

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.07.020

引用格式:付豪.大规模MIMO系统的预编码算法综述[J].电讯技术,2015,55(7):822-828. [FU Hao. An Overview of Massive MIMO Precoding Algorithms[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(7): 822-828.]

大规模MIMO系统的预编码算法综述*

付豪**

(华南理工大学 电子与信息学院, 广州 510641)

摘要:相比于传统多输入多输出(MIMO)系统,大规模MIMO的天线数量大幅增加,使得系统的容量提升、误比特率下降,但也造成预编码矩阵维度升高,算法复杂度、系统成本及实现难度增大。将大规模MIMO系统主要采用的预编码技术分为线性和非线性两个部分,对两者进行了归纳和对比,并着重介绍了几种经过简化的线性预编码算法和几种比较典型的非线性预编码算法,指出因为非线性算法的复杂度很高,故未来大规模MIMO系统的预编码应当以线性算法为主。

关键词:大规模MIMO系统;预编码算法;线性预编码;系统容量

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)07-0822-07

An Overview of Massive MIMO Precoding Algorithms

FU Hao

(School of Electronic and Information, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In comparison with traditional multiple-input multiple-output (MIMO) systems, the number of antennas of massive MIMO increases significantly, which improves the system capacity and reduces the bit error rate (BER) but causes high precoding matrix dimension, precoding algorithm complexity, system cost and implementation difficulty. This paper classifies precoding technologies used in massive MIMO systems to two types, linear algorithms and nonlinear algorithms, summarizes and compares them with focuses on several simplified linear precoding algorithms and several typical nonlinear precoding algorithms. Finally, it points out that because of the high complexity of nonlinear algorithm, the future massive MIMO system should be based on linear precoding algorithms.

Key words: massive MIMO system; precoding algorithm; linear precoding; system capacity

1 引言

大规模多输入多输出(Multiple-input Multiple-output, MIMO)系统是指中心基站部署了大量天线的大规模阵列天线系统。这样,用户只需对接收信号进行简单的线性处理,就可以使频谱效率和能量效率在原有基础上提升几个数量级。同时,还可以大幅提升系统容量。

对大规模MIMO系统的研究,最早针对的是点到点通信,但由于近年来移动用户数量急剧增加,且

伴随着高铁等新型交通工具出现的高速移动场景,使我们仍需寻找更优的多用户预编码算法来满足未来移动通信的需求,故多用户MIMO系统的预编码设计将会继续成为焦点^[1]。

与传统MIMO相比,大规模MIMO的特点在于其巨大的能效优势和容量提升空间。在大规模MIMO中,基站天线间的相互间距满足不相关条件,且其数量远大于用户数,故系统可以获得很高的自由度增益、分集增益和功率增益,在系统容量增大的同

* 收稿日期:2015-03-11;修回日期:2015-06-18 Received date:2015-03-11;Revised date:2015-06-18

** 通讯作者:scutfuhao@163.com Corresponding author:scutfuhao@163.com

时使信号波束变窄。这样,就把天线发射出的能量更好地集中起来,在能效提升的同时还减轻了用户间的相互干扰^[2]。也就是说,在大规模 MIMO 系统中,每个用户若要获得与在单输入单输出(Single-input Single-output, SISO)系统中相同的性能,所需的能量更少^[3]。但也正因为基站端部署了大量天线,且小区内存在大量用户,所以,大规模 MIMO 存在着严重的干扰和导频污染问题。在用于消除干扰的策略中,对发射信号进行预编码处理就是一种非常适用的方法。它的基本思想是,通过矩阵运算把经过调制的符号信息流和信道状态信息进行有机结合,变换成适合当前信道的数据流,然后再通过天线发送出去。这种预处理方式优化了发送策略,提升了系统性能。

预编码算法根据其中是否引入了非线性运算,分为线性预编码和非线性预编码。MIMO 系统中常见的线性预编码算法有迫零(Zero-Force, ZF)预编码、匹配滤波(Matched Filter, MF)预编码和最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)预编码等;非线性预编码算法有恒定包络(Constant Envelope, CE)预编码和脏纸编码(Dirty Paper Coding, DPC)算法等,本文对这些算法进行总结和分析,并提出相关建议。

2 线性预编码算法

2.1 传统的线性预编码算法

当一个部署了 N 根天线的基站通过空间复用技术同时给 K 个用户发送信号时,第 k 个用户的接收信号可以表示为

$$y_k = \sqrt{P} h_{k,k}^T s_k + \sum_{l=1, l \neq k}^K \sqrt{P} h_{k,l}^T s_l + n_k. \quad (1)$$

等式右边的第一项代表目标信号,第二项代表其他 $K-1$ 个用户造成的干扰,第三项代表零均值循环对称加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)。其中, P 代表发射功率,是一个列向量; h_k^T 代表从基站到第 k 个用户的信道增益; f_k 和 s_k 分别代表预编码列向量和将要发送给第 k 个用户的信号。

下面介绍几种经典的线性预编码算法。

(1) 迫零预编码算法

$$F = H^\dagger = H^H (HH^H)^{-1} = H^H (Z)^{-1} = [f_1 f_2 \cdots f_k], \quad (2)$$

$$x_d^{\text{ZF}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} H^\dagger s_d = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} H^H (H^T H^H)^{-1} s_d = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} H^H (Z)^{-1} s_d. \quad (3)$$

(2) 匹配滤波预编码算法

$$F = H^* = [f_1 f_2 \cdots f_k], \quad (4)$$

$$x_d^{\text{MF}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} (H^T)^H s_d = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} H^* s_d. \quad (5)$$

(3) 最小均方误差预编码算法

$$F = H^H (HH^H + \alpha I)^{-1}, \quad (6)$$

$$x_d^{\text{MMSE}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} H^H (HH^H + \alpha I)^{-1} s_d. \quad (7)$$

式(2)~(7)中, $\alpha = K/\rho$, K 代表用户数, ρ 代表链路中信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)的度量值。所以,当 SNR 很大即噪声很小时,其性能趋近于 MF 预编码,而当 SNR 很小即噪声很大时,其性能就趋近于 ZF 预编码^[4]。

MMSE 和 ZF 预编码算法相比,两者的设计几乎相同,唯一的不同之处在于 MMSE 预编码考虑了信道噪声的影响,并在发送端设计预编码时就对噪声进行了相应的预处理,从而使得误码率(Bit Error Rate, BER)性能更优。

针对上述三种较经典的算法在活跃用户数为 4、QPSK 调制方式、瑞利衰落信道、发射天线数不同的情形下进行的仿真结果表明,MMSE 算法的误比特性能要明显优于 MF 算法和 ZF 算法,但相比之下,MMSE 预编码算法的复杂度较大。随着发射天线数的增加,MF 算法的性能也开始逐渐显现出来,虽然依旧不如 ZF 和 MMSE 算法,但也把 BER 降到了很低的数量级,且同时,它有着最低的复杂度。另外,仿真结果还表明,当天线数量急剧增多时,ZF 算法和 MMSE 算法的 BER 性能趋于重合,这和理论相符合。

(4) 正规化迫零(Regularized Zero-Forcing, RZF)预编码算法

和传统 ZF 算法相比,区别在于对矩阵 $H^T H^H$ 求逆之前,加入了负载系数 δI 。发射信号为

$$x_d^{\text{RZF}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} H^H (H^T H^H + \delta I)^{-1} s_d. \quad (8)$$

式中, δ 代表正规化系数,当它趋近于 0 时就是 ZF 预编码,趋近于无穷大时就是 MF 预编码。

文献[5]针对单小区大规模 MIMO 场景,对 ZF 性能作了比较全面的分析,求得了其和速率下界,同时,还对 ZF 预编码算法的计算负荷进行了分析。文献[6]针对 SNR=0 和 SNR=-5 dB 两种情形,对 MF 和 ZF 两种预编码的下行和速率进行对比分析,并指出了它们各自的适用场景:用户数量很大时,应优先选择 MF 预编码,它更有助于提高下行链路和

速率;而当用户数量很少时,则应优先选用 RZF 预编码。

(5) 块对角化预编码 (Block Diagonalization, BD) 算法

块对角化预编码是对 ZF 预编码算法的改进,它在线性预编码矩阵前乘入了零空间矩阵,可以有效减小其他用户产生的干扰。算法表示为

$$F_k = V_k A_k, \quad (9)$$

$$x_d^{\text{BD}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} V_k A_k s_d. \quad (10)$$

式中, V_k 代表通过信道状态信息求得的从基站到除目标用户外的其他用户的零空间, A_k 代表多输入单输出 (Multiple-Input Single-Output, MISO) 信道条件下的线性预编码矩阵。

(6) 其他改进算法

文献[7]把 BD 和 MMSE 结合起来,形成一种组合算法,这种改进算法的 BER 性能在 MMSE 的基础上又有了显著的提升。另外,在传统的线性算法中,还有信漏噪比预编码算法。文献[8]阐述了其原理,把它和线性预编码结合起来,并探讨了这种组合的优越性;文献[9]对信漏噪比算法做了改进,采用考虑了小区间干扰的等效信道,并提出通过白化滤波器来抑制干扰,使系统性能得到改善。

2.2 几种简化后的线性预编码算法

因为大规模 MIMO 系统具有很高自由度,所以它拥有良好的空间辨析度和阵列增益,从而可以有效抑制用户间的干扰。又因为线性预编码算法的简易性,所以,采用线性预编码是最佳的选择。但是,伴随着天线数量的大幅增加,系统维度也增大,所以,导致传统线性预编码的矩阵求逆运算复杂度变大。针对这个问题,世界各地的学者和研究人员近年来开展了大量的研究工作,并取得了一系列的成果,下面列举几种较为典型的改进型线性算法。

文献[10]提出了一种可以避开矩阵求逆运算的线性预编码算法,称为“被截短的多项式扩展 (Truncated Polynomial Expansion, TPE) 算法”,该算法通过 $J-1$ 级的矩阵多项式来逼近 RZF 的矩阵求逆结果。这样,TPE 算法只需要相对较低的运算复杂度就可以接近 RZF 算法的性能,且只需要对 J 做改变,就可以平滑地在 MRT ($J=1$) 和 RZF ($J=\min(M,K)$) 之间进行切换,且易于通过多级硬件来实现,硬件复杂度和 J 直接相关^[10]。

文献[11]给出了正规化迫零预编码矩阵:

$$G_{\text{RZF}} = \beta \hat{H} (\hat{H}^H \hat{H} + \xi I_K)^{-1} = \beta (\hat{H} \hat{H}^H + \xi I_M)^{-1} \hat{H}. \quad (11)$$

式中, β 代表能量归一化参数,用于使 G_{RZF} 满足功率约束条件 $\frac{1}{K} \text{tr}(GG^H) = P$, P 代表总发射功率。

根据文献[10]中引理 1 可知,只要满足其中的条件,式(11)即可通过一系列变换得到 TPE 预编码算法:

$$G_{\text{TPE}} = \sum_{l=0}^{J-1} \omega_l (\hat{H} \hat{H}^H)^l \hat{H}. \quad (12)$$

式中, $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{J-1}$ 是标量系数。可以看到,该算法的准确度虽然降低了,但却避免了对高维度矩阵的求逆运算,降低了算法复杂度。

同样,与之类似,文献[4]也提出了一种近似算法——近似矩阵求逆 (Approximative Matrix Inverse) 算法,该算法通过使用诺依曼序列^[12]来逼近矩阵的求逆结果。文中指出,只要矩阵满足一定条件,则对预编码矩阵 Z 的求逆运算可以诺依曼序列^[12]来近似,具体如下:

$$Z^{-1} \approx \frac{\delta}{M+K} \sum_{n=0}^L (I_K - \frac{\delta}{M+K} Z)^n. \quad (13)$$

式中, $\delta < 1$ 是引入的衰减因子。这样,仅通过对矩阵进行加法和乘法运算就可逼近矩阵求逆结果,从而有效减小预编码算法的算法复杂度。

综上所述,在大规模 MIMO 中采用 TPE 预编码算法有很多优势。首先,避免了预编码矩阵中的求逆运算;其次,其特有的多级结构使得对该多项式各级的求解可以同步进行,以提高算法效率;再次,由于可以对参数 J 进行拆分,故该算法易于通过硬件来实现;最后,由于 TPE 算法是基于信道统计特性求得的多项式系数的近似最优解,故该系数不受信道瞬变性影响。但是,从性能上讲,对于 TPE 算法,只有当 J 很大的时候,它的性能才可逼近 RZF 算法性能,而且是永远无法超越 RZF 算法的。

对于近似矩阵求逆算法而言,它的准确度依赖于式(13)中的累加次数 L , L 越大,近似值越接近真实值,但算法复杂度和所需时间都会增加。因此,在实际应用时,需要在算法的准确度和复杂度之间权衡。

当然,矩阵求逆结果也可以通过其他方法来计算或逼近,如 Gauss-Jordan 消除法,它所需的乘法次数虽然比其他算法少,但需要在硬件上进行浮点运算^[13],开销非常大;另一个是 QR 分解算法,该算法虽然具有严谨的数学理论依据,但实现它需要特殊的电路模块和繁琐的计算。

与 Gauss-Jordan 消除法和 QR 分解算法相比, 诺依曼序列逼近法所需的运算量相对较小, 只需要进行矩阵乘法运算, 运算形式比较单一, 且用硬件实现相对容易。所以, 采用诺依曼序列进行逼近的近似矩阵求逆算法具有很明显的优势, 如果要用硬件实现大规模 MIMO 系统预编码, 那么 TPE 算法和近似矩阵求逆算法是很好的选择。

与前面类似, 文献[14]提出了一种通过连续干扰消除 (Sequential Interference Cancellation) 法来实现迫零预编码的方案, 由于这种方案也避开对矩阵的求逆运算, 也使得其算法复杂度得到降低。

2.3 多小区预编码算法

文献[15]在单小区预编码基础上提出了多小区预编码方案, 即不同小区内的基站间进行协作通信, 同时为不同小区内的用户提供服务, 并且推导出了求解这种编码方案的最优发射功率、波束赋形向量以及信干噪比的定理。文中认为, 多小区预编码方案除了要在小区内进行信息交换之外, 还要实现信息在全局范围的共享。所以, 在系统获得良好性能的同时, 计算开销也增加了。文献[16]评估并优化了系统维度和网络规模很大时的 MU-MIMO 性能, 并运用文中提出的方法, 通过在不同条件下的量化和对比分析, 得到了不同协作方案下的性能差异。

这种方案与前面所述的非协同方案相比, 虽然性能良好, 但系统需要占用的资源很多, 建设和运维成本都很高, 而且由于基站端要对大量的协同信息进行处理, 故对硬件的处理速度和能力要求也非常高。多小区预编码技术有好几种具体的实现方法, 其中最典型的是网络 MIMO 多小区 (Network MIMO multi-cell) 技术^[1], 它具有良好的系统性能, 但是系统运行所需要的资源开销非常大。

因此, 当基站建设成本和通信速率不是主要的考虑因素时, 使用多小区协同的预编码方案是很好的选择。因为, 它不仅可以获得良好的通信性能, 还可以实现多小区间即全局范围内的信息共享和交互。

3 非线性预编码算法

3.1 恒定包络预编码算法

在传统的 MRT 线性预编码算法中, 天线发射信号由信道条件和信号符号决定, 每根天线的发射功率范围是 $[0, \max(\sqrt{P_T} |u|)]$, 变化区间很大, 会产生很高的峰均功率比 (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)^[20]。所以, 需要在发射端配置线性区

间很宽的功率放大器, 这就导致了大规模阵列天线系统的硬件实现难度增大、能量效率降低。

针对上述问题, 文献[17-19]提出了恒定包络预编码 (Constant Envelope Precoding) 算法。该算法规定, 每根天线上的发射功率被限定为一个与信道条件和信号符号均无关的常数, 各根天线均发射恒定包络信号, 符号信息由其相位携带, 接收端通过将各根天线发出的恒包络信号进行矢量合成后, 即可得到一个与之相应的星座点, 同时也就降低了 PAPR。

下面, 设定一个单用户 MISO 应用场景, 用户接收信号为

$$y = \sum_{i=1}^N h_i x_i + \omega. \quad (14)$$

式中, N 为基站侧天线数, P_T 代表总发射功率, 发射信号为

$$x_i = \sqrt{\frac{P_T}{N}} e^{j\theta_i}, i=1, 2, \dots, N. \quad (15)$$

发射信号的功率满足约束条件: $E[\sum_i |x_i|^2] = P_T$ 。

当然, 若要让星座点符号可以通过恒定包络信号中的相位 $\theta_i, i=1, 2, \dots, N$ 来携带, 那么, 星座点就必须满足一定的条件。文献[17]和[20]中均指出, 只有当所有星座点全部落入圆环域内, 系统才可以进行恒定包络传输; 否则, 那些分布在环外的星座点就不能通过恒定包络信号进行传输。

圆环域的数学表示如下:

$$D = \{d | r \leq d \leq R\}. \quad (16)$$

式中, 内径 $r \leq \sqrt{\frac{P_T}{N}} \|h\|_\infty$, 外径 $R = \sqrt{\frac{P_T}{N}} \|h\|_1$ 。显然, 这只给出了内径 r 的取值范围, 而并没有给出闭式解。对此, 文献[20]证明得出了内径 r 的闭式表达式为

$$r = \sqrt{\frac{P_T}{N}} \max\{2 \|h\|_\infty - \|h\|_1, 0\}. \quad (17)$$

当星座点的分布满足了上述要求后, 就可以通过相位恢复算法^[20]得到每根天线上 CE 信号所对应的相位角, 也就得到了 N 路的 CE 预编码发射信号。

另外, 文献[20]还提供了两种优化方案, 即天线选择 (Antenna subset, AS) 方案和不等振幅 (Unequal Amplitude, UA) 方案, 且仿真结果表明, 这两种方案的误符号率性能均优于普通的 CE 算法方案。

综上所述, CE 预编码算法通过其特有的恒定包络特性, 可有效减小系统对功率放大器线性区间宽度的过高要求, 从而达到降低硬件成本的目的。同时, 由于相位恢复算法的准确度和天线数量呈正相

关,所以,CE 预编码算法适用于系统天线数很大的情形。

3.2 脏纸编码算法

脏纸编码(Dirty-Paper Coding, DPC)算法^[21]的基本思想是:假设一张纸上有许多相互独立的污点,且书写者准确知道它们的分布状况(即完美的 CSI),那么,只要书写者采用一种与之相适应的书写方式,就可以使得阅读者在不知道污点分布状况的情形下,仍旧可以获取书写者想要传递的信息,这就可以使信道容量达到最大。所以,这也就要求基站端必须掌握完备的信道状态信息。然而,这在工程实现中是很难做到的,故也就使得 DPC 算法性能成为了传统预编码算法容量的理论参考基准。

当 DPC 原理运用于 MIMO 系统中时,若基站侧掌握了完备的 CSI,那么,对于 MU-MIMO 系统的下行链路而言,最理想的下行链路和速率就是执行 DPC 算法后的和速率^[22],即

$$C_{\text{DPC}} = \max_{\text{Tr}(\mathbf{P})=1} \text{lbdet}(\mathbf{I} + \rho \mathbf{H}^H \mathbf{P} \mathbf{H})。 \quad (18)$$

式中, \mathbf{P} 是一个 $K \times K$ 的功率分配对角阵;最大和速率是在限制条件 $\text{Tr}(\mathbf{P})=1$ 下,对功率分配对角阵进行最优化之后得到的。

通过上述分析,我们可以得出,如果基站端掌握了完备的 CSI,那么使用 DPC 预编码是最佳的选择,因为它可以使信道的利用率达到最大。同时,虽然在实际系统中获取完备的 CSI 非常困难,即 DPC 算法几乎不可能得到应用,但其理论性能指标可以作为 ZF 和 MMSE 等传统预编码算法的参考基准^[4]。也正因为如此,DPC 算法具有相当重要的理论参考价值。

3.3 THP 预编码算法

THP 预编码(Tomlinson-Harashima Precoding)技术最早运用于 SISO 系统中^[23],现在逐步地开始在 MIMO 系统应用。它是一种连续的非线性预编码技术,可以对下行链路子信道间产生的相互干扰进行均衡。它与 DPC 算法极其类似,是一个串行进行的过程,经过反馈之后,第二个用户可以消除来自第一个用户的干扰,第三个用户可以消除来自第一个和第二个用户的干扰,如此类推下去,就可以达到消除符号间干扰、提高误符号率性能的目的,是一种具有实际意义的预编码算法。

与 DPC 的不同之处在于 THP 预编码算法中加入了模运算,虽然 THP 预编码算法在性能上不如 DPC,但它可以有效降低发射功率^[24]。当然,它也需要基站端掌握完备的信道状态信息。然而,完备

的 CSI 是非常难以获取的。所以,针对这个问题,在前人研究的基础上,文献[25]又提出了中心化 THP 预编码算法和非中心化 THP 预编码算法,两者在发射端的算法模块相同,差异仅在于对角权重滤波矩阵所处的位置不同,最重要的是,它们对于 CSI 的要求可以是非理想的。

3.4 矢量预编码算法

相对于 THP 而言,向量扰动预编码^[26]是更广义的脏纸编码算法。它的算法原理是:在原本要发射的信号上加上一个扰动矢量,可以使原发射信号的发射功率最小化。该向量对应信道矩阵的每个特征值有一个特定数值,该数值和信道矩阵各特征值的乘积如果可以近似相等,则此时的扰动矢量是最优的,也就是说此时添加到原发射信号上的扰动向量可以使得发射功率最小化。所以,向量扰动预编码算法面临的问题就转换为寻找最优扰动矢量的最优化问题。针对这个问题,文献[27]提出了在超球面范围内寻找最优解的方案,文献[28]给出了在平行六面体内寻找最优解的方案,文献[29]提出了运用格基规约法寻找最优解的方案。另外,在非线性预编码算法中还有网格辅助(Lattice Aided, LA)算法^[30]。

大规模 MIMO 和传统 MIMO 相比,除了可以通过预编码提升误比特性能外,还可以大幅提升系统容量。在天线间相关系数为 0.2,用户数为 4,发射天线数不同,对 CSI 已知的情形采用注水法分配功率情况下进行的系统容量仿真对比可知,基站天线数每增加一个数量级,对容量的提升是很明显的。

4 结束语

通过本文总结和分析可知,当大规模 MIMO 系统的基站天线数很多时,应当优先选择 MF 预编码方案,反之,则应优先选用 ZF 预编码,这样配置可以使系统的综合性能更好。如果对噪声的消除要求较高,则考虑优先选用 MMSE 预编码方案,它可以有效抑制噪声,提高系统误比特性能。如果对算法复杂度和误比特性能都有较高要求,那么,对于大规模 MIMO 系统来说,只要系统条件满足一定的约束条件,就可以采用 TPE 算法和近似矩阵求逆算法。所以,未来对线性预编码的研究,应着力于探索对矩阵求逆的近似算法,这样才可以有效避免由于大规模 MIMO 系统维度过高,而导致的算法复杂度升高。

对于非线性预编码而言,由于 CE 预编码算法所特有的恒定包络特性和相位恢复过程中存在的误

差,使 CE 预编码算法适用于系统天线数量很多、且系统功率放大器线性区间较窄的情形,这也正符合大规模 MIMO 的特性。

DPC 算法和 THP 算法都需要基站掌握完备 CSI,它们可以对其他用户产生的干扰做到彻底消除。不同之处在于 THP 算法中融入了求模运算,虽然误比特性能有所下降,但降低了基站的发射功率。而且,THP 算法的改进算法对 CSI 的要求可以是非理想的。这样,THP 算法就有了现实意义。

矢量预编码算法是一种新颖的预编码理念,它有着严谨的理论根据,但却由于算法复杂度的限制,使得它在使用时仍需性能与复杂度之间权衡。

综上所述,尽管大部分非线性预编码算法的综合性能更优良,但由于大规模 MIMO 系统的天线数量多、矩阵维度高,加之线性预编码实现简单、算法复杂度较低,所以,在现阶段的实际运用中,仍然以线性预编码算法方案为主。同时,在对未来大规模 MIMO 系统的预编码算法研究中,对线性算法进行近似简化处理应当是一个很有前景的研究方向。

参考文献:

[1] Lu L, Li G Y, Lee A L, et al. An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2014, 8(5): 742–758.

[2] Tse D, Viswanath P. 无线通信基础 [M]. 李镝, 周进, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2007.

Tse D, Viswanath P. *Foundamental of Wireless Communication* [M]. Translated by LI Qiang, ZHOU Jin. Beijing: Peppole's Posts and Telecommunication Press, 2007. (in Chinese)

[3] 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.

[4] Prabhu H, Rodrigues J, Edfors O, et al. Approximative matrix inverse computation for very-large MIMO and applications to linear pre-coding systems [C]//*Proceedings of 2013 IEEE Wireless Communication and Networking Conference*. Shanghai: IEEE, 2013: 2710–2715.

[5] Yang H, Marzetta T L. Performance of conjugate and zero-forcing beamforming in large-scale antenna systems [J]. *IEEE Journal on Selection in Areas Communications*, 2013, 31(2): 172–179.

[6] Lee C, Chae C B, Kim T, et al. Network massive MIMO for cell-boundary users: From a precoding normalization perspective [C]//*Proceedings of 2012 IEEE Globecom Workshops*. Anaheim, CA: IEEE, 2012: 233–237.

[7] 张继荣, 刘亚丽, 江驰. 改进的 MU-MIMO 线性预编码算法 [J]. *西安邮电学院学报*, 2014, 19(6): 58–61.

ZHANG Jirong, LIU Yali, JIANG Chi. Improved MU-MIMO linear precoding algorithm [J]. *Journal of Xi'an Institute of Posts and Telecommunications*, 2014, 19(6): 58–61. (in Chinese)

[8] 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(自然科学版)*, 2008(21): 31–34.

JIA Rong, WU Gang, HE Xu. Comparison Research on Precoding Schemes for Downlink Multi-User MIMO Channels [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China(Natural Sciences Edition)*, 2008(21): 31–34. (in Chinese)

[9] 范慧婧, 孙长印, 卢光跃. 抑制小区间干扰的改进信漏噪比预编码方法 [J]. *电讯技术*, 2012, 52(8): 1329–1333.

FAN Huijing, SUN Changyin, LU Guangyue. A modified signal-to-leakage plus-noise ratio precoding scheme with other-cell interference suppression [J]. *Telecommunication Engineering*, 2012, 52(8): 1329–1333. (in Chinese)

[10] Muller A, Kammoun A, Bjornson E, et al. Efficient Linear Precoding for Massive MIMO Systems using Truncated Polynomial Expansion [C]//*Proceedings of 2014 IEEE 8th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*. A Coruna: IEEE, 2014: 273–276.

[11] Wagner S, Couillet R, Debbah M, et al. Large System Analysis of Linear Precoding in MISO Broadcast Channels with Limited Feedback [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(7): 4509–4537.

[12] Stewart G W. *Matrix Algorithms: Volume 1, Basic Decompositions* [M]. Philadelphia, Pa, USA: Society for Industrial Mathematics Press, 1998.

[13] Arias-Garcia J, Jacobi R P, Llanos C, et al. Ayala-Rincon. A suitable FPGA implementation of floating-point matrix inversion based on Gauss-Jordan elimination [C]//*Proceedings of 2011 VII Southern Conference on Programmable Logic*. Cordoba: IEEE, 2011: 263–268.

[14] Park C S, Byun Y S, Bokiye A M, et al. Complexity reduced zero-forcing beamforming in massive MIMO systems [C]//*Proceedings of 2014 Information Theory and Applications Workshop (ITA)*. San Diego: IEEE, 2014: 1–5.

[15] Zakhour R, Hanly S V. Base station cooperation on the downlink: Large system analysis [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(4): 2079–2106.

[16] Huh H, Moon S H, Kim Y T, et al. Multi-cell MIMO downlink with cell cooperation and fair scheduling: A large system limit analysis [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2011, 57(12): 7771–7786.

[17] Mohammed S K, Larsson E G. Single-User beamforming in large-scale MISO systems with per-antenna constant-envelope constraints: The doughnut channel [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(11): 3992–4005.

- [18] Mohammed S K, Larsson E G. Per-antenna constant envelope precoding for large multi-user MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(3):1059-1071.
- [19] Mohammed S K, Larsson E G. Constant-envelope multi-user precoding for frequency-selective massive MIMO systems [J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2013, 2(5):547-550.
- [20] Pan J X, Ma W K. Constant Envelope Precoding for Single-User Large-Scale MISO Channels: Efficient Precoding and Optimal Designs [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2015, 8(5):982-995.
- [21] Costa M. Writing on dirty paper [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(3):439-441.
- [22] Paulraj A, Nabar R, Gore D. Introduction to Space-Time Wireless Communications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [23] Fischer R F H. Precoding and signal shaping for digital transmission [M]. New York: Wiley-IEEE Press, 2002.
- [24] Cho Y S, Kim J, Yang W Y, et al. MIMO-OFDM 无线通信技术及 MATLAB 实现 [M]. 孙锴, 黄威, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013.
Cho Y S, Kim J, Yang W Y, et al. MIMO-OFDM Wireless Communication Technology and its MATLAB Implementation [M]. Translated by SUN Kai, HUANG Wei. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013. (in Chinese)
- [25] Huang M, Zhou S D, Wang J. Analysis of Tomlinson-Harashima Precoding in Multiuser MIMO Systems With Imperfect Channel State Information [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(5):2856-2867.
- [26] Hochwald B M, Peel C B, Swindlehurst A L. A vector perturbation technique for near-capacity multi-antenna communication part ii: Perturbation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(3):537-544.
- [27] Pohst M. On the computation of lattice vectors of minimal length, successive minima and reduced bases with applications [J]. ACM SIGSAM Bulletin, 1981, 15(1):37-44.
- [28] Kannan R. Improved algorithms for integer programming and related lattice problems [C] // Proceedings of 1983 ACM Symposium on Theory of Computing. Boston, MA: IEEE, 1983:193-206.
- [29] Mow W H. Universal lattice decoding: principle and recent advances [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2003(3):553-569.
- [30] Windpassinger C, Fischer R F H, Huber J B. Lattice-reduction aided broadcast precoding [J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(12):2057-2060.

作者简介:



付豪(1989—),男,贵州遵义人,2012年于合肥工业大学电气与自动化工程学院获学士学位,现为华南理工大学硕士研究生,主要研究方向为大规模 MIMO 系统的预编码技术。

FU Hao was born in Zunyi, Guizhou Province, in 1989. He received the B. S. degree from Hefei University of Technology in 2012. He is now a graduate student. His research concerns precoding technology for massive MIMO system.

Email: scutfuhao@163.com