量和低延迟, 随后协作基站利用 CSI 和用户数据联合确定预编码矩阵; 而不完全协作中基站发射端只需要知道到其他小区的 CSI^[19]。研究表明, 多小区协作, 尤其是完全协作可以

减小甚至消除小区间干扰,但是这种共享用户和信道状态信息是以反馈开销、系统延迟和计算复杂度增大为代价的^[20]。对此可以将整个蜂窝系统划分成多个簇(cluster),簇内部的小区之间完全共享信道信息,相邻的簇之间可以共享统计信道信息,其余的簇将对方的干扰视为背景噪声。当向用户发送数据时,簇内部进行完全协作发送,簇之间进行部分协作。

针对多小区MIMO小区间干扰的问题,文中提出小区间干扰已知的ZF(Inter-cell Interference Aware ZF, IA-ZF)预编码。这种编码考虑全局的CSI,也就是说不仅包括本小区的用户,同时也包括其他小区的用户。根据ZF理论,第 j 个基站 BS_j 的预编码矩阵满足:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{H}}_{jj}^T \mathbf{B}_j^{\text{IA-ZF}} = \mathbf{I}_K, j = 1, 2, \dots, L \\ \hat{\mathbf{H}}_{jl}^T \mathbf{B}_j^{\text{IA-ZF}} = \mathbf{0}_K, 1 \neq j \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\hat{\mathbf{H}}_{jl}^T$ 表示从小区1到基站 j 的所有终端的 $M \times K$ 信道矩阵估计值。对于每个小区 j 的终端 k 则满足:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{h}}_{jk}^T \mathbf{b}_{jk} = 1 \\ \tilde{\mathbf{H}}_{ijk}^T \mathbf{b}_{jk} = 0 \\ \hat{\mathbf{H}}_{jl}^T \mathbf{b}_{jk} = 0, 1 \neq j \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\tilde{\mathbf{H}}_{ijk}^T = [\hat{h}_{jl}, \dots, \hat{h}_{j(k-1)}, \hat{h}_{j(k+1)}, \dots, \hat{h}_{jK}]$ 。三个式子分别保证每个用户的SNR相同;小区中用户间的干扰为零;小区间的干扰为零。式(9)也可写成:

$$\hat{\mathbf{H}}_j^T \mathbf{b}_{jk} = \mathbf{w}_{jk} \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{w}_{jk} = [\underbrace{0, \dots, 0}_{\text{小区1}}, \dots, \underbrace{0, \dots, 1}_{\text{小区j}}, \dots, \underbrace{0, \dots, 0}_{\text{小区L}}]^T。$$

将 $\hat{\mathbf{H}}_j$ 进行奇异值分解:

$$\hat{\mathbf{H}}_j = \hat{\mathbf{U}}_j \hat{\mathbf{\Sigma}}_j^H \hat{\mathbf{V}}_j^H = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{U}}_j^p & \hat{\mathbf{U}}_j^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{\Sigma}}_j^p & 0 \\ 0 & \hat{\mathbf{\Sigma}}_j^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{V}}_j^p & \hat{\mathbf{V}}_j^0 \end{bmatrix}^H \quad (11)$$

则

$$\mathbf{b}_{jk}^{\text{IA-ZF}} = \hat{\mathbf{U}}_j (\hat{\mathbf{\Sigma}}_j^p)^+ (\hat{\mathbf{V}}_j^p)^H \mathbf{w}_{jk} \quad (12)$$

但是实际场景中,因为大规模MIMO系统的维数大量增大以及导频序列训练时间的限制,很难得到所有的信道状态信息 $\hat{\mathbf{H}}_j$ 的准确估计和逆矩阵。同时,由于不是所有的小区间的连接和小区内的同样健壮,所以很多信道状态信息很小,几乎为零,因此,可以将信道的估计降秩到 p ,并且满足误差最小。但是这个方案涉及到非凸的问题,当维数增大时,提出较低计算复杂度的迭代硬阈值方法(Iterative Hard Threshold, IHT)。当迭代次数达到预期或者 $\hat{\mathbf{H}}_j^p$ 不再提高时才会

停止。通过计算,可以得出有 $K + (L - 1)K_c$ 条路径较健壮,对系统性能影响较大,其中 K_c 为分布在小区边缘的用户,其余的较小可以忽略。同时 $\hat{\mathbf{H}}_j$ 的秩小于 $\min\{M, Q, LK\}$, Q 为假设的每个终端发射出的路径数,所以 $p = \min\{Q, K + (L - 1)K_c\}$ 。最后将 $\hat{\mathbf{H}}_j^p$ 进行奇异值分解, $\hat{\mathbf{H}}_j^p = \hat{\mathbf{U}}_j^p (\hat{\mathbf{\Sigma}}_j^p)^+ (\hat{\mathbf{V}}_j^p)^H$ 。得出预编码矩阵为:

$$\mathbf{b}_{jk}^{\text{IA-ZF-p}} = \hat{\mathbf{U}}_j^p (\hat{\mathbf{\Sigma}}_j^p)^+ (\hat{\mathbf{V}}_j^p)^H \mathbf{w}_{jk} \quad (13)$$

4.2 仿真

最后将提出的矩阵的秩为 p 的IA-ZF预编码与ZF预编码做仿真比较,场景设置为:7个小区,每个小区1个基站,每个基站配备100根天线;10个用户,每个用户配备1根天线。

如图3所示,可以发现这种编码方案的容量明显高于普通的ZF预编码。由此说明,在多小区MIMO的情况下,利用协作,考虑其他小区的CSI,可以有效消除小区间干扰,并且当秩降低时对误码率影响不大,同时可以大大减小运算量。

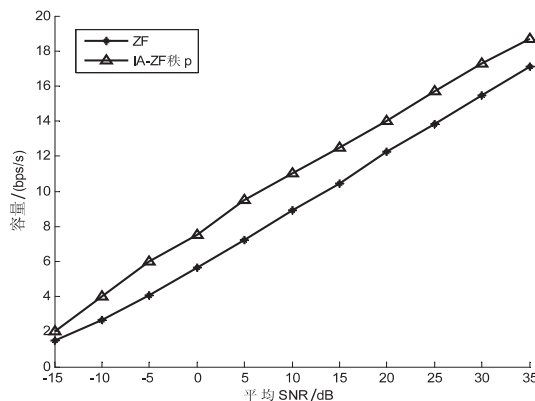


图3 秩为 p 的IA-ZF与ZF容量比较

5 结束语

文中概述了目前主流的MIMO预编码技术,并且仿真比较了3种主要的线性预编码技术。最后针对大规模MIMO,提出新的多小区协作的MIMO预编码技术,仿真证明了它的优越性,可以在多小区情况下显著提高系统容量。现今天线成本逐渐降低,大规模MIMO将很快应用于实践,从而大大提高系统性能,很好地推进5G技术的研究。

参考文献:

- [1] Janevski T. 5G mobile phone concept[C]//Proc of 6th IEEE consumer communications and networking conference. Las Vegas; IEEE, 2009.
- [2] Felita C, Suryanegara M. 5G key technologies: identifying innovation opportunity[C]//Proc of international conference on IEEE quality in research. [s. l.]: IEEE, 2013: 235-238.

- [3] Demestichas P, Georgakopoulos A, Karvounas D, et al. 5G on the horizon: key challenges for the radio-access network[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2013, 8(3): 47-53.
- [4] 董利, 陈金鹰. 第五代移动通信初探[C]//四川省通信学会 2012 年学术年会论文集. 出版地不祥: 出版者不详, 2012.
- [5] Rusek F, Persson D, Lau B, et al. Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(1): 40-60.
- [6] Ngo H Q, Larsson E G, Marzetta T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communication, 2013, 61(4): 1436-1449.
- [7] Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [8] Hoydis J, Labs B, Stuttgart A L, et al. 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.
- [9] Telatar I E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. European Transaction on Telecommunications, 1999, 10(6): 585-595.
- [10] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Communications, 1998, 6(3): 311-335.
- [11] 林云, 何丰. MIMO 技术原理及应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [12] 康桂华. MIMO 无线通信原理及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [13] 邱玲, 许杰, 刘蓓, 等. 多用户多小区 MIMO 通信技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [14] 贾蓉, 武刚, 何旭. 多用户 MIMO 信道下行链路预编码方案对比研究[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(s1): 31-35.
- [15] Muller A, Kammoun A, Bjornson E, et al. Linear precoding based on polynomial expansion: reducing complexity in massive MIMO (extended version) [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 8(5): 861-875.
- [16] Zarei S, Gerstacker W, Muller R R, et al. Low complexity linear precoding for downlink large-scale MIMO systems [C]// Proc of IEEE international symposium on personal, indoor and mobile radio communications. [s.l.]: IEEE, 2013.
- [17] Costa M. Writing on dirty paper[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(3): 439-441.
- [18] 孟银阔, 殷勤业, 田红波, 等. 多输入多输出系统下行链路发射与接收的联合线性预编码[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(4): 475-478.
- [19] 许冬欣, 于华彬. 基于有限反馈的多用户 MIMO 系统调度方案分析[J]. 信息技术, 2009(10): 96-98.
- [20] Jindal N. MIMO broadcast channels with finite-rate feedback [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(11): 5045-5060.

(上接第 149 页)

增加, 这种信息服务模式更有利于挖掘分析等科学研究的开展。

参考文献:

- [1] 方伟. 大学生就业工作信息化新探索[J]. 中国大学生就业, 2013(4): 3-6.
- [2] 李华婷. 云计算环境下大学生就业信息化平台创新研究[J]. 教育教学创新, 2013(35): 32-34.
- [3] 杨玉兰. 高校就业信息管理系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [4] 汪涛, 柳兵. 基于 J2EE 的就业管理信息系统的设计与实现[J]. 湖北民族学院学报: 自然科学版, 2013, 31(2): 216-218.
- [5] 易宏琤. 基于 .NET 架构的高校就业管理服务平台的构建[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [6] 孙中祥. 数据挖掘技术在大学生就业指导中的应用研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2013.
- [7] Papadimitriou F. A “neogeographical education”? The geo-spatial web, GIS and digital art in adult education[J]. International Research in Geographical and Environmental Education, 2010, 19(1): 71-74.
- [8] Yue-Feng Z, Wei-Feng M, Ke-Ji M. Research on the application of education information service platform based on WebGIS[J]. WSEAS Transactions on Communications, 2009, 8(1): 92-101.
- [9] 尹芳, 诸云强, 张金区, 等. 科学考察空间数据 WebGIS 信息发布及可视化研究[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(7): 2336-2339.
- [10] 周红宇. 基于 WebGIS 的在用公路桥涵管养信息系统研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [11] 黄秀珍. 基于 WebGIS 的北京市高速公路绿化管理系统研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [12] 舒永钢. WebGIS 旅游信息搜索功用研究及应用[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2012.
- [13] 张辉. 基于 WebGIS 的野外实习教学辅助系统研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [14] 张维. 基于 Flex 与 ArcGIS Server 的 WebGIS 研究与实现[D]. 南昌: 东华理工大学, 2012.

面向5 G的大规模MIMO预编码算法比较研究

作者：[秦舒雅](#)，[杨龙祥](#)，[QIN Shu-ya](#)，[YANG Long-xiang](#)
作者单位：[南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京, 210003](#)
刊名：[计算机技术与发展](#)
英文刊名：[Computer Technology and Development](#)
年，卷(期)：2015(7)

引用本文格式：[秦舒雅](#). [杨龙祥](#). [QIN Shu-ya](#). [YANG Long-xiang](#) [面向5 G的大规模MIMO预编码算法比较研究](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(7)